

Universidad Nacional de Rosario  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura



Tesis Doctoral

Estudio de dinámica de los excedentes  
hídricos superficiales en cuencas urbanas de  
alta pendiente y sus implicancias en los  
procesos erosivos. Caso de estudio región  
urbana de la ciudad de Oberá, Misiones

**Darío Tomás Rodríguez**

Director: Dr. Ing. Gerardo Adrián Riccardi  
Codirector: Mgter. Ing. Alejandro Ricardo Ruberto

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,  
en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de:

**Doctor en Ingeniería**

Junio de 2018

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de posgrado en ninguna otra universidad.



Darío Tomás Rodríguez

**Dedicado a mis compañeros de estudio:  
Mariel y Tomás**

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	xi
LISTADO DE FIGURAS.....	xiii
LISTADO DE TABLAS.....	xxi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Fundamentos del tema de tesis.....	1
1.2. La ciudad de Oberá como zona de estudio.....	2
1.3. Problemáticas hidrosedimentológicas detectadas.....	4
1.4. Hipótesis y Objetivos.....	8
1.5. Estructura de la tesis.....	9
CAPÍTULO 2: PROCESOS HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS Y DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS URBANAS.....	11
2.1. Procesos hidrológicos e hidráulicos en Cuencas Urbanas Serranas de Clima Subtropical Húmedo (CUSCSH).....	11
--2.1.1. El ciclo hidrológico en zonas urbanas.....	11
---2.1.1.1. Balance de agua.....	11
---2.1.1.2. Análisis de precipitaciones.....	13
---2.1.1.3. Pérdidas de escurrimiento.....	15
---2.1.1.4. Transformación lluvia-caudal.....	17
--2.1.2. Dinámica del escurrimiento en cuencas urbanas.....	18
---2.1.2.1. Sistema menor o microdrenaje.....	18
---2.1.2.2. Sistema mayor o macrodrenaje.....	19
--2.1.3. Impacto hidrológico de la urbanización.....	19
---2.1.3.1. Aumento del riesgo de inundación.....	22
---2.1.3.2. Incremento de procesos de erosión-sedimentación.....	23
---2.1.3.3. Deterioro de la calidad de agua.....	24
--2.1.4. Modelación de los procesos hidrológicos e hidráulicos en cuencas urbanas.....	25
---2.1.4.1. Estado del arte.....	25
---2.1.4.2. Modelo hidrológico-hidráulico del SWMM.....	32
---2.1.4.3. Otros modelos disponibles para la modelación de CUSCSH.....	38

---

--2.1.5. Criterios para la evaluación de amenaza por inundación en áreas urbanas.....	40
2.2. Procesos de erosión hídrica en cuencas urbanas.....	41
--2.2.1. Mecanismos de erosión.....	41
---2.2.1.1. Factores que afectan la erosión.....	43
---2.2.1.2. Fuerzas Actuantes.....	49
---2.2.1.3. Procesos erosivos en suelos granulares y cohesivos.....	50
--2.2.2. Erosión a nivel de cuenca.....	58
---2.2.2.1. Ecuación universal de pérdida de suelo.....	59
---2.2.2.2. Ecuación universal modificada de pérdida de suelo.....	64
---2.2.2.3. Revisiones a la ecuación universal de pérdida de suelo.....	66
--2.2.3. Erosión generalizada a nivel de cauce.....	67
---2.2.3.1. Fuerza tractiva.....	67
---2.2.3.2. Método Lischtvan y Lebediev.....	68
--2.2.4. Sedimentos y contaminantes en cuencas urbanas.....	70
---2.2.4.1. Problemáticas de cuencas urbanas de cabecera.....	70
---2.2.4.2. Acumulación y arrastre de poluentes.....	71
---2.2.4.3. Importancia de la limpieza de calles.....	73
---2.2.4.4. Fenómeno del primer flujo.....	74
--2.2.5. Modelación de la producción de sedimentos.....	75
---2.2.5.1. Estado del arte.....	75
---2.2.5.2. Módulo de calidad de agua del SWMM.....	77
---2.2.5.3. Otros modelos disponibles.....	80
2.3. Modelación hidrosedimentológica en CUSCSH.....	82
--2.3.1. Características específicas de los procesos hidrosedimentológicos en CUSCSH.....	82
--2.3.2. Antecedentes de modelación hidrológica-hidráulica en CUSCSH y la región.....	83
--2.3.3. Antecedentes de evaluación de producción de sedimentos en CUSCSH y la región..	87
--2.4. Sistemas de drenaje urbanos sostenibles.....	94
--2.4.1. Evolución de la gestión del drenaje urbano.....	94
--2.4.2. Enfoque alternativo para la gestión de aguas de lluvia.....	95
---2.4.2.1. Conceptos básicos.....	96
---2.4.2.2. Corrientes de opinión.....	97
---2.4.2.3. Integración de enfoques.....	100
<b>CAPÍTULO 3: REGIÓN MISIONERA DE OBERÁ Y LA CUENCA EN ESTUDIO....</b>	<b>103</b>
3.1. Aspectos climáticos, edafológicos, orográficos e hidrográficos de la región de Oberá..	103

---

--3.1.1. Clima.....	103
---3.1.1.1. Estaciones meteorológicas analizadas.....	103
---3.1.1.2. Precipitaciones.....	108
---3.1.1.3. Temperaturas.....	111
---3.1.1.4. Humedad ambiente.....	111
---3.1.1.5. Evapotranspiración.....	112
---3.1.1.6. Balance hídrico.....	113
---3.1.1.7. Clasificación climática.....	114
---3.1.1.8. Tendencias de cambio climático.....	115
--3.1.2. Edafología.....	116
---3.1.2.1. Geología.....	116
---3.1.2.2. Edafología y estratigrafía.....	118
--3.1.3. Orografía.....	128
---3.1.3.1. Sistema orográfico.....	128
---3.1.3.2. Regiones naturales.....	130
---3.1.3.3. Mapa de pendientes.....	133
--3.1.4. Hidrografía.....	134
---3.1.4.1. Hidrografía de Misiones y Oberá.....	134
---3.1.4.2. Erosión hídrica.....	141
3.2. Evolución demográfica de Misiones y Oberá.....	147
3.3. La cuenca en estudio.....	149
--3.3.1. Cuenca del arroyo Mbotaby.....	149
--3.3.2. Características fisiográficas.....	150
--3.3.3. Usos y ocupación del suelo.....	151
--3.3.4. Sectores en riesgo hídrico.....	154
CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN DE LA MODELOCIÓN HIDROLÓGICA- HIDRÁULICA Y DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS.....	157
4.1. Indicadores de bondad de ajuste.....	157
4.2. Implementación del modelo hidrológico-hidráulico.....	160
--4.2.1. Introducción.....	160
--4.2.2. Implementación del SWMM.....	161
---4.2.2.1. Constitución y discretización de elementos componentes del sistema.....	161
---4.2.2.2. Tratamiento de áreas directa e indirectamente conectadas.....	162
---4.2.2.3. Bocas de tormenta y vertederos.....	163

---

---4.2.2.4. Conceptualización de calles, zanjas de tierra y cauces naturales.....	164
---4.2.2.5. Flujo base.....	168
---4.2.2.6. Condición de borde saliente de la cuenca.....	169
---4.2.2.7. El ambiente de modelación resultante.....	172
--4.2.3. Calibración y validación del modelo.....	173
---4.2.3.1. Metodología.....	173
---4.2.3.2. Registros hidrometeorológicos.....	174
---4.2.3.3. Calibración inicial.....	174
---4.2.3.4 Calibración-validación.....	177
---4.2.3.5. Validación del modelo en una tormenta extrema.....	183
---4.2.3.6. Parámetros resultantes de la calibración y validación.....	184
---4.2.3.7. Indicadores de bondad de ajuste a partir de caudales observados y simulados.....	185
4.3. Implementación de los modelos de producción de sedimentos.....	188
--4.3.1. Análisis de muestras de agua.....	188
--4.3.2. Producción anual de sedimentos.....	190
---4.3.2.1. Pérdida de suelo por erosión hídrica.....	190
---4.3.2.2. Descarga específica.....	193
--4.3.3. Producción de sedimentos por eventos.....	193
---4.3.3.1. Ajuste de coeficientes MUSLE.....	196
---4.3.3.2. Relación escorrentía vs producción total de sedimentos.....	197
---4.3.3.3. Extrapolación de producción a un año medio.....	198
--4.3.4. Producción de sedimentos mediante algoritmo de SWMM.....	198
---4.3.4.1. Metodología.....	198
---4.3.4.2. Resultados de la calibración.....	198
---4.3.4.3. Análisis de sensibilidad del modelo.....	203
<b>CAPÍTULO 5: APLICACIONES DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA Y DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS.....</b>	<b>205</b>
5.1. Metodología.....	205
5.2. Determinación de la tormenta crítica.....	206
--5.2.1. Duración de tormenta crítica.....	206
--5.2.2. Hietogramas de diseño.....	208
5.3. Escenario futuro hipotético.....	209
5.4. Simulaciones mediante modelación matemática hidrológica-hidráulica.....	211
5.5. Amenaza de inundación en calles.....	213

--5.5.1. Mapas de niveles máximos.....	213
--5.5.2. Mapas de velocidades máximas.....	217
--5.5.3. Zonas de alta amenaza en calles.....	221
5.6. Amenaza de inundación en cauces naturales.....	224
5.7. Vulnerabilidad a la erosión superficial.....	228
--5.7.1. Erosión superficial mediante algoritmo del SWMM.....	228
--5.7.2. Erosión superficial mediante MUSLE.....	232
5.8. Vulnerabilidad a la erosión en cauces naturales.....	233
5.9. Total de sedimentos erogados por evento de diseño.....	236
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	241
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA.....	245
ANEXOS.....	259
--Plano N°1: Ubicación geográfica, curvas de nivel y zonificaciones de la cuenca Mbotaby	
--Plano N°2: Pendientes de conductos modelizados	
--Plano N°3: Conductos, sumideros, vertederos y nodos sector Este	
--Plano N°4: Conductos, sumideros, vertederos y nodos sector Oeste	



## AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento:

A Dios por continuar dándome la posibilidad de formarme en una temática tan apasionante para mí y de cada vez más significancia para la sociedad en general, como lo es la administración de los recursos hídricos.

A mi director de tesis, el Dr. Ing. Gerardo Riccardi, por las enseñanzas técnicas y humanas que se ha esforzado en transmitirme durante todo el desarrollo mi formación.

Al Mgter. Ing. Alejandro Ruberto y al Dr. Ing. Jorge Pilar, mis codirectores de tesis y beca respectivamente, por su colaboración en las actividades requeridas para la concreción de la tesis.

Al Mgter. Ing. Hugo Reinert, por estar siempre presente y auxiliar desinteresadamente a los estudiantes en su formación, con entusiasmo y humildad.

A las autoridades del CONICET, la Universidad Nacional de Misiones, la Facultad de Ingeniería-UNaM y del Departamento de Ingeniería Civil-FI-UNaM, por articular los medios que posibilitaron la concreción de una beca para formación de recursos humanos en Áreas de Vacancia Geográfica, especialmente al Dr. Ing. Aldo Caballero.

A los docentes del Laboratorio de Hidráulica de la FCEIA-UNR por recibirme tan cordialmente durante mi estadía en el laboratorio. En especial al Dr. Ing. Pedro Basile, por su colaboración desinteresada y significativos aportes al escrito final de la tesis.

Al MMO. Claudio Do Santo y su adorada familia por acogerme durante mis reiteradas estadías en Rosario.

A los numerosos alumnos de la carrera de ingeniería civil de la UNaM, que han colaborado, de una u otra manera, en mis actividades de campo.

A mis padres, Marleni y Tomás, y a mi hermana Rocío, por su apoyo incondicional, constante preocupación por el progreso de mis actividades y estar siempre atentos a mis necesidades y de mi familia.

Y a mi ángel de la guarda Celi, por hacerme saber de su continua presencia y condicionarme a intentar ser cada día una persona mejor.



## RESUMEN

Las alteraciones del paisaje en cuencas urbano-rurales causadas por el aumento de asentamientos de población conducen a un progresivo aumento en la cantidad de escurrimiento superficial y producción de sedimentos. Estos procesos son relevantes en zonas con climas subtropicales húmedos y con topografía de pendientes escarpadas como la zona noreste de nuestro país y en particular en la provincia de Misiones. En este contexto el presente trabajo tiene por objeto describir, mediante herramientas computacionales de mediana complejidad, la dinámica de los excedentes hídricos superficiales en cuencas urbanas de alta pendiente y sus implicancias en los procesos erosivos en ambientes de la región serrana de Misiones. En particular se logró constituir, calibrar y validar un modelo hidrológico-hidráulico con alto nivel de detalles en la cuenca Mbotaby de la ciudad de Oberá y el posterior acople con modelos de producción de sedimentos por erosión hídrica superficial a distintas escalas temporales. Para calibrar el modelo se realizaron mediciones hidrosedimentológicas en 10 eventos logrando dotar a la modelación de un satisfactorio nivel de aproximación. La posterior implementación de los modelos permitió obtener mapas de amenaza por inundación en calles y cauces naturales, mapas de vulnerabilidad a la erosión superficial y en cauces y polutogramas de totales de sedimentos en suspensión para diferentes eventos de diseño y tanto para el escenario actual, como para un hipotéticos escenarios futuro. Los resultados demuestran que la amenaza por inundación está determinada por la ocurrencia simultanea de niveles de desborde y altas velocidades (superiores a los 4 m/s), no así por la permanencia del agua. Además, las mediciones de erogación de sedimentos indican que la región presenta un comportamiento más cercano a valores determinados por las metodologías que determinan mayores volúmenes de sedimentos. Se demostró además que, en caso de mantenerse las tendencias actuales de urbanización, los niveles de amenaza de inundación y vulnerabilidad a la erosión se verán incrementadas, sobre todo para eventos frecuentes.



**SURFACE RUNOFF  
IN HIGH-SLOPE URBAN CATCHMENTS  
AND THEIR IMPLICATIONS IN EROSION PROCESSES.  
CASE STUDY OBERÁ` URBAN REGION, MISIONES**

Landscape disturbances in urban-rural watersheds caused by increases in urbanization have led to a progressive increase in the amount of surface runoff and sediment production. These processes are relevant in areas with humid subtropical climates and with relief of high slopes such as northeastern Argentina and in the particular case of the province of Misiones. The present work aims to describe, through computational tools of medium complexity, the dynamics of surface runoff in high slope urban catchments and their implications for erosion processes in environments in the mountain region of Misiones. In particular, it was possible to constitute, calibrate and validate a hydrological-hydraulic model with high level of detail at the Mbotaby stream basin of the Oberá city and the subsequent coupling with models of sediment production by surface water erosion at different temporal scales. To calibrate the model hidrosedimentológica measurements were performed on 10 events, giving the modeling approach a satisfactory level. The subsequent implementation of the models allowed the elaboration of maps of flood threat in streets and natural channels, maps of vulnerability to surface erosion and in channels and polutograms of suspended sediment totals for different design events, both for the actual state and by a series of hypothetical future states. The results show that the threat of flooding is strongly determined by the simultaneous occurrence of overflow levels and high velocities, but not by of permanence of water levels. In addition, measurements of sediment delivery indicate that the region exhibits a behavior closer to values determined by the methodologies that determine higher sediment volumes. It was also demonstrated that, if current urbanization trends are maintained, levels of flood threat and erosion vulnerability will increase, especially for frequent events.



## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Ubicación geográfica de Oberá.....	3
<b>Figura 1.2.a.</b> Monte Nativo; <b>b.</b> Desmonte para forestación. ....	5
<b>Figura 1.3.a.</b> Cauce natural erosionado. <b>b.</b> Ollas al pie de obras de canalización.....	5
<b>Figura 1.4.a.</b> Escurrimiento de flujo base. <b>b.</b> Material de lavado disuelto durante una tormenta en el mismo salto.....	6
<b>Figura 1.5.a.</b> Inundación en Oberá, 10-nov-15(Territorio digital, 2015). <b>b.</b> Inundación en Posadas, 19-dic-12 (Primera edición web, 2012). <b>c.</b> Inundación en Cmte. Andresito, 3-may-14 (Red de medios del Mercosur, 2014). <b>d.</b> Inundación en Montecarlo, 02-ene-14 (Primera edición web, 2014).....	7
<b>Figura 1.6.a.</b> Deslizamiento de tierra en Colonia Aurora, Misiones, 26-jun- 2011 (Territorio digital, 2011); <b>b.</b> Deslizamiento de tierra en Aristóbulo de Valle, Misiones, 17-abr-2014 (Territorio digital, 2014).....	8
<b>Figura 2.1.</b> Enfoque sistémico del ciclo hidrológico (Orsolini et al., 2008).....	12
<b>Figura 2.2.</b> Características de la perturbación del balance hidrológico en áreas urbanas (AECD 1986, citado por Tucci et al., 1995).....	13
<b>Figura 2.3.</b> Efecto de la urbanización en la infiltración y el escurrimiento (BACA, adaptado por Butler y Davies 2011 citado por Jha et al. 2011).....	17
<b>Figura 2.4.</b> Cambios en la respuesta hidrológica de la cuenca debido a la urbanización. Morfología de los hidrogramas (ASCE-WEF, 1992).....	17
<b>Figura 2.5.</b> Tipo de modelos hidrológicos-hidráulicos según la distribución de sus parámetros (Menéndez y Re, 2009).....	28
<b>Figura 2.6.</b> Esquema de embalse no lineal (Mendez, 2012).....	32
<b>Figura 2.7.</b> Clasificación de los procesos de erosión por acción del agua.....	43
<b>Figura 2.8.</b> Relación funcional entre la intensidad y la energía cinética de una lluvia.....	45
<b>Figura 2.9.</b> Variaciones en las tasas de erosión (E) y depositación (D), según cambios topográficos a lo largo de una pendiente (Terrence et al., 2002, citado por García-Chevesich, 2010).....	46
<b>Figura 2.10.</b> Diagrama de Shields original en el sistema de ejes ( $\tau_*$ , $Re_{*p}$ ) (Basile 2018)...	52
<b>Figura 2.11.</b> Tensión de corte adimensional critica en función de $D_*$ para distintos criterios de inicio de movimiento y curvas parametrizadas por diversos investigadores (Basile 2018)	53
<b>Figura 2.12.</b> Fuerzas tractivas unitarias permisibles para canales de material cohesivo	

convertidas de los datos de la URSS sobre velocidades permisibles (Adaptado de Chow, 1994).....	55
<b>Figura 2.13.</b> Velocidad de corte crítica versus cohesión en suelos arcillosos (Basile, 2018).	55
<b>Figura 2.14.</b> Velocidad media crítica ( $h=1$ m) en función del coeficiente de rugosidad de Manning, para arcillas compactas y muy compactas (Basile, 2018).....	56
<b>Figura 2.15.</b> Velocidad de corte crítica en función de la cohesión, para la ecuación de Mirtskhoulava (1997), considerando $s=2.7$ y tres valores de $d_a$ (Basile, 2018).....	57
<b>Figura 2.16.</b> Fuentes de poluentes en áreas urbanas (Butler y Clark, 1995, citado por Dotto, 2006).....	72
<b>Figura 2.17.</b> Modelos de acumulación de sedimentos (Huber y Dickinson, 1988, citados por Mendez, 2012).....	72
<b>Figura 2.18.</b> Muestreo de calidad de agua pluvial en Porto Alegre, Brasil (Tucci et. al, 2007).....	74
<b>Figura 2.19.</b> Evolución de la modelación de la erosión (Zambrano Najera, 2015).....	81
<b>Figura 2.20.</b> Comparación de hidrogramas resultantes para cinco escenarios con distintos grados de antropización en una microcuenca de Oberá (Rodríguez, 2014).....	86
<b>Figura 2.21.a.</b> Mapa de precipitaciones medias anuales para Brasil [mm]. <b>b.</b> Mapa de factor $R$ para Brasil [(MJ mm)/(ha h año)] (Adaptado de Da Silva, 2004).....	88
<b>Figura 2.22.a.</b> Mapa del factor $R$ para Brasil. <b>b.</b> Clasificación climática para Brasil (Adaptado de Oliveira et. al., 2012).....	89
<b>Figura 2.23.</b> Mapa del factor $R$ [(MJ mm)/(ha h)] para el NEA (1950-2005) (Gvozdenovich et al., 2015).....	90
<b>Figura 2.24.a.</b> Techo verde, control en la fuente. <b>b.</b> Depósito de detención regional.....	98
<b>Figura 2.25.a.</b> Loteo convencional. <b>b.</b> DUBI. Burgos (2007).....	99
<b>Figura 2.26.</b> Cadena de gestión del agua (Perales Momparler y Andrés-Doménech, 2015)	101
<b>Figuras 3.1.a.</b> Pluviómetro digital a cangilones (FI-UNaM). <b>b.</b> Estación meteorológica experimental (FI-UNaM).....	106
<b>Figura 3.2.</b> Estaciones meteorológicas SSRH en Misiones y alrededores.....	107
<b>Figura 3.3.</b> Distribución de precipitaciones medias mensuales en la zona de estudio (1998-2011).....	108
<b>Figura 3.4.</b> Curvas i-d-f de 5 a 60 minutos para Cerro Azul (1966-1984) (Adaptado de Litwin y Franco, 1987).....	109
<b>Figura 3.5.</b> Curvas i-d-f de 1 a 24 horas para Cerro Azul (1966-1984) (Adaptado de Litwin y Franco, 1987).....	110

<b>Figura 3.6.</b> Distribución de temperaturas medias mensuales en la zona de estudio (1998-2012).....	111
<b>Figura 3.7.</b> Distribución de humedades relativas medias mensuales en la zona de estudio (1998-2012).....	112
<b>Figura 3.8.a.</b> Alcance de la Formación Serra Geral (Relief Map, 2016); <b>b.</b> Paisaje característico de la Formación Serra Geral en Brasil (ICMBio, 2016).....	116
<b>Figura 3.9.a.</b> Extensión de las cuencas neopaleozoicas del centro y noreste argentino (Zambrano, 1974, modificado por Di Pasquo et al., 2006); <b>b.</b> Mapa geológico de la Mesopotamia (SEGEMAR, 2006).....	117
<b>Figura 3.10.a.</b> Ultisol. <b>b.</b> Oxisol. <b>c.</b> Entisol (Herrera, 2016).....	120
<b>Figura 3.11.a.</b> Molisol. <b>b.</b> Alfisol. <b>c.</b> Inceptisol (Herrera, 2016) .....	121
<b>Figura 3.12.a.</b> Corte de suelo colorado para obra civil. <b>b.</b> Probeta de suelo colorado para ensayo triaxial.....	123
<b>Figura 3.13.a.</b> Cantera de tosca, suelo del complejo 6. <b>b.</b> Extracción de dama para ensayo suelo complejo 3A (Reinert, 2007).....	125
<b>Figura 3.14.</b> Distribución de los complejos de suelo dentro del municipio Oberá y la zona urbana (Adaptado de CARTA 1964). .....	126
<b>Figura 3.15.</b> Perfil estratigráfico medio.....	127
<b>Figura 3.16.</b> Mapa hipsométrico y sierras de Misiones (Adaptado de MERNR, 2014).....	129
<b>Figura 3.17.</b> Distribución de las regiones naturales dentro del municipio Oberá y la zona urbana (Adaptado de Ligier et. al., 1990).....	132
<b>Figura 3.18.</b> Mapa de pendientes del municipio Oberá.....	133
<b>Figura 3.19.</b> Hidrografía de la provincia de Misiones (Adaptado de MERNR, 2014).....	135
<b>Figura 3.20.</b> Tratamiento costero Arroyo Mártirez (EBY, 2018).....	136
<b>Figura 3.21.</b> Cuencas hídricas dentro del municipio Oberá.....	139
<b>Figura 3.22.</b> Comparación de caudales por balance hídrico y aforados en la cuenca del arroyo Yabebiry.....	140
<b>Figura 3.23.</b> Mapa de riesgo de erosión máxima para la provincia de Misiones (Adaptado de Ligier et. al., 2004).....	144
<b>Figura 3.24.</b> Erosión hídrica potencial dentro del municipio Oberá y la zona urbana (Adaptado de Ligier et. al., 2004).....	146
<b>Figura 3.25.</b> Variación temporal de la impermeabilidad en la cuenca Beltrame (Rodríguez, 2014).....	148
<b>Figura 3.26.</b> Cuenca del arroyo Mbotaby (Adaptado de Google Earth <sup>®</sup> , 2013).....	150

<b>Figura 3.27.</b> Curvas de nivel en la cuenca Mbotaby (Adaptado de CARTA, 1964).....	150
<b>Figura 3.28.</b> Complejos de suelo en la cuenca Mbotaby (Adaptado de CARTA, 1964)....	151
<b>Figura 3.29.</b> Zonificaciones en la cuenca Mbotaby al año 2013.....	152
<b>Figura 3.30.</b> Porcentaje de incidencia de cada zonificación en la cuenca Mbotaby al año 2013.....	153
<b>Figura 3.30.</b> Zonas con cordón cuneta de hormigón dentro de la cueca Mbotaby.....	153
<b>Figura 3.31. a.</b> Av. José Ingenieros (Primera edición web, 2015). <b>b.</b> Calle Mar del Plata (Misiones Líder, 2012). <b>c.</b> Zonas de riesgo detectadas (Adaptado de Google Earth <sup>®</sup> , 2013). <b>d.</b> Av. Sarmiento (OberaOnline, 2015). <b>e.</b> Av. De Las Américas (Misiones Líder, 2012).....	155
<b>Figura 4.1.</b> Esquema del modelo en bocacalle.....	161
<b>Figura 4.2.</b> Ejemplo de esquema de interacción entre las zonas permeables e impermeables en las subcuencas.....	163
<b>Figura 4.3.</b> Capacidad específica de una boca de tormenta horizontal (UDFCD, 1984; adaptado por Riccardi, 2004).....	164
<b>Figura 4.4.</b> Sección transversal de zanjas excavadas en tierra de 60cm de ancho de solera.	165
<b>Figura 4.5.</b> Sección transversal de media calle con calza de cunetas de tierra.....	165
<b>Figura 4.6.</b> Sección transversal de media calle de 15m de ancho, con cunetas de hormigón y calzadas de empedrado o pavimento flexible.....	166
<b>Figura 4.7.</b> Sección transversal de media calle de 20m de ancho, con cunetas de hormigón y calzadas de empedrado o pavimento flexible.....	166
<b>Figura 4.8.</b> Sección transversal de badenes de tierra en calzada.....	166
<b>Figura 4.9.</b> Sección transversal de badenes de hormigón en calzadas de empedrado o pavimento flexible.....	167
<b>Figura 4.10.</b> Sección transversal de arroyo menor, con 1m de ancho de solera.....	167
<b>Figura 4.11.</b> Sección transversal de arroyo mayor, con 7m de ancho de solera.....	167
<b>Figura 4.12.</b> Sección transversal del punto de control.....	168
<b>Figura 4.13.</b> Perfil transversal de la sección de control y niveles máximos con registro....	170
<b>Figura 4.14.</b> Curva de relación altura-caudal en la salida de la cuenca.....	172
<b>Figura 4.15.</b> Esquema de conceptualización del modelo.....	173
<b>Figura 4.16.a.</b> Sección de control utilizada para la calibración. <b>b.</b> Regla limnimétrica instalada para el registro de niveles.....	174
<b>Figura 4.17.a.</b> Hietograma y curva masa 6-ago-2013. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 6-ago-2013 .....	176
<b>Figura 4.18.a.</b> Hietograma y curva masa 23 al 26-ago-2013. <b>b.</b> Limnigramas registrado y	

modelado 23 al 26-ago-2013.....	176
<b>Figura 4.19.a.</b> Hietograma y curva masa 21-sep-2013. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 21-sep-2013.....	176
<b>Figura 4.20.a.</b> Hietograma y curva masa 21-oct-2013. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 21-oct-2013 .....	176
<b>Figura 4.21.a.</b> Hietograma y curva masa 19-nov-2013. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 19-nov-2013.....	179
<b>Figura 4.22.a.</b> Hietograma y curva masa 11-ene-2014. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 11-ene-2014.....	179
<b>Figura 4.23.a.</b> Hietograma y curva masa 20-feb-2014. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 20-feb-2014.....	180
<b>Figura 4.24.a.</b> Hietograma y curva masa 9-abr-2014. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 9-abr-2014 .....	180
<b>Figura 4.25.a.</b> Hietograma y curva masa 4-may-2014. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 4-may-2014 .....	180
<b>Figura 4.26.a.</b> Hietograma y curva masa 19-jul-2014. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 19-jul-2014 .....	181
<b>Figura 4.27.a.</b> Hietograma y curva masa 6-oct-2014. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 6-oct-2014 .....	181
<b>Figura 4.28.a.</b> Hietograma y curva masa 31-oct-2014. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 31-oct-2014 .....	181
<b>Figura 4.29.a.</b> Hietograma y curva masa 30-nov-2014. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 30-nov-2014.....	182
<b>Figura 4.30.a.</b> Hietograma y curva masa 01-ene-2015. <b>b.</b> Limnigramas registrado y modelado 01-ene-2015.....	182
<b>Figura 4.31.a.</b> Hietograma y curva masa 10-nov-2015. <b>b.</b> Limnigramas modelado 10-nov-2015.....	183
<b>Figura 4.32.</b> Puntos de control de niveles máximos durante la tormenta del 10-nov-2015..	184
<b>Figura 4.33.</b> Hidrograma registrado y modelado 19-nov-2013.....	186
<b>Figura 4.34.</b> Hidrograma registrado y modelado 11-ene-2014.....	186
<b>Figura 4.35.</b> Hidrograma registrado y modelado 20-feb-2014.....	186
<b>Figura 4.36.</b> Hidrograma registrado y modelado 9-abr-2014.....	186
<b>Figura 4.37.</b> Hidrograma registrado y modelado 4-may-2014.....	187
<b>Figura 4.38.</b> Hidrograma registrado y modelado 19-jul-2014.....	187

---

<b>Figura 4.39.</b> Hidrograma registrado y modelado 6-oct-2014.....	187
<b>Figura 4.40.</b> Hidrograma registrado y modelado 31-oct-2014.....	187
<b>Figura 4.41.</b> Hidrograma registrado y modelado 30-nov-2014.....	187
<b>Figura 4.42.</b> Hidrograma registrado y modelado 01-ene-2015.....	187
<b>Figura 4.43.a.</b> Muestras de agua recogidas durante la tormenta del 19-nov-2013. <b>b.</b> Submuestra de agua en balanza de precisión. <b>c.</b> Submuestra ya secada.....	189
<b>Figura 4.44.</b> TSD y caudales observados 19-nov-2013.....	195
<b>Figura 4.45.</b> TSD y caudales observados 11-ene-2014.....	195
<b>Figura 4.46.</b> TSD y caudales observados 20-feb-2014.....	195
<b>Figura 4.47.</b> TSD y caudales observados 9-abr-2014.....	195
<b>Figura 4.48.</b> TSD y caudales observados 4-may-2014.....	195
<b>Figura 4.49.</b> TSD y caudales observados 19-jul-2014.....	195
<b>Figura 4.50.</b> TSD y caudales observados 6-oct-2014.....	196
<b>Figura 4.51.</b> TSD y caudales observados 31-oct-2014.....	196
<b>Figura 4.52.</b> TSD y caudales observados 30-nov-2014.....	196
<b>Figura 4.53.</b> TSD y caudales observados 1-ene-2015.....	196
<b>Figura 4.54.</b> Relación precipitación en exceso vs producción total de sedimentos. <b>a.</b> Para eventos de 5 a 44 mm de lluvia neta. <b>b.</b> Para eventos de 5 a 126 mm de lluvia neta.....	198
<b>Figura 4.55.</b> TSD observados y modelados 19-nov-2013.....	201
<b>Figura 4.56.</b> TSD observados y modelados 11-ene-2014.....	201
<b>Figura 4.57.</b> TSD observados y modelados 20-feb-2014.....	201
<b>Figura 4.58.</b> TSD observados y modelados 9-abr-2014.....	201
<b>Figura 4.59.</b> TSD observados y modelados 4-may-2014.....	201
<b>Figura 4.60.</b> TSD observados y modelados 19-jul-2014.....	201
<b>Figura 4.61.</b> TSD observados y modelados 6-nov-2014.....	202
<b>Figura 4.62.</b> TSD observados y modelados 31-oct-2014.....	202
<b>Figura 4.63.</b> TSD observados y modelados 30-nov-2014.....	202
<b>Figura 4.64.</b> TSD observados y modelados 1-ene-2015.....	202
<b>Figura 5.1.</b> Elementos evaluados para selección de tormenta crítica.....	207
<b>Figura 5.2.a.</b> Hietogramas de diseño para la determinación de la tormenta crítica de 2 a 12h de duración y 2 años de recurrencia. <b>b.</b> Caudales máximos vs duración de la tormenta en la salida de la cuenca y la calle Salta para 2 años de recurrencia en función a la duración de la tormenta.....	207
<b>Figura 5.3.a.</b> Hietograma y curva masa de la tormenta de diseño para 2 años de recurrencia.....	

b. Para 5 años de recurrencia. c. Para 2 años de recurrencia.....	209
<b>Figura 5.4.</b> Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.....	214
<b>Figura 5.5.</b> Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia.....	214
<b>Figura 5.6.</b> Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia.....	215
<b>Figura 5.7.</b> Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 2 años de recurrencia.....	215
<b>Figura 5.8.</b> Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 5 años de recurrencia.....	216
<b>Figura 5.9.</b> Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.....	216
<b>Figura 5.10.</b> Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.....	217
<b>Figura 5.11.</b> Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia.....	218
<b>Figura 5.12.</b> Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia.....	218
<b>Figura 5.13.</b> Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 2 años de recurrencia.....	219
<b>Figura 5.14.</b> Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 5 años de recurrencia.....	219
<b>Figura 5.15.</b> Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.....	220
<b>Figura 5.16.</b> Zonas de mayor amenaza por inundación en calles.....	223
<b>Figura 5.17.</b> Matriz para definir los niveles de amenaza en cauces.....	224
<b>Figura 5.18.</b> Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.....	225
<b>Figura 5.19.</b> Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia.....	225
<b>Figura 5.20.</b> Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia.....	226
<b>Figura 5.21.</b> Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario futuro	

y 2 años de recurrencia.....	226
<b>Figura 5.22.</b> Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 5 años de recurrencia.....	227
<b>Figura 5.23.</b> Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.....	227
<b>Figura 5.24.</b> TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.....	228
<b>Figura 5.25.</b> TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia. ....	229
<b>Figura 5.26.</b> TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia. ....	229
<b>Figura 5.27.</b> TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario futuro y 2 años de recurrencia. ....	230
<b>Figura 5.28.</b> TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario futuro y 5 años de recurrencia. ....	230
<b>Figura 5.29.</b> TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.....	231
<b>Figura 5.30.</b> Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.....	233
<b>Figura 5.31.</b> Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia.....	234
<b>Figura 5.32.</b> Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia.....	234
<b>Figura 5.33.</b> Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 2 años de recurrencia.....	235
<b>Figura 5.34.</b> Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 5 años de recurrencia.....	235
<b>Figura 5.35.</b> Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.....	236
<b>Figura 5.36.</b> Polutograma en la salida de la cuenca para 2 años de recurrencia, distintas humedades y escenarios.....	237
<b>Figura 5.37.</b> Polutograma en la salida de la cuenca para 5 años de recurrencia, distintas humedades y escenarios.....	238

**Figura 5.38.** Polutograma en la salida de la cuenca para 100 años de recurrencia, distintas humedades y escenarios .....238 -



## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Criterios para establecer la amenaza por inundación de calles (Adaptado de Gómez Valentín, 2015).....	41
<b>Tabla 2.2.</b> relación entre intensidad de tormenta y erosión producida en Zanesville, Ohio (Adaptado de Fourier, 1972).....	45
<b>Tabla 2.3.</b> Factor C para cultivos anuales según el tipo de cultivo, crecimiento vegetativo y cobertura (Wischmeier y Smith, 1978).....	62
<b>Tabla 2.4.</b> Factor C para áreas boscosas inalteradas según cobertura y condiciones del suelo (Wischmeier y Smith, 1978).....	63
<b>Tabla 2.5.</b> Factor C para áreas boscosas quemadas según cobertura y condiciones del suelo (Wischmeier y Smith, 1978).....	63
<b>Tabla 2.6.</b> Factor P cultivos en terrazas y curvas de nivel (Wischmeier y Smith, 1978).....	64
<b>Tabla 2.7.</b> Velocidades admisibles de referencia para distintos suelos (BOGDEO, citado por Pouey, 1998).....	70
<b>Tabla 2.8.</b> Modelos de acumulación lineal adoptados por longitud de cuneta (Mendez, 2012).....	72
<b>Tabla 2.9.</b> Modelos de acumulación exponencial adoptados por unidad de área en calles (Mendez, 2012).....	73
<b>Tabla 2.10.</b> Valores de R para la provincia de Misiones (Gvozdzenovich et al., 2015).....	90
<b>Tabla 2.11.</b> Factor de erosividad K según la textura y cantidad de materia orgánica del suelo (Kirkby y Morgan, 1980).....	91
<b>Tabla 2.12.</b> Valores adoptados de los parámetros del modelo transformación lluvia-caudal en Resistencia (Mendez, 2012).....	92
<b>Tabla 2.13.</b> Valores adoptados de los parámetros del modelo acumulación de sedimentos en cunetas de calle en Resistencia (Mendez, 2012).....	93
<b>Tabla 2.14.</b> Valores adoptados de los parámetros del modelo producción tipo relación de caudales en Resistencia (Mendez, 2012).....	93
<b>Tabla 2.15.</b> Clasificación de las diferentes tipologías de BMPs. (Rodríguez Bayon et al., 2005) .....	100
<b>Tabla 2.16.</b> Selección del periodo de retorno según el objetivo de diseño (Adaptado de Perales Momparler y Andrés-Doménech, 2015).....	101
<b>Tabla 3.1.</b> Estaciones meteorológicas utilizadas en la caracterización climática de Oberá..	106

<b>Tabla 3.2.</b> Estaciones meteorológicas SSRH en Misiones y alrededores.....	107
<b>Tabla 3.3.</b> Constantes de las curvas i-d-f Cerro Azul (1966-1984) (Litwin y Franco, 1987).....	109
<b>Tabla 3.4.</b> Precipitaciones máximas por intervalos de tiempo de la tormenta de 1-dic-12 (FIO, 2013).....	111
<b>Tabla 3.5.</b> Evapotranspiración potencial de Thorthwaite para la zona de estudio [mm]...113	
<b>Tabla 3.6.</b> Balance hídrico de Thorntwaite para la zona de estudio [mm].....	114
<b>Tabla 3.7.</b> Porcentajes de complejos de suelos dentro del municipio y la zona urbana...126	
<b>Tabla 3.8.</b> Porcentajes de regiones naturales dentro del municipio y la zona urbana.....	132
<b>Tabla 3.9.</b> Porcentajes de áreas y pendientes del municipio Oberá.....	134
<b>Tabla 3.10.</b> Áreas de aporte de las cuencas dentro del municipio y la zona urbana.....	139
<b>Tabla 3.11.</b> Caudales medios mensuales aforados en el Arroyo Yabebiry en Mártires (Litwin y Franco, 1987).....	140
<b>Tabla 3.12.</b> Caudales máximos para distintas recurrencias en el arroyo Yabebiry (Litwin y Franco, 1978).....	141
<b>Tabla 3.13.</b> Porcentajes zonas de erosión hídrica potencial dentro del municipio y la zona urbana .....	146
<b>Tabla 3.14.</b> Evolución histórica de la población en Misiones y Oberá (INDEC, 2014)...147	
<b>Tabla 3.15.</b> Resumen de las características fisiográficas de los escenario analizados en la cuenca Beltrame.....	148
<b>Tabla 4.1.</b> Valores recomendados de parámetros de ajuste (Adaptado de Moriasi et al., 2007).....	160
<b>Tabla 4.2.</b> Curva de relación altura-caudal en la salida de la cuenca.....	171
<b>Tabla 4.3.</b> Tormentas utilizadas para la calibración inicial del modelo.....	175
<b>Tabla 4.3.</b> Resumen de las corridas para los 4 eventos de la calibración inicial.....	177
<b>Tabla 4.4.</b> Tormentas utilizadas para la calibración del modelo.....	178
<b>Tabla 4.5.</b> Resumen de las corridas para los 10 eventos.....	182
<b>Tabla 4.6.</b> Comparación de niveles máximos registrado y modelados 10-nov-2015.....	184
<b>Tabla 4.7.</b> Zonificación, área impermeable y CN ajustados.....	185
<b>Tabla 4.8.</b> Volúmenes de almacenamiento superficial ajustados [mm].....	185
<b>Tabla 4.9.</b> Coeficiente de Manning utilizados en las distintas superficies de escurrimiento	185
<b>Tabla 4.10.</b> Bondad de ajuste por caudales.....	187
<b>Tabla 4.11</b> Ejemplo de cálculo TSD. Muestra N°1 del 19-nov-2013.....	189
<b>Tabla 4.12.</b> Valores <i>R</i> para Oberá según los distintos autores analizados.....	190

<b>Tabla 4.13.</b> Factores $C$ , $P$ , $l$ y $L$ para los distintos usos del suelo y toda la cuenca.....	192
<b>Tabla 4.14.</b> Producción máxima de sedimentos por usos de suelo en la cuenca Mbotaby..	192
<b>Tabla 4.15.</b> Relaciones de erogación de sedimentos por autores y descargas específicas resultantes.....	193
<b>Tabla 4.16.</b> Resumen las modelaciones hidrosedimentológicas para los 10 eventos analizados.....	197
<b>Tabla 4.17.</b> Días previos sin lluvia en los eventos modelados.....	199
<b>Tabla 4.18.</b> Coeficiente $C_{10}$ adaptados para los distintos usos del suelo.....	200
<b>Tabla 4.19.</b> Resumen de las corridas utilizados para la calibración del modelo de calidad de agua del SWMM.....	203
<b>Tabla 4.20.</b> Resultados del análisis de sensibilidad del modelo de producción de sedimentos del SWMM.....	204
<b>Tabla 5.1.</b> Caudales y tirantes máximos alcanzados en la calle Salta y punto de control de la cuenca para distintas duraciones de tormenta y 2 años de recurrencia.....	208
<b>Tabla 5.2.</b> Zonificación, área impermeable y CN para el escenario actual y el hipotético futuro.....	211
<b>Tabla 5.3.</b> Síntesis de resultados obtenidos para humedad antecedente III, distintos escenarios y recurrencias.....	212
<b>Tabla 5.4.</b> Porcentajes de niveles máximos en cunetas para humedad III, distintos escenarios y recurrencias.....	216
<b>Tabla 5.5.</b> Porcentajes de velocidades máximas en cunetas para humedad III, distintos escenarios y recurrencias.....	220
<b>Tabla 5.6.</b> Resumen de niveles y velocidades máximas en las zonas más afectadas para el escenario actual.....	223
<b>Tabla 5.7.</b> Resumen de niveles y velocidades máximas en las zonas más afectadas para el escenario futuro.....	223
<b>Tabla 5.8.</b> Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, distintas recurrencias y escenarios.....	227
<b>Tabla 5.9.</b> Producción media de sedimentos por zonas para humedad III, distintas recurrencias y escenarios según SWMM [T/ha].....	231
<b>Tabla 5.10.</b> Producción media de sedimentos por zonas para humedad III, distintas recurrencias y escenarios según MUSLE [T/ha].....	232
<b>Tabla 5.11.</b> Tensión de corte máxima en cauces naturales para distintas recurrencias y escenarios.....	236

---

---

<b>Figura 5.12.</b> Total de sedimentos [T] erogados para distintas recurrencias, humedades y escenarios determinados por el SWMM.....	239
<b>Figura 5.13.</b> Total de sedimentos [T] erogados para distintas recurrencias, humedades y escenarios determinados por la MUSLE.....	239
<b>Tabla 5.14.</b> Comparación MUSLE-SWMM de producción total de sedimentos por eventos de diseño para distintas recurrencias y humedades del escenario actual.....	240
<b>Tabla 5.15.</b> Comparación MUSLE-SWMM de producción total de sedimentos por eventos de diseño para distintas recurrencias y humedades del escenario futuro.....	240

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Fundamentos del tema de tesis

La problemática generada por los excedentes superficiales urbanos afecta directa o indirectamente la vida y las actividades de gran cantidad de personas que habitan diversas zonas urbanas en diversas y diferentes ciudades del mundo.

Cuando en la morfología del terreno predominan fuertes pendientes (media mayor a 5%), el clima es húmedo con abundante precipitaciones (módulo cercano a 2000mm) y los suelos (limo-arcillosos) son susceptibles de ser erosionados, la problemática se extiende hacia los procesos de erosión.

En ambientes urbanos, durante mucho tiempo, la solución del control de los excedentes hídricos superficiales se ha encarado a través de la ejecución de obras de drenaje, para remover el agua pluvial del área urbana de la forma más eficiente posible. La experiencia indica que las soluciones más convenientes se alcanzan a partir de una comprensión más integrada de los procesos asociados al escurrimiento de los excedentes hídricos.

A partir de la década del 70', en los países desarrollados se fue extendiendo el concepto del manejo del agua pluvial urbana, como la percepción de un conjunto planificado de medidas estructurales y no estructurales destinadas a administrar el agua pluvial de una manera integral, racional y sustentable. Bajo este concepto, el drenaje es concebido como un subconjunto del manejo e interrelacionado con otros propósitos, tales como la regulación de crecidas, el mejoramiento de la calidad de agua pluvial, el control de la erosión, la creación o conservación de espacios abiertos para recreación y otros usos.

Este nuevo enfoque de los sistemas de desagües pluviales ha producido cambios en las prácticas de la ingeniería respecto de los años anteriores. Las nuevas técnicas de control de la escorrentía a nivel mundial son las denominadas "Prácticas de Mejor Manejo o Best Management Practices (BMP)". Muchas de estas técnicas se basan en la desaceleración y reducción del escurrimiento mediante sistemas de almacenamiento y/o infiltración, estructuras de control de erosión, etc.

La descripción de la generación, traslado y disposición de sólidos en ambientes urbanos presenta un alto grado de complejidad dada la gran cantidad de fuentes y materiales susceptibles de ser incorporados a la corriente hídrica. Además de los suelos erosionados por flujo mantiforme en las áreas permeables y el flujo concentrado en los cursos de agua, se suman los sedimentos generados por las actividades humanas, depositados en superficies impermeables como calles, veredas, techos y solados de edificios.

En zonas como la de estudio, además de las afectaciones negativas sobre el medioambiente por procesos de erosión, los suelos finos son susceptibles a la absorción, traslado y acumulación de contaminantes, pudiendo provocar impactos negativos crónicos en los cuerpos de agua receptes del desagüe pluvial y el ambiente en general.

Para la aplicación de técnicas de predicción de procesos de erosión, es necesaria la descripción de los procesos hidrológicos involucrados en la generación del escurrimiento superficial como así también las variables de flujo, tales como niveles, velocidades y caudales en cada elemento del sistema de desagüe pluvial.

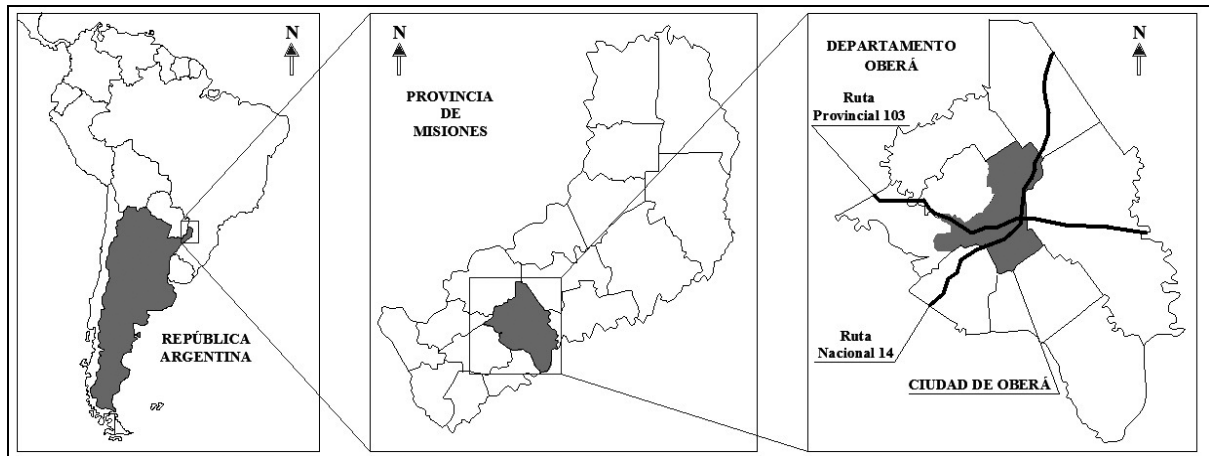
Si bien se han encontrado estudios científicos sobre el comportamiento de las cuencas hidrológicas en Misiones, ninguno de ellos ha avanzado en la descripción de la dinámica de los excedentes hídricos superficiales en cuencas urbanas y los procesos de erosión asociados a la misma.

El presente trabajo se focaliza en la descripción de las variables del flujo del escurrimiento pluvial urbano mediante modelación hidrológica-hidráulica durante eventos lluviosos, con la finalidad de mitigar los procesos de erosión en la región misionera de Oberá, caracterizada por una topografía serrana de altas pendientes, con suelo finos del tipo limo-arcillosos y clima subtropical húmedo donde se desarrollan precipitaciones intensas.

## **1.2. La ciudad de Oberá como zona de estudio**

La ciudad de Oberá, cabecera del departamento homónimo, se sitúa en la zona centro de la provincia de Misiones, en la intersección de la Ruta Nacional N° 14 y la Provincial N° 103, a 27°29' de latitud Sur y 55°08' de longitud Oeste (Figura 1.1). El municipio posee una extensión territorial de 154.5km<sup>2</sup>, con una huella urbana estimada al año 2017 en 41.9km<sup>2</sup> (4194ha), posicionándose como la segunda ciudad en importancia de la provincia y constituyendo un importante centro comercial para las colonias vecinas productoras de yerba mate, té y otros productos agrícola-ganaderos.

Ubicada sobre la cúspide de la sierra Central de Misiones, en la zona de parte aguas de las cuencas de los ríos Paraná y Uruguay, Oberá se ve atravesada por arroyos que nacen dentro del ejido urbano, presentando pequeñas áreas de aporte. Sin embargo, las características climáticas y topográficas de la región son propicias para la generación de importantes volúmenes de escurrimiento superficial, produciendo elevados caudales y velocidades en los cauces.



*Figura 1.1. Ubicación geográfica de Oberá.*

Caracterizado como una región subtropical sin estación seca (Olinuk, 1998), posee una distribución de precipitaciones a lo largo de todo el año, con un módulo pluviométrico de 1925mm (CELO, 2013). También está sujeta a tormentas intensas con significativos volúmenes precipitados en cortos lapsos tiempo (Olinuk, 1998).

La topografía serrana de la región, favorece la formación de numerosos cursos de agua y una densa red de drenaje, concentrando rápidamente los excedentes superficiales y reduciendo las zonas de anegamiento. Característico de cuencas serranas de cabecera, durante los eventos pluviográficos, en las calles y arroyos de la ciudad se observan tirante bajos, pero que logran alcanzar altas velocidades.

La caracterización edafológica y el complejo suelo-cobertura vegetal originaria en la región, favorecen las pérdidas al escurrimiento por abstracciones iniciales, determinados por el tupido follaje de la selva Paranaense, las pérdidas por infiltración en las arcillas con volúmenes de vacíos superiores a la media reportada en la bibliografía especializada (Reinert, 2007) y considerables cantidades de materia orgánica, sobre y dentro del perfil estratigráfico.

Respecto al crecimiento poblacional del municipio, los sucesivos censos poblacionales han mostrado marcado crecimiento de la población así como una tendencia a la concentración

---

urbana tanto en la provincia como en el departamento y el municipio. Según el censo de 2011, Oberá cuenta con una población de 66112 habitantes, de los cuales 97% es urbana.

La creciente impermeabilización de los suelos por el avance de la urbanización sobre la selva, comienza a afectar de manera significativa la respuesta hidrológica de los sistemas naturales de desagüe de aguas de lluvia y con cada vez menores superficies permeables, los volúmenes de excedentes hídricos superficiales son cada vez mayores, generando importantes caudales picos y elevadas velocidades que afectan la geomorfología de los cursos de agua receptores del desagüe pluvial.

Además, los desbordes de los arroyos son más frecuentes y las calles de la ciudad comienzan a reflejar los impactos por urbanización de las subcuencas, con mayores puntos de anegamiento con mayor asiduidad.

Con menos de 90 años desde su fundación, Oberá se presenta como una ciudad joven que cuenta con la posibilidad de continuar creciendo y por ende, aumentar la impermeabilidad, acrecentando la amenaza de inundación y los procesos de erosión, lo cual se manifiesta más aún sin la implementación de un plan director de manejo de los desagües pluviales, tal como sucede en este momento.

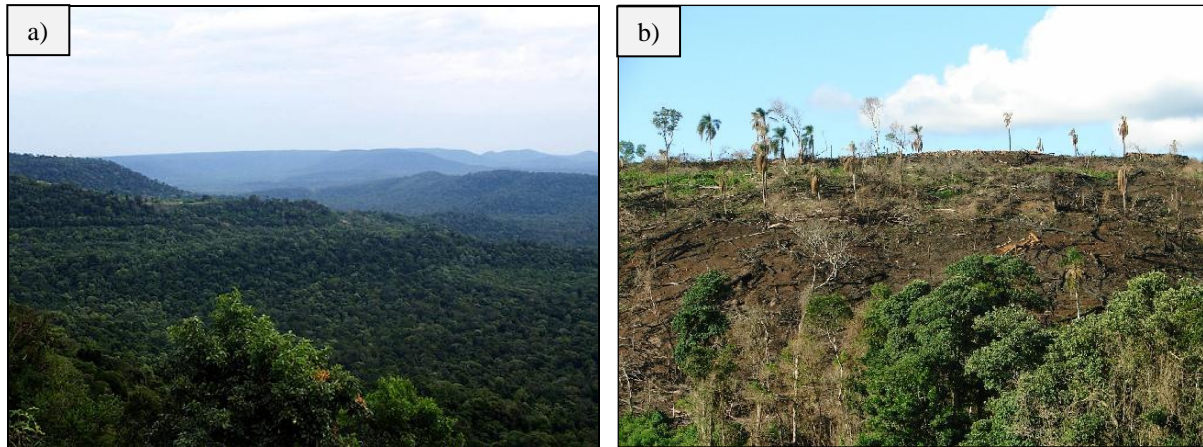
### **1.3. Problemáticas hidrosedimentológicas detectadas**

Las características del suelo y las grandes extensiones de vegetación de densidad media que conserva la región, poseen la capacidad de almacenar el agua de lluvia, por lo hay escasos registros de sequías prolongadas que pudieron haber afectado las reservas de agua tanto para consumo como para uso agro-industrial. Además esta vegetación contribuye a minimizar el escurrimiento de las lluvias de varios días de duración que suelen afectar a la zona.

Sin embargo en los últimos años se acentuó el cambio de las condiciones hidroambientales de la región, presentándose periodos de sequías más prolongadas y precipitaciones más intensas, lo cual sumado a la impermeabilización de los suelos y reemplazo de la selva paranaense por cultivos (Figura 1.2.a y b) genera un aumento de caudales en el sistema de drenaje urbano y en los cauces receptores periféricos.

En lo que concierne al suelo de la zona, se encuentra la característica tierra colorada que es una arcilla-limosa de plasticidad media, como así también grandes extensiones de arcillas grises en territorios de zonas bajas. La evidencia muestra que estos suelos son fácilmente

erosionables con los excedentes generados en las lluvias, si se encuentran medianamente desprotegidos, como puede observarse a largo de todo el territorio de la región.



*Figura 1.2.a. Monte Nativo; b. Desmonte para forestación.*

El sistema de drenaje pluvial urbano existente tiene una escasa planificación y fue conformándose mediante la ampliación y optimización hidráulica del sistema de desagüe natural. Estas acciones propagaron los efectos perturbadores hacia aguas abajo, especialmente en los cursos receptores, traduciéndose en aumento de caudal máximo y de procesos erosivos.

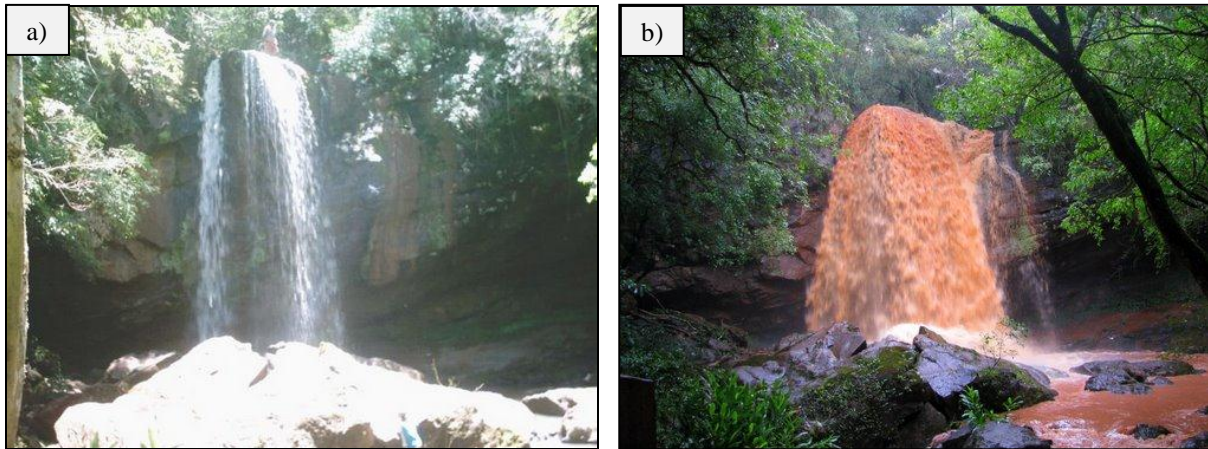
Respecto a los procesos de erosión, la situación más común en áreas urbanas puede observarse en los cursos naturales erosionados debido a la canalización del desagüe natural que los antecede (Figura 1.3.a). El aumento de las velocidades del flujo lleva al curso receptor a un desequilibrio de su sección, provocando la erosión de lecho y márgenes, así como la generación de ollas al pie de las obras de canalización (Figura 1.3.b).



*Figura 1.3.a. Cauce natural erosionado. b. Ollas al pie de obras de canalización.*

En las zonas rurales históricamente protegidas por las diversas variedades de vegetación de la selva misionera, hoy se evidencian marcados procesos erosivos en las cuencas debido a la desprotección del suelo generada para optimizar el crecimiento de los cultivos. Durante las

precipitación es común observar en los cauces altos contenidos de suelo transportado disuelto en el flujo. Dicho material está compuesto en su mayoría por arcillas muy finas con origen en la cuenca por erosión superficial, denominado también material de lavado (Figuras 1.4.a y b).



*Figura 1.4.a. Escurrimiento de flujo base.*

*b. Material de lavado disuelto durante una tormenta en el mismo salto.*

Además de presentarse este mecanismo de erosión en cursos de agua de zonas rurales, el mismo se visualiza también en arroyos urbanos, donde los suelos de las superficies permeables desprotegidas de vegetación, como calles terradas y lotes con obras en construcción, son erosionados e incorporados al flujo de excedentes hídricos.

Entre los antecedentes de inundación más cercanos en el tiempo y de mayor severidad en la provincia, es citable la tormenta del 1 de enero de 2015, donde un frente de tormenta azotó parte de la provincia de Misiones, provocando un total de cinco personas fallecidas en su territorio, todas por causa de las inundaciones y desbordes de los arroyos sobre los cuales están asentadas las ciudades. Además de arrasar algunas viviendas, la escorrentía provocó que numerosas calles y rutas debieran restringir la circulación vehicular por riesgo de colapso ante procesos de erosión.

Puntualmente, el desborde del arroyo Mbotaby, en Oberá, se cobró la vida de un hombre arrastrado más de 3000m por la corriente de agua (Territorio digital, 2015). Durante dicha jornada, precipitaron 202mm, con 150mm caídos en 5h; situación agravada por encontrarse el suelo saturado de humedad, luego de 2 días previos con precipitaciones, aumentando así los excedentes hídricos.

Respecto al evento pluviográfico de mayor intensidad del que se tenga registros en la ciudad, el 1 de diciembre de 2012 precipitaron 276 mm en menos de 12h, con 70mm precipitados en 20min. Dicho evento provocó daños parciales en vehículos y diversas viviendas, con 300 evacuados y 500 afectados, cifra sin precedentes para la ciudad (Territorio digital, 2012).

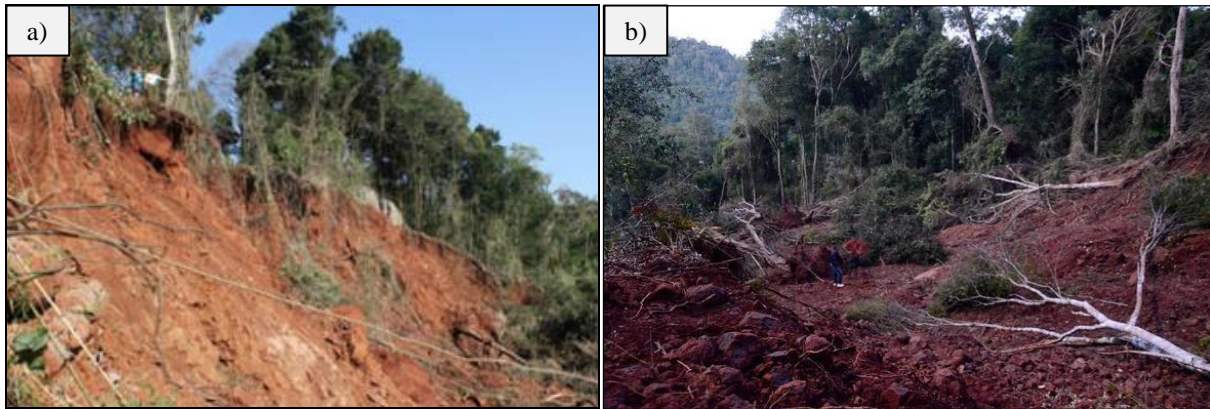
Informes periodísticos con imágenes como las observadas en las Figura 1.5.a, b, c y d, son frecuentes ante cada frente de tormenta que atraviesa la provincia. Cada vez más ciudades y con mayor asiduidad, sufren el desborde de los arroyos sobre los cuales está asentado el ejido urbano.



**Figura 1.5.a.** Inundación en Oberá, 10-nov-15 (OberáOnline, 2015). **b.** Inundación en Posadas, 19-dic-12 (Territorio Digital, 2012). **c.** Inundación en Cmte. Andresito, 3-may-14 (Red de medios del Mercosur, 2014). **d.** Inundación en Montecarlo, 02-ene-14 (Misione Lider, 2014).

Otra de las problemáticas por erosión de suelos en zonas de elevada pendiente, es la generación de deslizamientos de tierras durante eventos pluviométricos severos o prolongados. Recientemente en Misiones se registraron diversos eventos de similares características.

El día 26 de junio de 2011 se produjo un deslizamiento de tierra a las afueras de Colonia Aurora, a 60km de Oberá, donde un ancho de 200 metros se deslizó 15 metros (Figura 1.6.a), arrastrando toda la vegetación arraigada en la ladera (Territorio digital, 2011). Mientras que el 17 de abril de 2014, en las afueras de Aristóbulo del Valle, en momentos en que se desataba una intensa precipitación, se produjo un deslizamiento de tierra que alcanzó 50m de ancho y 300m de longitud (Figura 1.6.b), derribando la selva sobre la ladera de la sierra (Territorio digital, 2014). Al igual que Oberá, Aristóbulo del Valle se ubica sobre la cúspide de la Sierra Central de Misiones.



**Figura 1.6.a.** Deslizamiento de tierra en Colonia Aurora, Misiones, 26-jun- 2011 (Territorio digital, 2011).  
**b.** Deslizamiento de tierra en Aristóbulo de Valle, Misiones, 17-abr-2014 (Territorio digital, 2014).

## 1.4. Hipótesis y Objetivos

Como hipótesis del presente trabajo de investigación se plantea que: "La producción de sedimentos en las cuencas urbanas de la región misionera está fuertemente condicionada por las características climáticas, topográficas y edafológicas pudiendo ser descrita aceptablemente por un modelo conceptual que integra un modelo hidrodinámico de simulación de escurrimiento superficial con base física y parámetros distribuidos y metodologías simplificadas de estimación de producción y transporte de sedimentos".

El objetivo general de esta tesis es la descripción de la dinámica de los excedentes hídricos superficiales y sus implicancias en la generación de procesos de erosión en el ambiente urbano de la ciudad de Oberá, en la región central de la provincia de Misiones, caracterizado por abundantes e intensas lluvias (media anual cercana a los 2000mm), elevadas pendientes topográficas (media de 5.5%) y suelos limo-arcillosos, susceptibles de ser erosionados por la elevada velocidad que alcanza el escurrimiento superficial.

Los objetivos específicos comprenden:

- Profundizar el conocimiento de los procesos y mecanismos dominantes en la generación y movimiento del escurrimiento superficial en ambientes urbanos con fuertes pendientes topográficas y elevadas precipitaciones;
- Generar la descripción hidrodinámica necesaria en términos de velocidad media de flujo, nivel de agua y caudales, para la descripción de procesos de erosión a nivel de cuenca, en cursos del sistema de drenaje urbano, en cuerpos receptores y la localización de obras de ingeniería;

- Desarrollar herramientas tecnológicas capaces de predecir alteraciones en la dinámica hídrica superficial y sus implicancias en los procesos erosivos frente a acciones antrópicas originadas a partir del planteo de escenarios futuros de desarrollos urbanos y cambios en el uso y ocupación del suelo;
- Cuantificar mediante mediciones de campo la producción de caudales líquidos y sólidos en la cuenca en las condiciones actuales de uso y ocupación del suelo ante distintas tormentas;
- Aportar a la planificación del control de los excedentes hídricos mediante medidas estructurales y no estructurales y aportar al ordenamiento territorial en la zona de estudio;
- Desarrollar una metodología de abordaje que pueda ser extrapolada a otras cuencas rurales-urbanas con problemáticas similares;
- Promover la inserción de la investigación científica y tecnológica en la solución de problemáticas regionales concretas en orden a mejorar la calidad de vida de la población.

## **1.5. Estructura de la tesis**

La presentación escrita de esta tesis fue dividida en 6 capítulos y 3 anexos para dar al lector mayor facilidad en la búsqueda de información y comprensión del trabajo.

En el Capítulo 1 se exhibe, a modo introductorio, los fundamentos del tema de tesis, la presentación de la ciudad de Oberá como zona de estudio y una descripción de las problemáticas hidrosedimentológicas detectadas. Posteriormente se enumeran los objetivos del trabajo y una descripción de la estructura de la presentación de la tesis.

En el Capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica sobre las particularidades de los procesos hidro-sedimentológicos en cuencas urbanas serranas de clima subtropical húmedo. Se reseña el estado del arte tanto de los modelos hidrológico-hidráulicos disponibles como así también de los modelos sedimentológicos. La descripción del software utilizado y las rutinas empleadas, como así también las ecuaciones fundamentales que describen los procesos hidrológicos, hidráulicos, de producción y transporte de sedimentos. Finalmente se describen las nuevas tendencias sobre el manejo de los desagües pluviales urbanos

En el Capítulo 3 se efectúa la caracterización hidrogeológica del área de estudio, comenzando desde un enfoque general regional, hasta llegar a la caracterización de la cuenca Mbotby, objeto de este estudio. Caracterizaciones tales como climatológica, geológica, edafológica demográfica, hidrológica, como así también la cobertura y calidad de las redes de infraestructura y una breve descripción de la modalidad de gestión de los desagües pluviales dentro de la cuenca.

En el Capítulo 4 se exhibe la conceptualización, calibración y validación, tanto del modelo hidrológico-hidráulico utilizado, como así también de los modelos de producción y transporte de sedimentos empleados para representar los procesos hidrosedimentológicos dentro de la cuenca. Se detalla la metodología utilizada para la calibración-validación y se especifican los parámetros resultantes de la misma.

En el Capítulo 5 se muestra la explotación de los modelos calibrados mediante la elaboración de mapas de: (i) niveles y velocidades máximas en calles, (ii) amenaza de inundación en cauces, (iii) tensión de corte máximas en cauces y (iv) producción máxima de sedimentos por erosión superficial; como así también un balance del total de sólidos erogados por la cuenca ante distintas humedades antecedentes. Cada uno de ellos para eventos de diseño con 2, 5 y 100 años de recurrencia, tanto para el escenario actual, como para un hipotético escenario futuro.

Como cierre del trabajo, en el Capítulo 6, se presentan las conclusiones obtenidas como síntesis de las actividades desarrolladas tanto para la calibración-validación de los modelos hidrológico-hidráulico y de producción de sedimento, como así también de los resultados de la explotación de los mismos. Finalmente se enuncian recomendaciones a partir de la revisión bibliográfica efectuada y para futuras investigaciones, con la finalidad de contribuir al manejo sostenible de las cuencas urbanas de la región.

## CAPÍTULO 2

# PROCESOS HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS Y DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS URBANAS

## 2.1. Procesos hidrológicos e hidráulicos en Cuencas Urbanas Serranas de Clima Subtropical Húmedo (CUSCSH)

### 2.1.1. El ciclo hidrológico en zonas urbanas

Las características hidroclimáticas tienen una consecuencia importante sobre la planificación y desarrollo de los ambientes rurales y urbanos. La fuerte tendencia de la población mundial a concentrarse en zonas urbanas, ha producido perturbaciones sobre el ciclo del agua, además de cambios climáticos transitorios y permanentes a diversas escalas que se traducen en alteraciones en los procesos naturales que afectan dichas zonas.

Por lo dicho, cobra importancia para la correcta gestión de los recursos hídricos, no solo la comprensión de las respuestas del sistema a corto plazo (tormentas), sino también a mediano y largo plazo (ciclo hidrológico), como pueden ser los procesos de contaminación y de erosión en el sistema.

Para una el análisis e interpretación de los fenómenos intervinientes en el ciclo hidrológico, resulta ventajoso realizar un abordaje del mismo desde un enfoque sistémico. Orsolini et al. (2008) hacen una representación sistémica del ciclo hidrológico, con cuatro niveles de almacenamiento tal como muestra la Figura 2.1.

#### 2.1.1.1. Balance de agua

Los estudios de balance de agua son esencialmente el punto de arranque de un análisis del sistema hidrológico en áreas urbanas (McPherson, 1973 citado por Van de Ven, 1990); representan una apreciación global del flujo de agua dentro de un sistema por los múltiples caminos posibles y otorga una importancia relativa de los distintos parámetros del ciclo (Figura 2.1).

Las cuencas naturales reciben una alteración en su ciclo hidrológico debido a la urbanización. Esta alteración se traduce en un aumento del escurrimiento superficial por exceso de precipitación, una disminución en las recargas de los acuíferos, disminución de la capacidad

de evapotranspiración real y en algunos casos, se dan aumentos puntuales de la humedad del suelo y recargas artificiales por pérdidas de las redes de infraestructura de saneamiento.

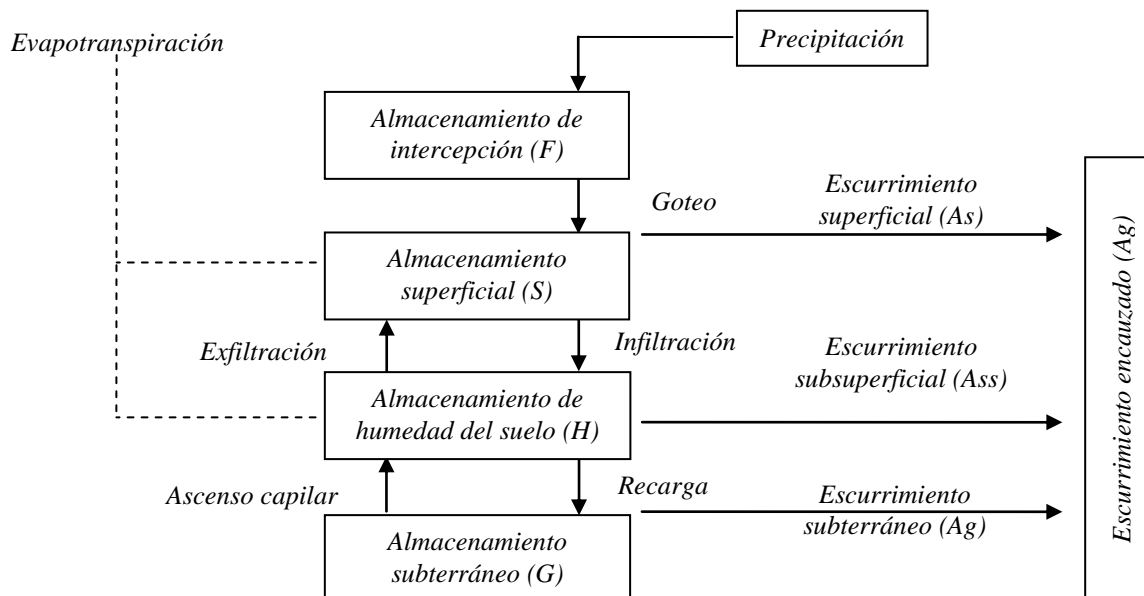


Figura 2.1. Enfoque sistémico del ciclo hidrológico (Orsolini et al., 2008).

Un ejemplo numérico es presentado por la OECD (1986), citado por Tucci et al. (1995). La Figura 2.2 representa las alteraciones típicas en el balance hidrológico anual por causa de la urbanización. Se observa como inicialmente el escurrimiento superficial representa en 10% de la precipitación y luego de la urbanización el mismo asciende al 72%.

En las urbes el acuífero recibe, además de las recarga por precipitación, un caudal de agua debido a pérdidas en la red de abastecimiento de agua potable o pérdidas por riego en zonas rurales antropizadas, según Tucci et al. (1995) las pérdidas pueden ser de 10 a 50% del volumen transportado por la red.

Paralelamente a esto, existen pérdidas en los sistemas de desagüe pluvial y cloacal que recae directamente sobre la recarga del acuífero, tanto con aporte líquido como de contaminantes. Las zonas con sistemas de desagües cloacales estáticos representan una clara afectación a la humedad del suelo, siendo absorbido totalmente sus afluentes por el mismo.

La evapotranspiración en zonas urbanizadas es un proceso más complejo, debido a que las superficies impermeables y construcciones edilicias modifican los valores de evapotranspiración potencial (fenómeno de islas de calor), pudiéndose producir mayores volúmenes de evapotranspiración real en determinadas épocas del año, siempre que existan las reservas suficientes para alcanzarlos. Reservas que se ven reducidas significativamente por el aumento de superficies impermeables y la disminución de masa arbórea.

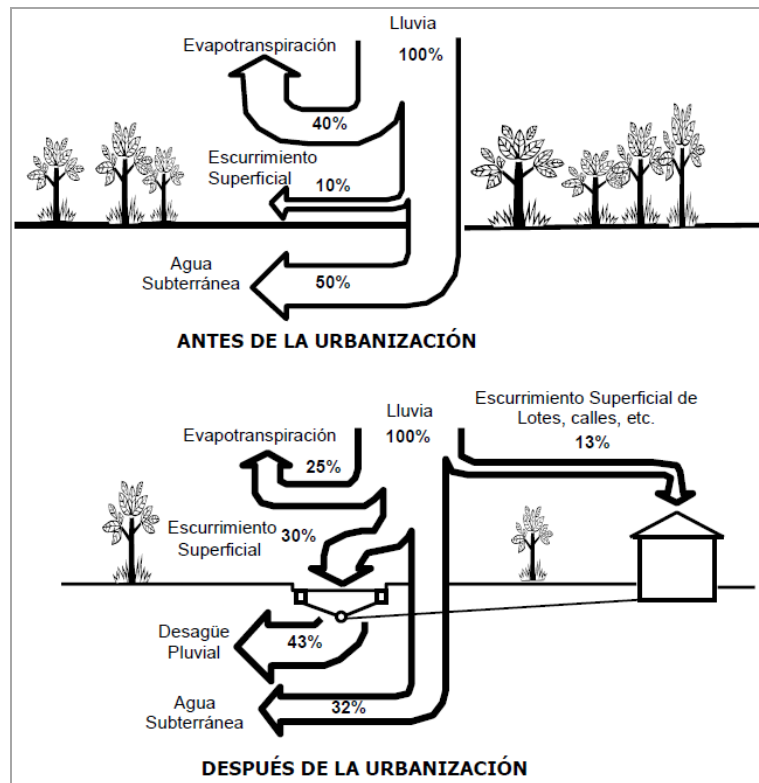


Figura 2.2. Características de la perturbación del balance hidrológico en áreas urbanas (Adaptado de AECD 1986, citado por Tucci et al., 1995).

Cabe aclarar que las valoraciones de las modificaciones de los procesos hidrológicos presentados en la Figura 2.2 son valores indicativos no absolutos de un ámbito urbano en general.

### 2.1.1.2. Análisis de las precipitaciones

Los lineamientos de todo tipo de manejo de desagües pluviales involucran costos de obra asociados a la seguridad o al riesgo. El riesgo está asociado a la posibilidad de superación de la conducción de las obras (vinculada a las precipitaciones máximas) y su vida útil.

Para la modelación hidrológica-hidráulica de estas obras se requiere conocer la cantidad total de lluvia precipitada y la distribución temporal de la misma. Dicha distribución depende de los procesos que se desea modelar. Cuando se requiere modelar procesos hidrosedimentológicos locales en pequeñas cuencas se requiere una alta resolución de la escala temporal, por lo cual se debe adoptar una modelación por evento pluviográfico. En este tipo de modelación hidrológica urbana, el intervalo de tiempo de análisis es más corto que en cuencas fluviales, utilizando generalmente intervalos de tiempo de 5 a 10 minutos o incluso menores según el tamaño de la cuenca (Gómez Valentin, 2006; citado por Zambrano Najera, 2015).

---

Las tormentas de diseño son eventos pluviales que constituyen la entrada al sistema hidrológico-hidráulico urbano, que al ser replicadas por modelos de transformación lluvia-caudal, forjan la respuesta del sistema, caracterizada por los parámetros de flujo en todos los componentes del mismo.

Las tormentas de diseño pueden ser generadas a partir de información histórica local o utilizando características generales de las precipitaciones en zonas vecinas.

Dado que puede ser admitido que el período de retorno medio de una precipitación es considerado similar al del hidrograma que ella genera, la tormenta de diseño de proyecto y su período de retorno definirán el riesgo de la obra.

En todo estudio de drenaje urbano, debe establecerse la calidad de los datos de lluvia que están siendo utilizados, dado que datos de dudosa calidad pueden comprometer o arruinar cualquier resultado de los estudios hidrológicos basados en ellos (Riccardi, 2004).

Actualmente, diversos autores a nivel mundial creen indispensable incorporar a la gestión de los recursos hídricos consideraciones sobre el Cambio Climático (CC). Según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC (2014), citado por Garat (2017), el CC puede ser definido como *“el aumento gradual de la temperatura superficial global, como una de las consecuencias del forzamiento radiactivo causado por las emisiones antropogénicas”*.

Basados en numerosas observaciones y proyecciones de modelos climáticos, reportes del IPCC prevén un incremento de las precipitaciones extremas asociadas al calentamiento global. Particularmente, un informe del IPCC basado en proyecciones del Modelo CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) vaticinan una tendencia en aumento del número de episodios de precipitación intensa a corto y largo plazo, previendo incrementos de la intensidad y frecuencia de las precipitaciones en la mayoría de las masas continentales de latitudes medias, es decir en regiones como la de estudio en la presente tesis.

Las simulaciones realizadas por diversos modelos climáticos (Kharin y Zwiers, (2007); Kharin et al. (2013); IPCC (2013)) proyectan, por ejemplo, aumentos en el promedio global de precipitación máxima anual de 24 horas de duración y 20 años de período de retorno ( $P_{\max 20}$ ), comprendido entre 4 y 10% por cada °C de calentamiento medio global.

Garat (2017), para evaluar la incerteza del CC en la gestión del drenaje urbano de la ciudad de Concordia, Entre Ríos, proyectó como escenario más crítico, pero factible de ocurrir según las investigaciones del autor a fines de este siglo, un incremento total de 30% en las precipitaciones máximas diarias con recurrencia de 50 años.

### 2.1.1.3. Pérdidas de escurrimiento

Los procesos de intercepción vegetal, almacenamiento superficial e infiltración constituyen pérdidas en el análisis de la transformación de lluvia a escurrimiento superficial. Particularmente se denominan pérdidas iniciales a aquellas que tienen lugar antes de producirse el escurrimiento superficial, como son la intercepción y el almacenamiento por depresiones en la superficie.

La evapotranspiración también representa una pérdida para el escurrimiento directo, la cual se torna importante en periodos prolongados de análisis, pudiendo despreciarse para tormentas aisladas.

#### Abstracciones iniciales

Las abstracciones iniciales son las pérdidas que se producen antes de generarse el escurrimiento superficial por excesos de lluvia. Están constituidas por volúmenes de agua interceptados por el follaje de la vegetación y volúmenes almacenados en depresiones del suelo.

Las abstracciones pueden representar valores importantes en cuencas con cobertura natural y, para determinados autores, las mismas dependen de las pendientes de las superficies (Maza et al., 1996; Riccardi, 2004).

La intercepción por la vegetación es la primera etapa de almacenamiento y depende de varios factores, como: tipo de vegetación, estado de crecimiento, velocidad del viento, y características de la lluvia como intensidad y duración. Según Aron (1993) en forma general la capacidad de almacenamiento por intercepción aumenta con el aumento de la magnitud de los árboles, entendiéndose por magnitud a la medida de altura que alcanza el árbol en la edad adulta. Sin embargo es esperable que la intercepción tenga una relación más directa y proporcional con el follaje, que simplemente con la altura del árbol.

Por otro lado, se verifica que la intercepción vegetal en términos porcentuales respecto a la lluvia total, disminuye a medida que la lluvia total aumenta (Viessman et al., 1972 citado por Bertoni et al., 1995).

En cuanto al almacenamiento superficial en depresiones, valores típicos señalados por la bibliografía para pendientes moderadas son:

- 1.25 – 2.5mm para superficies impermeables tales como pavimentos o techos (Tholin y Kiefer 1960 citados por ASCE y WEF, 1992).

- 2.5 – 5.1mm para césped (Hicks, 1994 citado por ASCE y WEF, 1992).
- 5.1 y 7.5mm para pasturas y bosques respectivamente (ASCE y WEF, 1992).

Para pendientes más planas los valores de almacenamiento superficial en depresiones serán mayores y para pendientes más empinadas serán menores (Riccardi, 2004).

Se observa claramente como los ambientes antropizados tienden a reducir la capacidad de almacenamiento en superficies.

### **Infiltración**

Las formulaciones de infiltración deducidas regularmente para cuencas rurales, con poca urbanización, son plenamente utilizables en las zonas permeables de las cuencas urbanizadas. Sin embargo, en ambientes urbanos se deben considerar además, las áreas impermeables, dado que existen mayores superficies construidas.

En una cuenca antropizada se presenta generalmente una combinación de superficies permeables e impermeables, donde es posible discretizar en subcuencas con mecanismos de escurrimiento superficial diferentes. Una discretización simple que se puede realizar en las cuencas urbanas consiste en subdividir el área total en dos fracciones, aéreas permeables e impermeables. A su vez, esta última puede ser discriminada en directa o indirectamente conectada.

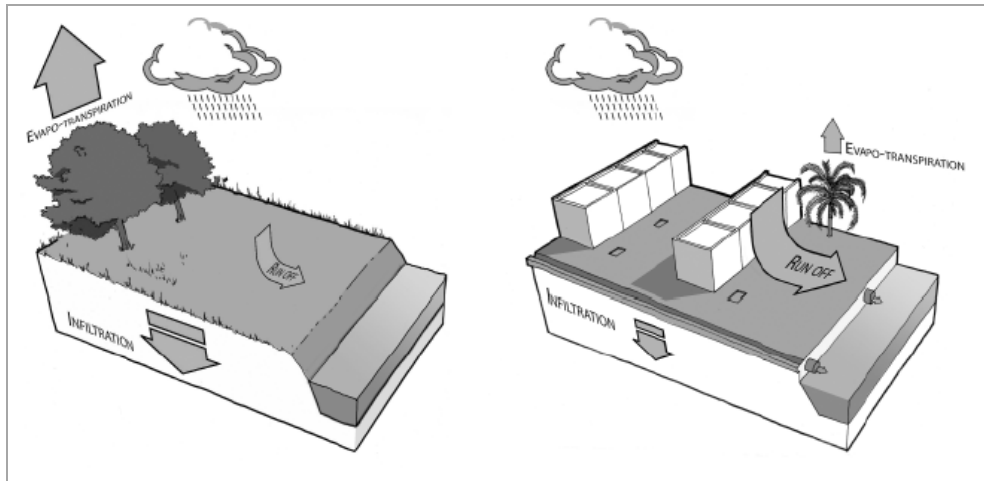
- Área permeable (AP): en zonas urbanas compuestas generalmente por parques, jardines, reservas naturales, etc.
- Área impermeable (AI): comprende todas las superficies cubiertas que impiden el ingreso del agua al suelo. A su vez puede dividirse en:

Área impermeable directamente conectada (DC): se trata de las áreas que desaguan sus excedentes pluviales directamente a una red de drenaje, sin presentar pérdidas entre la superficie de contacto con la lluvia y el punto de control de la cuenca. Es el caso de calles y estacionamientos pavimentados, techos y aceras impermeables conectados al sistema de desagüe pluvial.

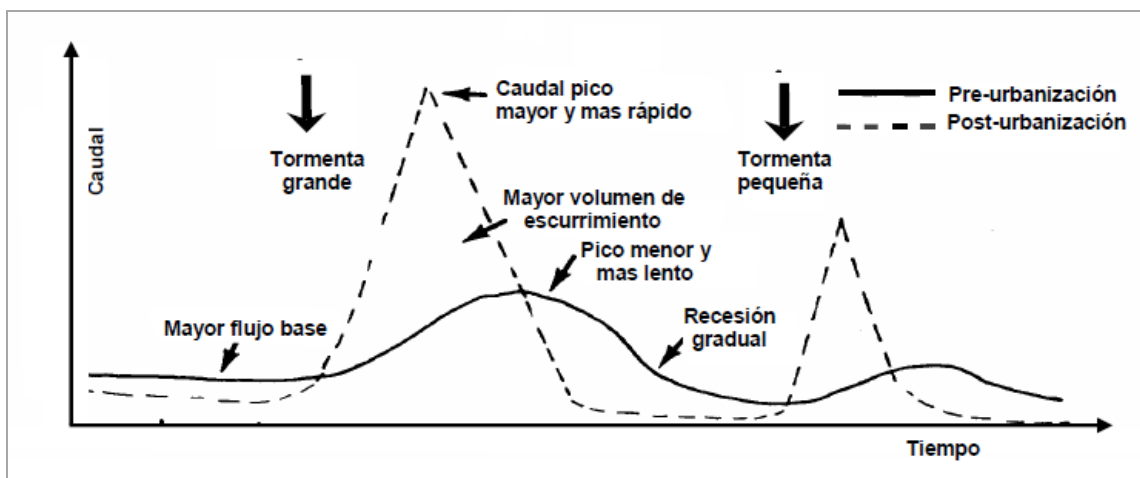
Área impermeable indirectamente conectada (IC): son superficies impermeables, pero sus excedentes son evacuados hacia áreas permeables donde una fracción de ellos pueden infiltrar y la fracción restante escurrir superficialmente. Es el caso de pisos y techos que descargan a parques u otros espacios verdes.

#### 2.1.1.4. Transformación lluvia-caudal

Las edificaciones de la urbanización, sumada a la eliminación de la cobertura vegetal y a la generación de superficies impermeables, reducen los volúmenes de pérdidas al escurrimiento superficial generando un mayor volumen a erogar por las cuencas. Como consecuencia, los caudales del hidrograma de respuesta se ven incrementados (Figuras 2.3 y 2.4).



**Figura 2.3.** Efecto de la urbanización en la infiltración y el escurrimiento (BACA, adaptado por Butler y Davies 2011 citado por Jha et al. 2011).



**Figura 2.4.** Cambios en la respuesta hidrológica de la cuenca debido a la urbanización. Morfología de los hidrogramas (ASCE y WEF, 1992).

Generalmente las inundaciones urbanas son vistas como locales porque involucran cuencas pequeñas (< 100km<sup>2</sup>, y muy frecuentemente cuencas < 10km<sup>2</sup>).

A medida que la ciudad se urbaniza, en general, ocurren los siguientes impactos (Leonard, 1968, citado por Tucci, 2007):

- Aumento de los caudales máximos (hasta siete veces) y de su frecuencia, debido al aumento de la capacidad de escurrimiento a través de superficies impermeables, conductos y canales.

- Aumento de la producción de sedimentos debido a falta de protección de las superficies y la producción de residuos sólidos (basura).
- Deterioro de la calidad del agua superficial y subterránea, debido al lavado de las calles, transporte de material sólido y conexiones cloacales y pluviales clandestinas.

El flujo base de los arroyos, generado por el flujo subsuperficial de las cuencas de zonas antropizadas puede presentar un aumento o una disminución de sus tirantes, dependiendo de las actividades que se den en las cuencas. Mientras que cuencas rurales con fuertes aportes de riego, el flujo base de los cursos de agua puede manifestarse con un aumento, dado que el agua de riego termina infiltrándose y transportándose por el suelo hasta los cauces. En tanto que zonas urbanizadas el flujo subsuperficial es despreciable, dado que las superficies impermeables imposibilitan el ingreso del agua en el suelo, reduciendo drásticamente la recarga de los acuíferos y el flujo base de los cursos de agua.

## **2.1.2. Dinámica del escurrimiento superficial en cuencas urbanas**

### **2.1.2.1. Sistema menor o microdrenaje**

El microdrenaje es la fracción del sistema de desagüe pluvial que colecta, almacena y transporta los excedentes hídricos superficiales desencadenados por lluvias de frecuencia ordinaria (de 2 a 10 años de recurrencia), aliviando los inconvenientes ocasionados por tormentas frecuentes.

El microdrenaje incluye cunetas, cordones cunetas, badenes, zanjas, bocas de tormenta, captaciones de zanjas, conductos y galerías subterráneos, pequeños canales y reservorios, alcantarillas y estaciones de bombeo, entre otras. El límite del microdrenaje es definido como el punto hasta donde no se producen efectos adversos debido a remansos desde condiciones aguas abajo, para caudales menores a los que el mismo fue diseñado (Riccardi, 2004).

Por ejemplo, un sistema menor de alcantarillado que ha sido adecuadamente diseñado para una recurrencia de 10 años tendrá sus conductos trabajando a gravedad durante eventos iguales o menores la tormenta de diseño, sin generarse zonas de remanso ni puesta en presión de elementos del sistema hacia aguas arriba. En cambio, un sistema fluvial (macrodrenaje) con obras de arte que han sido diseñadas con recurrencia de 50 años, podrán experimentar zonas de remanso y la puesta en presión de elementos del sistema hacia aguas arriba, como conductos menores que desaguan al curso, aun para tormentas menores a la de diseño.

Efectos adversos que han sido verificados y cumple con las hipótesis de diseño del sistema integral.

Un elemento importante del microdrenaje son las calles. Según Porto et al. (1995) son estas las que delimitan el microdrenaje en áreas urbanas. Además de permitir el movimiento del tránsito, las mismas reciben el flujo de agua desde los lotes y las mismas calles, conduciéndolos hasta las bocas de tormentas o al sistema mayor de desagüe. Una adecuada planificación de las calles contribuye a reducir las dimensiones y en ocasiones eliminar la necesidad de sistemas de conductos en zonas recientemente urbanizadas (Riccardi, 2004).

No debe perderse de vista que, la mayor cantidad de los escurrimientos superficiales de una cuenca urbana comienzan en el sistema de desagüe domiciliario, compuesto por techos, pisos, canaletas, reservorios, pequeños canales, cámaras y conductos domiciliarios. El mismo finaliza con la descarga domiciliario, la cual puede darse en zanjas o cunetas de calle, existiendo casos en que descarga directamente en conductos subterráneos.

#### **2.1.2.2. Sistema mayor o macrodrenaje**

Mientras que en el microdrenaje el flujo suele no ser bien definido y estar determinado por la ocupación y usos del suelo, el macrodrenaje suele presentarse bien definido coincidente con el camino natural de las aguas. Este último existirá y funcionara siempre, haya o no sido planificado adecuadamente para transportar el escurrimiento, colectando, almacenando y transportando el escurrimiento que excede la capacidad del microdrenaje (Riccardi, 2004).

El macrodrenaje debe ser planificado para responder adecuadamente ante eventos extraordinarios, generalmente para tormentas de 100 años de recurrencia. La evaluación de la respuesta del sistema mayor ante eventos extraordinarios, se centra en la cuantificación de los daños esperables y la planificación del accionar de los sistemas de emergencia, principalmente para evitar víctimas fatales (Riccardi et al., 2008).

Los cursos de agua naturales pueden o no pertenecer al sistema mayor. Los arroyos que atraviesan zonas urbanas, como los presentes en casi todas las ciudades del interior de Misiones, forman parte del macrodrenaje, recibiendo las aguas del sistema menor.

#### **2.1.3. Impacto hidrológico de la urbanización**

A nivel macro, las urbes pueden modificar el balance de agua de las zonas donde han sido construidas. Esta alteración se traduce en un aumento del escurrimiento superficial por

---

excedentes de precipitación, reducción de la recarga natural de acuíferos y disminución de la capacidad de evapotranspiración real. Mientras que las pérdidas, tanto en los sistemas de desagües cloaca y pluviales, como en los de abastecimiento de agua pueden generar recargas artificiales de los acuíferos y aumento puntuales de humedad del suelo.

Algunas variables hidroclimáticas pueden presentar alteraciones en cuencas que han sido fuertemente urbanizadas. Se han registrado incrementos de precipitaciones, aumento de temperatura y cambios en los vientos dominantes, entre otros factores climatológicos (O'Loughlin et al., 1996).

El consumo urbano de energía contribuye a crear núcleos o islas de calor que pueden cambiar el perfil meteorológico local. La combinación del incremento del consumo de energía y la diferencia de radiación provocan que las ciudades sean más calientes que las áreas rurales, atrapando los contaminantes, generando neblinas y nieblas más frecuentemente. La precipitación es entre el 5% y el 10% mayor en las ciudades, las tormentas de agua y granizo mucho más frecuentes, y las nevadas menos comunes. Las áreas urbanas generalmente generan más lluvia a la vez que reducen la infiltración y el nivel de la napa freática, lo que significa que la escorrentía ocurre más rápidamente y hay mayores inundaciones (Torrey, 2004).

Yu y Liu (2015) estudiaron el impacto de la urbanización sobre las tormentas intensas de Beijing. Los resultados de la simulación confirmaron que la expansión de la urbanización jugó un papel importante en la distribución e intensidad de precipitación para este evento extremo. La urbanización dio lugar a un aumento de la precipitación total, la hora de inicio de la precipitación avanzó en 1h, y la duración de la tormenta se hizo más larga. Por otra parte, la urbanización provocó que la distribución espacial de la precipitación sea más concentrada. La cantidad de precipitación total por encima de 250mm y la frecuencia de intensidades mayores a 40mm/h se incrementaron.

La principal alteración en las cuencas producida por la urbanización es la impermeabilización total o parcial de las superficies, la cual repercute en un aumento de los volúmenes de excedentes hídricos superficiales, ante la imposibilidad de las aguas de lluvia de infiltrarse en el suelo. Si bien es la modificación más influyente en la alteración de la dinámica de escurrimiento, no es la única.

La materialización del ejido urbano modifica el escurrimiento natural de las agua de lluvia, aumentando o disminuyendo el área de aporte de las cuencas y subcuencas. Dicha alteración,

repercute en la modificación de características fisiográficas tales como la curva hipsométrica, altura media y pendiente media de la cuenca, entre otras (Rodríguez, 2014).

Otra alteración significativa desencadenada por la urbanización es la producida en el sistema natural de desagüe. En una cuenca urbana las redes de drenaje son optimizadas mediante la construcción de superficies impermeables, canales y conductos, modificando las longitudes, pendientes y rugosidad de las superficies de escurrimiento. Además, la construcción de sistemas de desagües pueden producir trasbasamiento de cuencas.

La optimización hidráulica de las redes de drenaje acelera los procesos de transporte y concentración de flujos, aumentando las velocidades y caudales. Esta disminución en el tiempo de respuesta de la cuenca se ve reflejado en la reducción del tiempo de concentración de la mismas, parámetro de gran importancia en la caracterización del escurrimiento.

Un reducido tiempo de concentración produce una rápida concentración y evacuación de los excedentes hídricos, generando grande caudales aun en tormentas de corta duración y alta intensidad. En una cuenca con desagüe pluvial mal planificado, el tiempo de concentración es fácilmente modificado, volviendo a la cuenca más sensible frente a eventos intensos de corta duración (Riccardi, 2004).

Respecto a las perdidas la escurrimiento superficial, constituidas por la intercepción vegetal, almacenamiento superficial e infiltración, las mismas se ven reducidas ante los procesos de urbanización.

Dado que en general la capacidad de almacenamiento por intercepción vegetal se incrementa con el aumento de la magnitud de los árboles y la cobertura areal del follaje vegetal, en áreas urbanas es esperable una menor capacidad de intercepción, aun en áreas verdes parquizadas, respecto a las selvas autóctonas.

En zonas de llanura los volúmenes en depresiones son mayores ya que pequeñas ondulaciones en el terreno pueden presentar grandes áreas de inundación. En pendientes empinadas, como las de la ciudad de Oberá, los valores de almacenamiento en depresiones serán menores debido a la facilidad de escurrimiento y concentración de caudales (Rodríguez 2014).

Todas estas alteraciones en las características fisiográficas de la cuenca, balance hidrológico y dinámica del escurrimiento repercuten en afectaciones negativas, tanto para el entorno natural de la cuenca, como para las personas que en ella habitan.

---

En bibliografía desarrollada por la UNESCO, citada por Riccardi (2004), se ejemplifica a través de algunas situaciones medias, el impacto que la urbanización produce en las áreas urbanizadas:

- 0.1ha de área rural se convierte en urbana per cápita de incremento poblacional. Es decir que por cada nuevo habitante  $1000\text{m}^2$  de superficie rural se transforma en urbana.
- Un aumento de la impermeabilidad de 40% produce una disminución del 50% en los tiempos de distribución del escurrimiento (tiempo base de los hidrogramas) y un aumento del 90% del caudal máximo de las crecidas.
- Cuando la densidad poblacional pasa de 0.4 a 50hab/ha, el tiempo base de los hidrogramas de los escurrimientos directo se reducen a la décima parte y los volúmenes escurridos aumentan diez veces.

#### **2.1.3.1. Aumento del riesgo de inundación**

Estadísticamente, la posibilidad de afectación por una inundación ante una tormenta de una región se determina a través de un valor denominado riesgo de inundación. Dicho valor varía ante las modificaciones de las condiciones de la cuenca y la implantación de los edificios.

Cabe citar aquí la diferencia conceptual entre amenaza y riesgo de inundación. La primera refiere únicamente a la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno hidrometeorológico potencialmente desastroso, mientras que el riesgo resulta de la combinación de amenaza con la vulnerabilidad de los entes susceptibles de ser afectados por el fenómeno. El riesgo evalúa el grado de pérdidas esperadas, las cuales pueden ser tanto materiales como humanas.

La urbanización genera un aumento en el riesgo de inundación esencialmente por (Riccardi, 2004):

#### **Aumento del volumen de escorrentía, caudales picos y disminución de tiempos de respuesta de las cuencas**

El efecto combinado de aceleración e incremento de flujo puede deberse a:

- a) Modificaciones de las características superficiales de la cuenca, que involucra
  - a.1) Sustitución de suelos con vegetación, capacidad de almacenamiento e infiltración por elementos impermeables.
  - a.2) Rellenos de bajos húmedos naturales.

- a.3) Crecimiento centrífugo de ciudades.
- b) Modificaciones de cauces naturales y de la dinámica hídrica de la cuenca
  - b.1) Desvíos de cursos.
  - b.2) Canalizaciones, canales artificiales, interceptores.

Las nuevas condiciones de la cuenca hacen que la misma evacue mayor cantidad de agua en menos tiempo, generando caudales máximos de considerable magnitud respecto a los desarrollados en la cuenca original.

### **Ocupación de zonas inundables**

El riesgo de inundación no es tal si la zona estadísticamente posible de inundarse no presenta entes factibles de ser afectados negativamente por la inundación.

La urbanización escasamente planificada permite construir en zonas factibles de inundación (valles de inundación, embalses naturales, etc), viéndose afectadas directamente las personas que habitan allí ante eventos de considerable magnitud, aun sin ser eventos de recurrencias importantes.

A su vez la construcción de edificios dentro del valle de inundación obstaculiza el normal recorrido de las aguas, necesitando el flujo mayor sección para mantener el caudal, corriendo así el límite del valle de inundación hacia zonas que anteriormente no se veían afectadas por eventos de similar severidad, todo esto sumado al aumento de los caudales por los fenómenos de impermeabilización y optimización hidráulica del sistema anteriormente descripto.

#### **2.1.3.2. Incremento de procesos de erosión**

La rápida conversión de tierras naturales en rurales o urbanas deriva en la desaparición parcial o total de la capa superior de suelo, lo cual puede acelerar los procesos de erosión. En las urbes, la construcción de obras nuevas generan fuentes de contaminación y colmatación, como así también pérdida de capacidad de almacenamiento y conducción en cuerpos de aguas tales como lagos o arroyos. También pueden originar grandes depósitos en calles, espacios públicos, canales y redes del drenaje urbano.

La mayor erosión potencial de coberturas de suelos se presenta en el período de tiempo comprendido desde el proceso de remoción de la vegetación original, de los sitios de emplazamiento de las obras, hasta que se procede a la restitución de la cobertura vegetal (ASCE y WEF, 1992).

Los procesos de urbanización si no han sido acompañados de una adecuada planificación previa, traerán aparejado un proceso de erosión superficial, acompañado de deposiciones en los cuerpos de agua receptores, en particular en sistema de macrodrenaje aluvionales de baja pendiente (Lloret Ramos, 1995).

### **2.1.3.3. Deterioro de la calidad del agua**

Los medios antropizados rurales y urbanos pueden aportar una serie de materiales sólidos y líquidos, con diversos grados de contaminación, generados por la vida diaria de las personas y la dinámica de progreso.

Sumado a esto, el aumento de los volúmenes de escurrimiento y el incremento de las velocidades en el flujo, acrecientan considerablemente la capacidad del transporte del sistema, generando mayor aporte sólido al cuerpo receptor debido a los procesos de erosión desarrollados en el sistema.

El curso de agua que recibe un caudal líquido y/o sólido que sobrecarga su equilibrio geomorfológico evoluciona así hacia un nuevo equilibrio, desarrollando procesos de erosión que lavan sus nutrientes reduciendo la actividad biológica del sistema. Este fenómeno reduce la capacidad autodepuradora de los cursos naturales de agua.

Recorriendo el curso de agua, la crecida se va laminando hasta alcanzar una zona natural de deposición de sedimentos, afectando distintas zonas aguas abajo de arroyos, ríos y lagos.

Los efectos sobre los cuerpos receptores pueden distinguirse, según el tiempo de afectación, entre: (i) agudos y (ii) acumulativos o crónicos.

- (i) Cuando el efecto es agudo, el impacto provocado por eventos aislados es importante, en especial en aquellos eventos extremos. Por ejemplo, la contaminación bacteriana suele presentarse hasta una semana posterior al escurrimiento.
- (ii) Cuando el efecto es de tipo acumulativo, resulta importante evaluar la descarga en un periodo de tiempo suficientemente largo, como por ejemplo 1 año. En este sentido, un exceso de nutrientes por acumulación suele evidenciarse luego de una semana de descarga constante.

Los suelos arcillosos presentan una facilidad para retener contaminantes químicos generando un problema que alcanza a ser crónico, necesitando de un prolongado periodo de recuperación.

Por otro lado, estudios realizados en diferentes cuencas urbanas indican que un 85 a 90% de las tormentas que han producido impactos considerables, tienen recurrencias menores a un año (Alvarez Días, 1996; Laurence et al., 1996).

En los proyectos de saneamiento mediante obras estructurales tendientes a optimizar hidráulicamente los sistemas de desagüe pluvial, incluso cuando los cambios en la condición física de las canalizaciones se realizan solo para adaptar la red principal de drenaje, se producen cambios graves en el ecosistema debido a las alternancias en los hábitats. Esta situación se ve agravada por los cambios en la calidad del agua, causada por las descargas del drenaje urbano, que modifican profundamente toda la estructura del ecosistema acuático. (Osbone y Harris, 1989, citados por Porto, 2001).

Actualmente, en algunas ciudades ya existe la visión de que la preservación natural de llanuras de inundación, sin grandes cambios en la morfología del curso de agua y la vegetación ribereña, representa una forma de control de inundaciones y control de la calidad del agua, ya que preserva la capacidad de asimilación natural del ecosistema. De este modo, se conserva el hábitat natural de las especies y, al mismo tiempo, la capacidad de reducir los picos de las inundaciones (Porto, 2001).

## **2.1.4. Modelación de los procesos hidrológicos e hidráulicos en cuencas urbanas**

### **2.1.4.1. Estado del arte**

La generación de excedentes hídricos superficiales en zonas rurales y urbanas, como la descripción de los diferentes mecanismos involucrados en su movimiento constituye uno de los principales procesos del ciclo hidrológico. Particularmente en regiones como la de estudio, de clima subtropical con abundantes lluvias y relieve escarpado, la dinámica de los excedentes hídricos superficiales se vinculan directamente a la generación de escurrimiento con elevadas velocidades que hacen propicios procesos de erosión y también donde pequeñas alteraciones en porcentajes de impermeabilizaciones pueden amplificar fuertemente las ondas producidas durante crecidas.

Los primeros abordajes en la descripción de la respuesta hidrológica en cuencas se centraron en la generación de información en las secciones de control o punto de salida de la cuenca, no determinándose en su interior parámetros de flujo físicamente reales como alturas, velocidades y caudales. A través del avance del conocimiento hoy día se cuenta con modelos

y estructuras de simulación que permiten desagregar la mayoría de los procesos hidrológicos intervinientes en la transformación lluvia-caudal en unidades espaciales pequeñas.

Un modelo hidrológico-hidráulico es un ensamble de descripciones matemáticas de componentes del ciclo hidrológico; la estructura y arquitectura de dicho modelo están determinadas por el objetivo para el cual el modelo es construido (Singh y Woolhiser, 2002).

Gomez y Dias de Paiva (2010) destacan la importancia de la modelación matemática para el planeamiento, dimensionamiento y operación del drenaje urbano. Maksimovic (2001) ilustra sobre la utilidad de la modelación en la verificación de las condiciones de funcionamiento de los sistemas de drenaje y en la determinación de las respuestas de las cuencas, auxiliando en la valuación de la polución, como si también en el planeamiento y gerenciamiento del sistema.

Mulvaney, en Irlanda en los años 1850, desarrolla un dispositivo para medir intensidades de precipitación y presentaba a la comunidad científica los primeros avances del todavía vigente Método Racional (Riccardi, 2004), constituyéndose así el primer modelo de transformación lluvia-caudal del que se tenga registro.

El método plantea una proporcionalidad entre el caudal máximo, la intensidad de la lluvia y el área de la cuenca según la Ecuación 2.1.

$$Q_m = \frac{c \cdot i(D; R)A}{360} \quad (2.1)$$

Donde:

- $Q_m$ : es el caudal máximo [ $m^3/s$ ].
- $c$ : es el coeficiente de escurrimiento, el cual varía entre 0 y 1.
- $i$ : intensidad media máxima de la lluvia, la cual es función de la duración  $D$  y recurrencia  $R$  de la tormenta de diseño [ $mm/h$ ].
- $A$ : es el área de la cuenca [ $ha$ ].

El método trabaja bajo la hipótesis de que la lluvia total presenta uniformidad espacial y temporal, siendo su duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. Como consecuencia, la lluvia neta también debe presentar tales características y por tanto la tasa de infiltración debe ser constante y uniforme.

Estas hipótesis en las que se basa el Método Racional limitan su aplicación al cálculo de caudales de diseño en cuencas relativamente pequeñas, pudiéndose fijar como valores indicativos entre 100 y 250 hectáreas. En este rango de superficie es posible suponer uniformidad espacial y temporal de la lluvia, y reducida variación temporal de pérdidas al escurrimiento (Basile y Riccardi, 2008).

A pesar de sus limitaciones, el Método Racional es ampliamente utilizado en el proyecto de drenajes pluviales urbanos, verificándose un aceptable desempeño al ser utilizado para dimensionar elemento del sistema menor de desagüe con bajas recurrencias de diseño (hasta 10 años). A su vez, el mismo puede ser aplicado en cuencas rurales pequeñas para obtener caudales de diseño de obras de arte menores con recurrencia que no superen los 25 años.

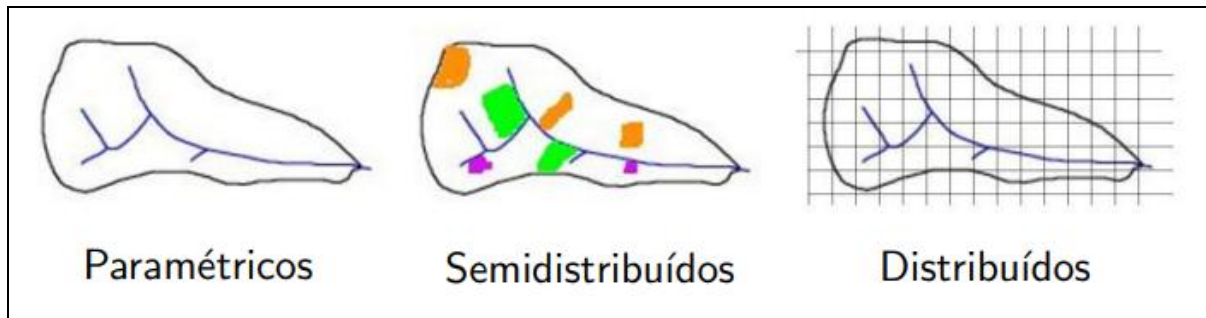
Actualmente existe en el ámbito nacional e internacional, la disponibilidad de un variado grupo de modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos académicos y comerciales, contemplando algunos el transporte de sedimentos y/o contaminantes y permitiendo la simulación por eventos o continua o ambas modalidades. Maksimovic (2001), Singh y Woolisher (2002), como así también Borah y Bera (2003) reseñan el estado del arte sobre modelos disponibles. Borah y Bera (2003) identificaron y compilaron las bases matemáticas de los diferentes componentes de estos modelos. Dicha compilación resulta útil para la adecuada elección del modelo a utilizar en una determinada aplicación, dependiendo de: la dimensión de la cuenca, las escalas espacio-temporales deseadas, la aproximación esperada de los resultados, la experiencia del usuario, los recursos computacionales disponibles, entre otros factores.

Como apoyo al pre y post procesamiento de datos y resultados, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como puede ser: GVSIG, ILWIS, ARCVIEW, IDRISI, QGIS, etc., permiten la digitalización y georeferenciación de mapas de curvas de nivel, catastrales, aerofotografías, determinación de límites y características de la cuenca, tratamiento de información hidrometeorológica, hidráulica, sedimentológica etc., pudiendo ser usados como soporte a los modelos de parámetros distribuidos para contemplar la variabilidad espacial de la cuenca y mejorar la precisión de la predicción de la escorrentía superficial y procesos asociados como erosión o transporte de contaminantes entre otros.

### **Modelos según el tipo de distribución de sus parámetros**

Según Menéndez y Re (2009) los modelos hidrológicos pueden agruparse, según la distribución de sus parámetros, en **Modelos de Parámetros Puntuales** (MPP, también

llamados Paramétricos), **Modelos de Parámetros Semidistribuidos** (MPS) y **Modelos de Parámetros Distribuidos** (MPD). En la Figura 2.5 se presentan ejemplos de conceptualizaciones de los mismos.



*Figura 2.5. Tipo de modelos hidrológicos-hidráulicos según la distribución de sus parámetros (Menéndez y Re, 2009).*

Los MPP no consideran las heterogeneidades dentro de la cuenca, por lo cual las condiciones que determinan la escorrentía superficial resultan simplificadas, y dificultan la obtención de un valor representativo de un parámetro geográficamente variable, que podría conducir a una predicción imprecisa de la media de la respuesta de la cuenca.

Ejemplos de este tipo de modelos son:

- a) Método Racional
- b) Modelo AR-HYMO, el cual es un modelo determinístico de parámetros concentrados que fue ampliamente utilizado en Argentina desde 1993 (Maza et al., 1996).
- c) Modelo IHACRES (Identification of unit Hydrograph And Components from Rainfall, Evaporation and Streamflow data), desarrollado por el Centro de Hidrología y Ecología del Reino Unido y la Universidad Nacional de Australia (Croke et al, 2005).

Los MPD representan la variabilidad en las características físicas de la cuenca, incluyendo entre otras la topografía, densidad de drenaje, grado de saturación de suelos, geomorfología y distribución espacio-tiempo de las precipitaciones. La principal limitación vinculada a estos modelos radica en la dificultad de caracterizar la variabilidad espacial de las mismas.

Ejemplo de este tipo de modelos son citables:

- a) VMMHH 1.0: El mismo es un modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasibidimensional desarrollado por Riccardi et al. (2009). El sistema surge de la fusión del modelo matemático CTSS8

(Riccardi, 2001) y de la plataforma computacional Simulaciones 2.0 (Stenta et al., 2005).

- b) CASC2D-TREX. Inicialmente fue desarrollado el modelo hidrológico CASC2D (CASCade of planes, 2-Dimensional), el cual presenta como estructura básica un modelo basado en eventos que simula el flujo superficial, la erosión de la superficie del suelo y la deposición, flujo en canal y transporte de sedimentos a través de los cauces fluviales. Como parte del desarrollo de TREX, los componentes hidrológicos y de transporte de sedimentos de CASC2D se ampliaron de manera significativa y mejoraron para soportar el modelado de las inundaciones y las características químicas de transporte (Velleux et al., 2008, citado por Stheli et al., 2014).

Entre los MPP y los MPD se encuentra una vasta gama de Modelos de Parámetros Semidistribuidos (MPS). Los mismos poseen la capacidad de discretizar el sistema hidrológico en numerosa subcuencas de tamaño y características diferentes, sin embargo con menor potencialidad que los MPD. Una distinción significativa entre los MPD y MPS es que en estos últimos, los elementos donde se produce la transformación lluvia-caudal requieren de vinculaciones de tipo rígidas entre ellos y los elementos conductores, permitiendo a veces una única vinculación. Por ejemplo, en la mayoría de los MPS, cada subcuenca puede descargar sus excedentes hídricos a un único nodo, lo que dificulta la modelación, por ejemplo de fenómenos de inundación en áreas de llanura.

Sin embargo, el potencial de los MPS radica en los entornos gráficos generalmente más amigables que el de los MPD. Además, en numerosas ocasiones la inexistencia de datos hidrológicos espacialmente distribuidos con suficiente niveles de detalle hacen irrelevante la utilización de complejos MPD con elevados insumos de recursos.

Ejemplos de este tipo de modelos son:

- a) Modelo HEC-HMS (US-ACE, 2005)
- b) SWMM: el cual ha sido utilizado para las simulaciones en la presente tesis y será desarrollado en detalle más adelante.
- c) MOUSE (MOdel for Urban SEwers): software comercial, producido por DHI Water & Environmen. El mismo es un modelo que simula el escurrimiento superficial, flujo en canales abiertos, flujo en tuberías, la calidad del agua y el transporte de sedimentos. Combina la hidrología compleja, hidráulica, calidad del agua y transporte

---

de sedimentos en una interfaz completamente gráfica y fácil de usar (Stheli et al., 2014);

### **Modelos según el tipo de aproximación que realizan**

Una clasificación alternativa es una caracterización de los modelos en función a las aproximaciones que realizan para describir la transformación lluvia-caudal.

La aproximación más básica corresponde a los **modelos empíricos** basados en observaciones, los cuales relacionan la entrada que estimula al sistema (precipitación) con la respuesta o salida del mismo (caudal), mediante un algoritmo de transformación con base en la física del sistema. Un ejemplo de estos modelos es el Método Racional, el cual primeramente fue considerado método empírico, para luego sobre 1920 universalizado para ser empleado en todo lugar y cualquier aguacero de diseño con el fin de dimensionar la red de alcantarillado. Desde hace unos 50 años se aconseja su uso con una restricción del campo de aplicación debido al grado de simplificación de sus procesos (Lopez Alonso, 2007).

A partir de la década de 1970 los modelos de **caja negra** comenzaron a utilizarse en transformación lluvia caudal, en general operan con redes funcionales que son una generalización de las redes neuronales. En estos modelos son en general de naturaleza estocástica y necesitan gran cantidad de datos de entrada y salida para que el algoritmo “aprenda”. Estos modelos extraen la información que hay entre las entradas y las salidas del sistema, y la estructura del modelo se adapta a estos datos. De ahí que este tipo se denominen modelos de caja negra. Ejemplo de este tipo de modelos aplicado a correlacionar lluvia – niveles se detallan en Scuderi et al. (2015).

El segundo nivel de aproximación corresponde a los **modelos de dos componentes**, los cuales son utilizados generalmente para simulaciones por eventos. Los mismos poseen un primer componente el cual evalúa las pérdidas producidas al escurrimiento, determinadas por la interceptación vegetal, almacenamiento superficial, evapotranspiración e infiltración. El remanente de lluvia se transforma en escurrimiento superficial y su movimiento es evaluado por un segundo componente mediante un modelo de tránsito, el cual considera el retardo y atenuación de la onda de crecida conformada por los múltiples aportes de la cuenca. En estos modelos la información antecedente tales como humedad del suelo, estado del almacenamiento superficial, etc., deben ser suministradas como dato. Ejemplos de este tipo puede considerarse entre otros el ArHymo, SWMM y MOUSE.

En este tipo de modelos la lluvia total de diseño se construye a partir de curvas de Intensidad–Duración–Recurrencia (IDR) y técnicas de:

- a) Hietograma triangular;
- b) Hietograma de Bloques Alternos;
- c) Hietograma de Chicago;
- d) Aproximación de Hietograma constante que emplea el Método Racional.

La transformación de lluvia total a lluvia neta puede ser resuelta mediante:

- a) Método de Green y Ampt;
- b) Método del CN del SCS;
- c) Método de Horton;
- d) Aproximaciones de perdidas lineal (aproximación del Método Racional).

En tanto que los hidrográmas de diseño pueden ser desarrollados a través de la convolución de Hidrográmas Unitarios Sintéticos (HUS), los más habitualmente empleados en hidrología urbana son:

- a) Embalse Lineal;
- b) HUS de Clark basado en curvas tiempo-área-concentración y propagación en Embalse Lineal;
- c) Hidrograma Unitario de Embalses en Serie de Nash;
- d) HUS Triangular del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-US) ;
- e) HUS de Colorado (derivado de HUS de Snyder);
- f) Una variante de transformación lluvia neta-caudal es mediante el uso del Modelo de Onda Cinemática.

El tercer nivel de aproximación está constituido por aquellos conocimos como **modelos de base física**, los cuales pueden ser utilizados para modelar eventos o series continuas de largos periodos de tiempo. Este tipo de modelos identifica y evalúa matemáticamente gran parte de los procesos físicos presentes en el ciclo hidrológico, subdividiendo el área de aporte en diversas subcuencas vinculadas entre ellas y a la red de drenaje. La información antecedente a cada tormenta puede ser generada dentro del proceso de simulación temporalmente continua. Ejemplo de ellos son los modelos VMMHH 1.0 y CASC2D-TREX entre otros.

### 2.1.4.2 Modelo hidrológico-hidráulico del SWMM

El software Storm Water Management Model (SWMM) fue financiado inicialmente por la Environmental Protection Agency de los Estados Unidos de América. Actualmente se encuentra disponible una versión (5.0vE), realizada por la National Risk Management Research Laboratory, traducida al español por Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo de la Universidad Politécnica de Valencia y de uso gratuito (GMMF, 2005).

Este software básicamente está constituido por un módulo hidrológico que permite llevar a cabo la transformación lluvia-caudal y un módulo hidrodinámico que permite propagar las crecidas generadas por los distintos elementos constitutivos de los sistemas de drenajes pluviales urbanos como cunetas, zanjas, canales, conductos, reservorios, etc.. Asimismo el modelo SWMM cuenta con un módulo de calidad de agua, el cual permite describir el fenómeno de acumulación y producción de sedimentos por erosión hídrica a nivel de subcuencas y su posterior traslado por la red de desagüe. Dicho modelo se encuadra dentro de los MPS y de tercera aproximación.

En el SWMM cada subcuenca funciona como un embalse no lineal (Figura 2.6). A diferencia de los modelos de embalse lineal, donde la esorrentía es proporcional a la profundidad del agua en el mismo, aquí la esorrentía superficial ocurre únicamente cuando la profundidad del agua excede el máximo almacenamiento superficial en depresiones  $dp$  (Mendez, 2012).

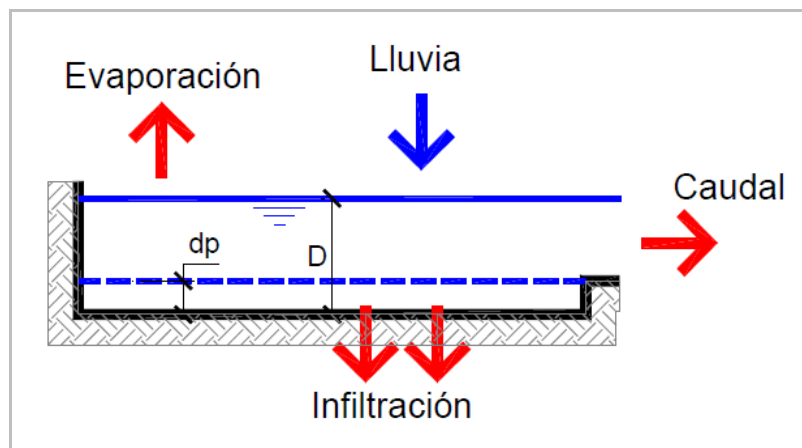


Figura 2.6. Esquema de embalse no lineal (Mendez, 2012).

En la figura anterior  $D$  es la profundidad de la lámina de agua acumulada en el embalse (subcuenca) y  $dp$  está representado por las abstracciones iniciales debido a la cobertura vegetal y al almacenamiento por irregularidades del terreno.

El modelo permite, además de discretizar dentro de cada subcuenca los porcentajes de áreas permeables (AP) e impermeables (AI), realizar una interacción entre las mismas según:

- Flujo en paralelo (oulet): tanto el AP como el AI descargan sus excedentes hídricos hacia la red de drenaje de manera independiente.
- Flujo desde áreas impermeables: los excedentes del AP pasan primero al AI, para luego ser derivadas a la red de drenaje.
- Flujo desde áreas permeables: los excedentes del AI pasan primero al AP, para luego ser derivadas a la red de drenaje.

A su vez el modelo permite, para cada subcuenca, seleccionar el porcentaje de área permeable e impermeable que interactúan. De esta manera, si el modelo está constituido adecuadamente, permite discretizar entre áreas impermeables directa e indirectamente conectadas.

Respecto a la infiltración en las áreas permeables, la misma puede ser evaluada por tres modelos diferentes:

### **Modelo de Hortón**

Horton (1939) propuso un modelo empírico donde las mayores tasa de infiltración ocurren al inicio de la tormenta para luego ir decreciendo hasta un valor constante según la Ecuación 2.2.

$$F = f_c \cdot t + \frac{(f_0 - f_c)}{K} (1 - e^{-Kt}) \quad (2.2)$$

Donde:

- $F$  es la lámina de infiltración acumulada en milímetros para el tiempo  $t$ .
- $f_c$  es la tasa de infiltración final [mm/h].
- $f_0$  es la tasa de infiltración inicial [mm/h].
- $K$  es el coeficiente de decaimiento [mm/h].

Eagleson (1970) y Raudkivi (1979) citados por Chow et al. (1994) demostraron que la ecuación de Horton puede derivarse de la ecuación de Richards al suponer que la conductividad hidráulica y la difusividad de agua en el suelo son constantes, independientemente del contenido de humedad del suelo.

### Modelo de Green Ampt

Tal como se expuso precedentemente, la ecuación de Horton representa una solución aproximada del modelo de Richards. Green y Ampt (1911), citados por Chow et al. (1994) propusieron un modelo físico con un esquema más simplificado de infiltración y una solución analítica exacta.

Este modelo es semi-empírico y proviene de la aplicación de la ley de Darcy y la conservación de masa, bajo la hipótesis de que la infiltración del agua en el suelo es análoga a un flujo a pistón. Dicho modelo está dado por la Ecuación 2.3 (Mays, 2004; citado por Mendez, 2012).

$$f = K_s \cdot t + S_f (\theta_s - \theta_i) \ln \left( 1 + \frac{F}{S_f (\theta_s - \theta_i)} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

- $f$  es la tasa de infiltración [mm/h] para el tiempo  $t$ .
- $F$  es la lámina de infiltración acumulada [mm] para el tiempo  $t$ .
- $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada [mm/h].
- $S_f$  es la presión de poros en el suelo [mm].
- $\theta$  es el contenido de agua en la zona saturada.
- $\theta$  es el contenido inicial de agua en el suelo.

### Modelo de la Curva Número

Este modelo fue desarrollado por el US Soil Conservation Service (US-SCS, 1975). El mismo plantea una relación proporcional entre el volumen de escurrimiento directo  $PE$  respecto a su valor potencial máximo  $P$  y el volumen infiltrado  $P-PE$ , respecto a su valor potencial máximo  $S$ , según la Ecuación 2.4.

$$\frac{P - PE}{S} = \frac{PE}{P} \quad (2.4)$$

Para este método existe un valor de almacenamiento de la cuenca que sólo permite el escurrimiento  $PE$  a partir del momento en que éste es satisfecho. Este almacenamiento se denomina abstracción inicial  $I_a$ .

$$\frac{(P - Ia) - PE}{S} = \frac{PE}{(P - Ia)} \quad (2.5)$$

Sin embargo para el SWMM no utiliza este parámetro, dado que considera que el mismo se encuentra implícito en  $dp$ , por lo que la Ecuación 2.5 resulta:

$$\frac{P - PE}{S} = \frac{PE}{P} \quad (2.6)$$

El potencial del volumen infiltrado  $S$  se determina mediante el número de escurrimiento  $CN$  en función al tipo de suelo, las condiciones de la cubierta vegetal y la humedad antecedente. El Servicio de Conservación de Suelos establece que:

$$S[mm] = \frac{25.400}{CN} - 254 \quad (2.7)$$

Para el SWMM el valor de  $CN$  asignado a cada subcuenca refiere únicamente a las características el área permeable.

De la ecuación de continuidad sabemos  $PE$  resulta de  $P$  menos  $F$ . Finalmente incorporando esta última relación a la Ecuación 2.6 y operando algebraicamente podemos encontrar que:

$$PE = \frac{P^2}{S + P}; F = P - \frac{P^2}{S + P} \quad (2.8.a \text{ y } b)$$

Despreciando los términos de inercia y presión de la ecuación dinámica, el caudal de salida de la subcuenca se puede expresar como el producto de la velocidad, obtenida de la ecuación de Manning, la profundidad y el ancho de escurrimiento (Huber and Dickinson, 1992, citado por Ramos Vernieri, 2013) según la Ecuación 2.9.

$$Q = W \frac{(D - d_p)^{5/3}}{\eta} S_s^{1/2} \quad (2.9)$$

Donde:

- $W$  es el ancho hidráulico de la subcuenca.
- $\eta$  es la rugosidad de Manning.
- $S_s$  es la pendiente de la subcuenca.

De la ecuación de continuidad podemos deducir que:

$$\frac{dV_s}{dt} = A_s \frac{dD}{dt} = A_s \cdot I_e - Q \quad (2.10)$$

Donde:

- $V_s$  es el volumen de agua superficial dentro de la subcuenca.
- $A_s$  es el área de la subcuenca.
- $I_e$  es la intensidad de exceso de precipitación igual a  $PE/dt$ .

Combinando las ecuaciones 2.9 y 2.10 se obtiene la ecuación diferencial de embalse reservorio no lineal según:

$$\frac{dD}{dt} = I_e - \frac{W}{A_s \cdot \eta} (D - dp)^{5/3} S_s^{1/2} \quad (2.11)$$

El modelo resuelve esta ecuación en cada paso de tiempo mediante el esquema de diferencias finitas poniendo a  $D$  final como incógnita, mediante el método iterativo de Newton-Raphson (Ramos Vernieri, 2013).

### Propagación del flujo

La propagación del flujo, o propagación de una crecida, puede ser definida como “*el procedimiento de cálculo requerido para determinar el hidrograma en una determinada sección del curso de agua partiendo, de un hidrograma conocido en una sección aguas arriba*” (Basile, 2008).

Una vez evaluada la transformación lluvia caudal, el SWMM permite simular la propagación del flujo a través de un sistema de drenaje en ramas o en mallas, considerando el retardo y atenuación de la onda de crecida a través de los diversos elementos del sistema. Este modelo puede contemplar efectos de remanso, flujo a superficie libre, flujo a presión, flujos inversos, flujo a través de vertederos, orificios y dispositivos de bombeo. Además, permite simular conducto, canales y cauces naturales de cualquier tipología, pudiéndose discretizar en diferentes rugosidades dentro de una misma sección.

El transporte de agua por el interior de cualquiera de los conductos representados en SWMM está gobernado por las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento tanto para el flujo gradualmente variado como para el flujo transitorio (ecuaciones de Saint Venant). Dentro del modelo se puede elegir el nivel de sofisticación con

que desea resolver estas ecuaciones. Por ello existen tres modelos hidráulicos de transporte: Flujo uniforme, Onda cinemática u Onda dinámica.

El modelo **Onda dinámica** resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant y por tanto, teóricamente, genera los resultados más precisos. Este modelo de transporte puede contemplar efectos como almacenamiento en los conductos y nodos, resaltos hidráulicos, pérdidas en las entradas y salidas de los pozos de registro, flujo inverso y el flujo presurizado. Dado que resuelve de forma simultánea los valores de los niveles de agua en los nudos y los caudales en las conducciones puede aplicarse para cualquier tipo de configuración de red de saneamiento, incluso en el caso de que contengan nudos con múltiples divisiones del flujo aguas abajo del mismo o incluso mallas en su trazado.

El costo computacional que generalmente es necesario pagar por el empleo de este método es la necesidad de utilizar incrementos de tiempo de cálculo mucho más pequeños, del orden de 1 minuto o menos. Durante el cálculo SWMM reducirá automáticamente el incremento de tiempo de cálculo máximo definido por el usuario si es necesario para mantener la estabilidad numérica del análisis.

Finalmente la ecuación a resolver a lo largo de cada conducto, en cada intervalo de tiempo es la de Huber y Dickinson (1992), citado por Ramos Vernieri (2013):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g \cdot A_m \cdot Sf - 2V \frac{\partial A_m}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A_m}{\partial x} + gA_m \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (2.12)$$

Donde:

- $Q$  es el caudal en el conducto
- $A_m$  es el área mojada de la sección transversal del flujo
- $x$  es la distancia a lo largo del conducto
- $H$  es el nivel piezométrico
- $S_f$  es la pendiente de fricción expresada a partir de la ecuación de Manning según:

$$S_f = \frac{\eta^2 Q |v|}{A \cdot R_h^{4/3}} \quad (2.13)$$

Donde.

- $v$  es la velocidad del flujo

- $R_h$  es el radio hidráulico

El modelo plantea también la ecuación de continuidad en los nodos, teniendo en cuenta la superficie de inundación asignada cada uno de ellos  $A_i$  según la Ecuación 2.14.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \sum \frac{Q_t}{A_i} \quad (2.14)$$

Las ecuaciones 2.12 y 2.14 se resuelven secuencialmente a fin de determinar el caudal en cada enlace y la carga hidráulica en cada nodo, respectivamente, en un determinado paso de tiempo  $\Delta t$ . Para ello, las ecuaciones se expresan en diferencias finitas y se aplica el método de Euler modificado. Este método produce una solución completamente explícita, por lo que requiere pasos de tiempo muy cortos (Ramos Vernieri, 2013).

#### 2.1.4.3. Otros modelos disponibles para la modelación de CUSCSH

Entre los modelos de mayor difusión a nivel nacional se encuentra el **ARHYMO**, particularmente su versión 2.0 desarrollado por Maza y otros en 1993, el mismo es de distribución gratuita por el Instituto Nacional del Agua (INA), el cual fue utilizado ampliamente en casi todas las provincias argentinas (Bacchiega et al., 2006).

Si bien el ARHYMO ha sido exitosamente utilizado para evaluar el comportamiento hidrológico-hidráulico en zonas de elevada pendiente, tales como los piedemonte de la provincia de Mendoza (Burgos y Vargas Aranibar, 2008), al pie de la Cordillera de los Andes en la provincia de Catamarca (Maza et al., 2012) inclusive en la ciudad de Oberá, Misiones (Rodríguez, 2014), el mismo presenta una serie de limitaciones respecto a los parámetros de flujo que puede arrojar como resultado de la modelación, además de no poseer un módulo de calidad de agua capaz de evaluar la producción y transporte de sedimentos.

En lo que concierne al desarrollo local de tecnologías de simulación mediante modelos de base física, con capacidad para generación y propagación de flujo superficial, y en paralelo al desarrollo internacional en el campo de la modelación matemática del escurrimiento superficial y el acople de procesos de erosión, diversas unidades académicas argentinas han desarrollan tecnologías propias para la modelación hidrológica-hidráulica.

En el Departamento de Hidráulica (DH) de la FCEIA-UNR desde 1995 se trabaja en desarrollos y aplicaciones de variantes de un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi-2D de base física, como el **CTSS8**, con capacidad de simulación en ambientes rurales y urbanos, en grandes ríos y el acople de modelos morfológicos capaces de reproducir erosión

en cuencas y cursos de agua (Riccardi, 2001; Riccardi et al., 2005 y 2010; Basile et al., 2007 y 2010). Cabe destacar que la experiencia obtenida en el desarrollo de tecnologías propias, indica lo ventajoso que significa la posibilidad de intercambiar técnicas de modelación, tanto para el flujo como para sedimento, desacoplar procesos, y con relativamente bajo costo, ensamblar esquemas combinados adecuándolos a cada problemática hídrica en particular.

Aunque los modelos desarrollados por el DH-FCEIA-UNR han sido generados principalmente para la modelación de sistemas hidrográficos de reducida energía topográfica como la llanura chaco-pampeana, los mismos han presentado un aceptable desempeño para la evolución de inundación en cuencas de zona serrana de Misiones, tal como se pudo comprobar en modelaciones realizadas en el marco de esta tesis. Sin embargo, dichos modelos trabajan con modelos digitales de terreno, los cuales pueden presentar un detalle de discretización espacial inferior al requerido para las CUSCSH, donde se evidencia un marcado cambio en régimen de flujo en cortas distancias (Rodríguez y Riccardi, 2014).

En el Cono Sur de América Latina, investigadores del Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ha desarrollado diversas variantes de un programa computacional modulado denominado **IPHS1**, inicialmente desarrollado por Tucci et al. (1989) citado por IPH-UFRGS (2004). Dicho modelo permite al usuario, mediante la selección de algunos modelos ya consagrados por la bibliografía, construir su propio modelo hidrológico-hidráulico.

Para el caso en estudio, la simulación puede ser abordada con otros modelos reconocidos a nivel mundial como **HMS** (US-ACE, 2006), el cual es apto mayormente para modelaciones hidrológicas, y el **HEC-RAS** (US-ACE, 2005), para modelación hidrodinámica uni y cuasi 2D, entre otros, no descartándose la aptitud de otros modelos que puedan resultar más ventajosos.

No debe perderse de vista que los resultados de la utilización de una herramienta sofisticada y precisa para determinar el flujo en una red de drenaje resultan cuestionables cuando la información de entrada al sistema es de mala calidad (Garat, 2017). Por lo tanto, la toma de datos debe ser hecha sistemáticamente, ya que permite lograr un mejor entendimiento de los fenómenos hidrológicos e hidráulicos, detectar deficiencias, servir de base a la determinación de coeficientes y parámetros para el uso de modelos matemáticos.

Diversos autores coinciden en señalar que los datos disponibles en diversas aplicaciones en simulación hidrológica-hidráulica son solamente suficientes para justificar el empleo de

---

modelos con complejidad limitada, resultando operacionalmente más eficiente utilizar modelos simples con límites conocidos e incertidumbres mensurables (Garat, 2017).

Por otro lado, la utilización de complejas ecuaciones inherentes a la transformación lluvia-caudal demandan la calibración de numerosos parámetros característicos los cuales requieren de una gran cantidad de información antecedentes y ensayos de campo no disponibles en la mayoría de las regiones, tal como sucede en la región central de Misiones. "*Mayor detalle no significa más exactitud*" (Maza et al., 1996).

### **2.1.5 Criterios para evaluación de amenaza por inundación en áreas urbanas**

Gómez Valentín (2007) realiza una evaluación de los criterios disponibles para establecer la peligrosidad de la escorrentía superficial en calles. El autor cita que, en primer lugar existe como referencia el criterio de calado máximo establecido por el Manual de Criterios de Drenaje de Denver, Colorado (Wright-McLaughlin, 1969), el cual se fija en un calado máximo de 0.45m medidos desde el punto más bajo de la calle. La aplicación de un criterio similar al anterior en la ciudad de Mendoza, Argentina, establece un calado máximo de 0.30m, para evaluar el riesgo de la escorrentía en dicha ciudad.

Respecto a criterios de evaluación que evalúan la combinación de niveles y velocidades alcanzados simultáneamente por el flujo, el Manual de Criterios Hidrológicos y de diseño del Drenaje del Condado de Clark, en el estado de Nevada (CCRFC, 1999). Establece que el producto del tirante en la parte más baja de la calle por la velocidad no supere un valor de  $0,55\text{m}^2/\text{s}$ , además, independientemente de la velocidad, el nivel no puede superar los 0.30m.

Por otro lado, Témez (1992) propone que de manera independiente, el tirante no debe ser superior a 1.00m y la velocidad a 1.00m/s, a su vez, el producto de los mismos no debe ser superior a un valor de  $0.50\text{m}^2/\text{s}$ . Autores como Abt et al., (1989) proponen simplemente que el producto tirante por velocidad sea inferior a  $0.50\text{m}^2/\text{s}$ .

Nanía (1999) propuso un criterio que evalúa la estabilidad al deslizamiento de una persona parada dentro de la escorrentía de la calle. Como conclusión el autor expresa que el producto de él tirante por la velocidad al cuadrado no debe superar los  $1.23\text{m}^3/\text{s}^2$ .

De manera similar, la Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica de la Universidad Politécnica de Cataluña (SIHH-UPC, 2001), propone evaluar el riesgo del flujo mediante la

estabilidad al vuelco de una persona. Como resultado obtienen, al igual que otros autores, que el producto del tirante por la velocidad no supere los  $0.50\text{m}^2/\text{s}$ .

La Tabla 2.1 presenta un resumen de los criterios y autores citados por Gómez Valentín (2007). Cabe citar aquí que, tanto para la estabilidad al vuelco como al deslizamiento, se evaluó la resistencia de una persona de 60kg con un coeficiente de rugosidad de Manning entre el caucho y hormigón húmedo de 0.5.

**Tabla 2.1.** Criterios para establecer la amenaza por inundación de calles (Adaptado de Gómez Valentín, 2007).

Criterio	nivel (h)	velocidad (v)	$h \cdot v$	$h \cdot v^2$
	[m]	[m/s]	[ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	[ $\text{m}^3/\text{s}^2$ ]
Denver (Wright-McLaughlin, 1969)	0.45			
Mendoza (Nanía, 1999)	0.30			
Condado de Clark (CCRFCD, 1999)	0.30		0.55	
Témez (Témez, 1992)	1.00	1.00	0.50	
Abt (Abt et al., 1989)			0.50	
Estabilidad al deslizamiento (Nanía, 1999)				1.23
Estabilidad al vuelco (SIHH-UPC, 2001)			0.50	

Si bien los criterios anteriores fueron establecidos en su mayoría para evaluar la amenaza por inundación en calles, los mismos pueden ser utilizados para zonas ribereñas de arroyos urbanos, donde el desborde de los arroyos avance sobre las construcciones y habitantes ribereños.

## 2.2. Procesos de erosión hídrica en cuencas urbanas

### 2.2.1. Mecanismos de erosión

Los procesos de erosión no se producen de manera aisladas, son parte de un complejo y continuo proceso de remoción, transporte y deposición de partículas de suelo. En un enfoque general los procesos de erosión hídrica pueden englobarse en (i) erosión por salpicadura, (ii) erosión superficial y (iii) erosión lineal.

(i) La erosión por salpicadura es provocada por el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo desprotegido, desmenuzando las partículas y facilitando su transporte hasta una depresión sobre el terreno o hasta la red hidrográfica. La tasa de desmenuzamiento del suelo depende de la intensidad de la precipitación, las características del suelo y de la cobertura vegetal que posee, tanto de las características del cultivo como de las prácticas de labranza utilizadas.

(ii) En el flujo mantiforme, responsable de la erosión superficial o láminar sobre la cuenca, el agua se mueve en forma difusa sobre la superficie, a través de una micro-red hidrográfica, controlada principalmente por la vegetación existente y con un patrón de flujo que puede variar en el tiempo (Basile, 2004).

(iii) El flujo encauzado en la red hidrográfica, responsable de erosión lineal o encauzada, posee un patrón de flujo definido y consistente en el tiempo. En los canales y cursos naturales de agua, la erosión lineal está determinada por la capacidad de transporte del flujo encauzado y la fuerza resistente capaz de oponer las partículas.

En un curso de agua, hay erosión si la sección del mismo se ve alterada, ya sea por descenso del nivel del lecho o por corrimiento de sus márgenes. En una sección en equilibrio, si bien existen continuos mecanismos de remoción y deposición de sedimentos, la misma no se ve alterada en su morfología (Basile, 2004). A nivel de cuenca, dado que la misma no recibe aporte de material sólido durante los episodios lluvias, la tasa de erosión está determinada por la pérdida de suelo debido al flujo mantiforme sobre la superficie.

Dentro de los procesos de erosión hídrica en cursos de agua de áreas urbanas existe una gran variedad de tipologías, muchas de ellas asociadas a acciones antrópicas sobre la red de drenaje. Las tipologías más frecuentes de ser encontradas son:

- i) Generalizada o de fondo
- ii) Localizada
  - ii.1) Al pie de obras de canalización
  - ii.2) En pilas o pilares
  - ii.3) En estribos u obras unidas a la margen.
  - ii.4) En alcantarillas y bocas de tormenta
  - ii.5) Bajo conductos y canalizaciones
  - ii.6) Transversal.

Entre la erosión laminar y aquella claramente encauzada, se observan formas intermedias de erosión tales como en cárcavas y en surcos. La erosión en cárcavas, puede definirse como una forma particularmente intensa de erosión lineal, a largo del desarrollo de un nuevo canal. Mientras que la erosión en surcos se define como una erosión superficial severa. Los surcos pueden considerarse como el estado embrionario de una cárcava (Basile, 2004). Si bien

pueden presentar una morfología similar, la diferencia entre surco y cárcava, es que la primera si puede ser borrada por acciones de labranza (Cisneros et al., 2012).

Un caso particular de pérdida de suelo por acción del agua se presenta durante los deslizamientos de tierra, llamados generalmente aludes de barro y los cuales corresponden procesos de remoción en masa. Este mecanismo de erosión es característico de regiones de topografía accidentada, donde la deforestación y los procesos de urbanización han agudizado una erosión lineal al pie de las laderas. Si las características topográficas lo permiten y el escurrimiento superficial posee la suficiente capacidad de transporte, los sedimentos generados por los deslizamientos son arrastrados por la corriente generando un flujo hiperconcentrado.

En la Figura 2.7 se expone una clasificación de los proceso de erosión por acción del agua, en resumen a lo antedicho.

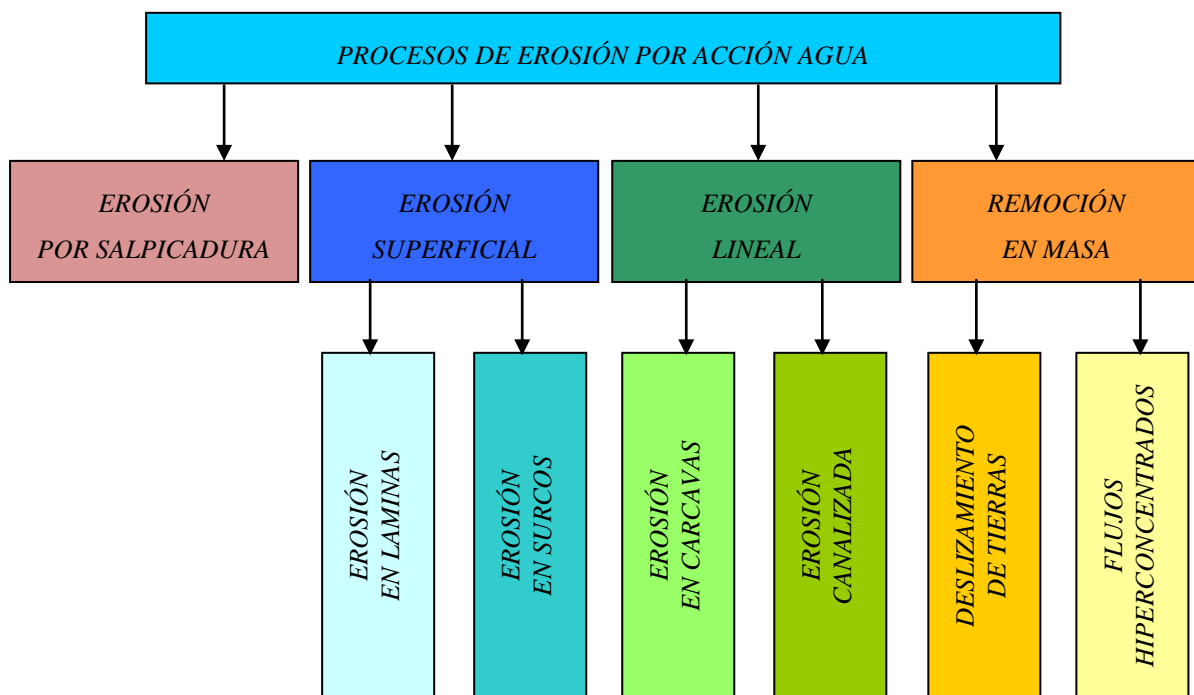


Figura 2.7. Clasificación de los procesos de erosión por acción del agua.

### 2.2.1.1. Factores que afectan la erosión

El fenómeno de la erosión hídrica es complejo, dada que se rige por una multiplicidad de factores. Los principales factores que intervienen en los procesos de erosión son el clima, las características del suelo, el relieve y las ocupaciones y usos del suelo, ya sea por los sistemas de producción utilizados, como por las prácticas urbanísticas empleadas dentro de la cuenca.

---

Si bien la interacción de dichos factores resulta compleja, la intervención de cada uno de ellos puede ser avaluado y analizado individualmente, asiendo foco en su capacidad para producir y transportar sedimentos.

### **Clima**

El principal factor climático que influye en la erosión es la precipitación y su energía cinética asociada. Las características y distribución de las tormentas son esenciales en cualquier estudio de erosión hídrica (Cisneros et al., 2012). Las tormentas convectivas, como las que se presentan en la zona de estudio, se producen por el ascenso repentino de masas de aire caliente y se caracterizan por ser localizadas y de alta intensidad.

La intensidad de una precipitación define la energía cinética que desencadena los procesos de desmenuzamiento de las partículas de suelo y el flujo encargado de transportarlas.

En cuencas rurales con cultivos anuales, la ocurrencia de eventos extremos durante el año debe ser cotejada con la madurez vegetativa y la cobertura de los cultivos en las distintas épocas del año.

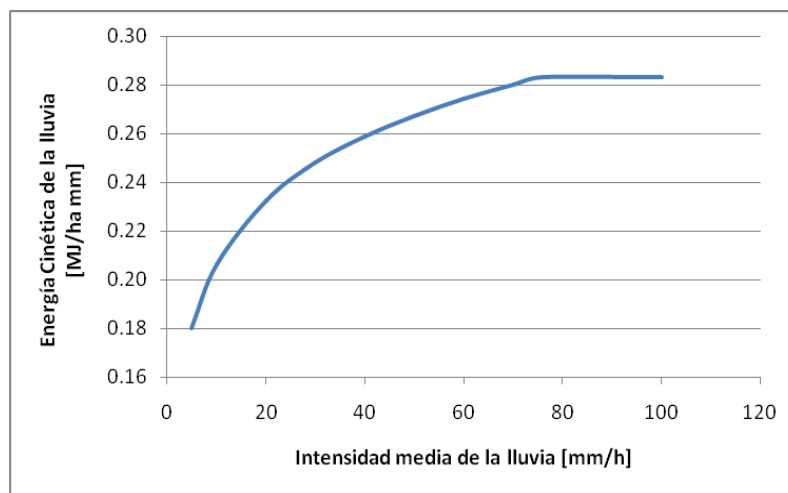
En regiones con precipitaciones, relativamente similares durante todo el año, las tormentas de invierno producen mayores erosiones, debido a que las aguas de lluvia con menores temperaturas poseen mayor viscosidad e infiltran con mayor dificultad en el suelo, aumentando el escurrimiento superficial y por ende la erosión hídrica (Mendez, 2012).

A pesar de que la intensidad de la tormenta presenta relación directa con la erosión producida, son las tormentas de intensidad intermedia las que, a largo plazo, producen la mayor cantidad de pérdida de suelo, debido a una combinación entre período de retorno y erosión unitaria (Morgan 2005, citado por García-Chevesich, 2010). La Tabla 2.2 presenta datos experimentales sobre la relación entre la intensidad de tormentas y la erosión producida en una cuenca de Zanesville, Ohio-EUA. En la misma se observa que para un periodo de un año la mayor erosión está dada por eventos de entre 102 y 127 mm/h de intensidad máxima caída en 5 minutos.

Sin embargo, la medida más adecuada para la comparación de la erodabilidad entre tormentas es la energía cinética del evento, concepto que será desarrollado en el ítems 2.2.2.1. Bajo este concepto, la erodabilidad de una tormenta está en función de su duración e intensidad. En la Figura 2.8 se presenta la relación funcional entre la intensidad de la lluvia y la energía cinética de la misma según la metodología propuesta por Foster et. al. (1981).

*Tabla 2.2. Relación entre intensidad de tormentas y erosión producida en Zanesville, Ohio (Adoptado de Fournier, 1972).*

Máxima agua caída en 5 minutos [mm/h]	Número de tormentas	Erosión por tormenta [t/Ha]	Erosión total [t/Ha]
0 - 25.4	40	3.7	148
25.5 - 50.8	61	6	366
50.9 - 76.2	40	11.8	472
76.3 - 101.6	19	11.4	216.6
101.7 - 127.0	13	34.2	444.6
127.1 - 152.4	4	36.3	145.2
151.5 - 177.8	5	38.7	193.5
177.9 - 254.0	1	47.9	47.9

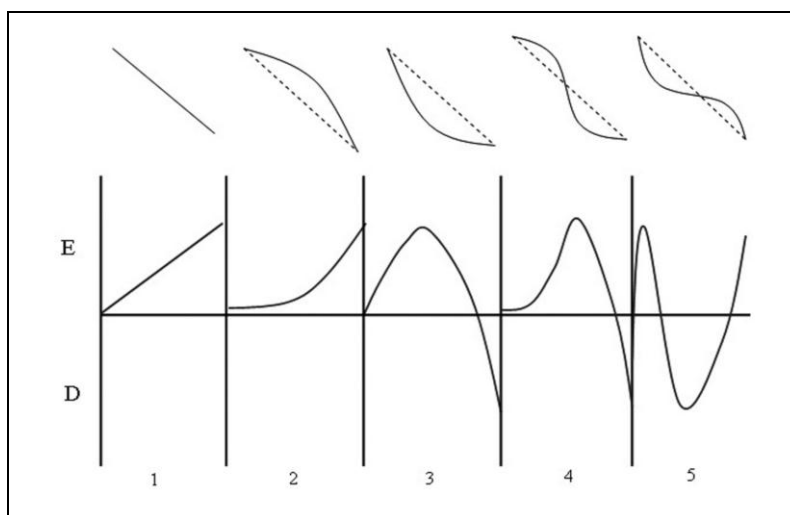


*Figura 2.8. Relación funcional entre la intensidad y la energía cinética de una lluvia.*

## Relieve

El principal factor asociado al relieve que influye en la erosión hídrica es la pendiente topográfica, pero no es el único. La inclinación de las superficies de escurrimiento tiene significativa intervención en la velocidad del flujo, por lo que su determinación es vital para la estimación de las tasas de erosión. A su vez, la longitud en la que se desarrolla la pendiente, es también otro factor que define la erosión en una ladera. Una superficie de escurrimiento extensa concentra mayor cantidad de excedentes hídricos superficiales, aumentando las velocidades y caudales, elevando la capacidad de arrastre de la corriente.

En la Figura 2.9 se presenta una serie de posibles morfologías de laderas y las tasas de erosión esperables en las mismas. En dicha figura se observa cómo las magnitudes de las pendientes y disposición de las mismas modifica las zonas de remoción y deposición de sedimentos.



**Figura 2.9.** Variaciones en las tasas de erosión (E) y depositación (D), según cambios topográficos a lo largo de una pendiente (Terrence et al., 2002, citado por García-Chevesich, 2010).

En regiones serranas, como la zona centro de Misiones, la exposición solar de la ladera influye sobre la insolación, temperatura y humedad del suelo, lo que repercute en la posibilidad de instalación de las plantas y su capacidad para mitigar los procesos de erosión. En tanto que la distribución de pendientes sobre el terreno es de vital importancia para la planificación de medidas de control de la erosión, mediante técnicas de manejo de cultivo (Cisneros et. al., 2012).

### Características del suelo

Las características del suelo tienen una doble influencia en el desarrollo de procesos de erosión. Por un lado, condicionan la tasa de infiltración de las agua de lluvia, repercutiendo en la generación de excedentes hídricos superficiales, y por otro lado establecen la vulnerabilidad a la erosión del suelo.

Los suelos con potencial de escurrimiento mínimo, como las arenas profundas, requieren de grandes volúmenes de precipitación para generar escurrimientos superficiales capaces de producir erosiones significativas. Mientras que los suelos con potencial de escurrimiento alto, como los arcillosos, pueden generar flujos capaces de erosionar el suelo con precipitaciones menores (Zimmermann, 2008). La zona de estudio está gobernada por un horizonte superficial de suelo limo-arcilloso, con potencial de escurrimiento alto una vez humedecido (Rodríguez, 2014).

Respecto a la erodabilidad del suelo, esta depende de las propiedades del mismo, tales como tamaño de la partícula, estabilidad de los agregados, cantidad de materia orgánica que posee, cantidad y tipos de arcillas en su composición y por características edafológicas que afectan la estructura del suelo y la transmisión de agua, entre otras.

Quizá la discretización más importante respecto a las características del suelo susceptible de ser erosionado, es determinar si se trata de un suelo cohesivo o no. En los suelos no cohesivos, su capacidad para oponerse al desmenuzamiento y transporte está gobernada por fuerzas gravitacionales, más precisamente su peso. En cambio en suelos cohesivos, las fuerzas que lo rigen son de carácter electro-químicas, las cuales están presentes en la superficie de las partículas más finas.

Son las partículas medianas del suelo, entre 0.1 y 1mm, las más erosionables, dado que no poseen cohesividad ni peso relevante. Por tal motivo, se dice que la variable decisiva, en términos de la erosión con respecto a la textura del suelo, es el porcentaje de limo, pues dicha clase textural se encuentra entre las arcilla y arena (García-Chevesich, 2010).

La materia orgánica presente en la estructura del suelo aumenta la aireación, facilitando la infiltración y el crecimiento vegetativo, a la vez que aumenta la cohesividad entre las partículas del suelo, aumentando su resistencia al erosión (García-Chevesich, 2008).

### **Cobertura vegetal**

La vegetación existente sobre una superficie proporciona una serie de beneficios que reducen la pérdida del suelo por acción de la erosión hídrica.

La cubierta superior de los árboles, formada por las copas de los mismos, retiene parte de las aguas de lluvia a la vez que puede reducir la energía cinética de las gotas. Las hojas de tipo acículas, como la de los pinos, tiene la capacidad de desintegrar las gotas minimizando su potencial erosivo. Sin embargo, las hojas de tipo palmadas o lobuladas poseen la capacidad de concentrar las gotas de lluvia y desprender hacia abajo gotas hasta tres veces más grandes, aumentando el poder erosivo de las mismas (García-Chevesich, 2008). Es por ello que una cobertura vegetal tupida, de varios estratos como la de la selva Paranaense de Misiones, son óptimas para aumentar la retención y disminuir la energía cinética de las lluvias, debido a que una vez satisfecho el almacenamiento por intercepción de los estratos superiores, las gotas caen hacia los estratos inferiores, alcanzando el suelo con reducida energía cinética. Suelo protegido por densa pastura y gruesas capas de materia orgánica.

Una densa cubierta vegetal, provee a la superficie y los primeros estratos del terreno una alta densidad de raíces y materia orgánica, aumentando la tasa de infiltración, la retención al escurrimiento y la rugosidad, reduciendo la velocidad del escurrimiento superficial.

Las raíces superficiales ayudan a mantener el suelo en su lugar, formando un conglomerado difícil de romper. Mientras que las raíces más profundas colaboran en la estabilidad de los taludes, disminuyendo el riesgo de movimientos en masas (Morgan, 2005).

Un elemento importante a tener en cuenta en las superficies con cubierta vegetal es la denominada "hojarasca" acumulada sobre la superficie, compuesta por hojas y ramas caídas desde los árboles y arbustos. Esta tiene la capacidad de proteger al suelo del impacto de las gotas, aumentar la capacidad de retención al escurrimiento y reducir la velocidad del escurrimiento aumentando la rugosidad de las superficies.

### **Características del flujo hídrico**

La velocidad del flujo influye fuertemente en la capacidad de erosión del escurrimiento superficial (García-Chevesich, 2008) y posee relación directa con la topografía en la que se desarrolla.

Cuando las fuerzas ejercidas por el flujo vencen a las resistivas que intenta imponer el sedimento, la partícula se pone en movimiento y comienza el denominado flujo incipiente. La velocidad en la que comienza el moverse la partícula se conoce como condición hidrodinámica crítica y puede representarse a través del valor crítico de la tensión de corte ejercida por el flujo sobre la superficie de escurrimiento (Basile, 2004). Una vez que la partícula ha sido desprendida, se necesitará menos energía para que ésta siga en movimiento (García-Chevesich, 2010).

### **Ocupación y usos del suelo**

En la actualidad, la ocupación y usos del suelo es el factor más importante que afecta la tasa de erosión. Las concentraciones de sedimentos en los cursos de agua depende, casi exclusivamente, de las actividades humanas desarrolladas dentro de las cuencas hidrográficas que los albergan, mientras que las construcciones representan la actividad humana más devastadora en términos erosivos, debido a la agresividad espacial y temporal que representa para la superficie del terreno (García-Chevesich, 2010).

Actividades como la deforestación y construcción de nuevos caminos producen alteraciones irreparables en la superficie del terreno, aumentando los excedentes hídricos superficiales y la vulnerabilidad a la erosión de las partículas de suelo.

En áreas urbanas las principales actividades que provocan aumento de la erosión son (Almeida, 2008, citado por Mendez, 2012):

- Implantación de ciudades en terrenos altamente arenosos, con relieve ondulado y pendiente acentuada de 10%, sin planeamiento adecuado.
- Retiro del suelo vegetal y construcción de edificaciones, causando la disminución del tiempo de concentración y el aumento del escurrimiento superficial.
- Falta de pavimentación y trazado deficiente de calles y sistemas de drenaje.

Sin embargo se deben diferenciar los procesos de erosión producidos en aquellas áreas urbanas consolidadas y las que se encuentran en proceso de expansión.

En las zonas urbanas consolidadas, el alto grado de impermeabilización de las superficies y la compactación de suelos desnudos disminuye la exposición y vulnerabilidad a la erosión de las partículas de suelo, reduciendo la erosión general a nivel de cuenca. Sin embargo el aumento de excedentes hídricos superficiales y la construcción de sistemas de desagüe puede provocar fuertes procesos de erosión localizada en los puntos de descarga. En cambio en zonas urbanas en expansión, donde la urbanización se encuentra avanzando sobre las áreas verdes autóctonas, la desprotección de los suelos y los incipientes sistemas de desagüe pluvial pueden provocar intensos procesos de erosión generalizados y otros localizados dentro la cuenca.

#### **2.2.1.2. Fuerzas Actuantes:**

Las aguas de lluvia y aquellas ya transformadas en escurrimiento, dentro del proceso de erosión, tienen la doble función de disgregar y transportar las partículas de suelo. La energía cinética de la lluvia, responsable de la disgregación del suelo por salpicadura, fue descrita precedentemente en el apartado anterior. El proceso de erosión hídrica por escurrimiento propiamente dicho tiene dos aspectos fundamentales a evaluar: la capacidad de la corriente para mover el sedimento y la resistencia del mismo a ser erosionado.

#### **Los parámetros que dependen de la capacidad de arrastre de la corriente son:**

La tensión de corte media: a mayor tensión media  $\tau_0$ , mayor es la capacidad del flujo de poner en movimiento las partículas. Dicha tensión está dada por la Ecuación 2.15, la cual es directamente proporcional al radio hidráulico  $R_h$  (a menor superficie mojada mayor radio hidráulico), pendiente  $S$  (mayor velocidad) y el peso del agua  $\gamma$  (influenciado por la temperatura y compuestos del mismo).

$$\tau_0 = \gamma \cdot R_h \cdot S \quad (2.15)$$

---

La estructura de la turbulencia: si dos flujos tienen la misma velocidad media pero uno tiene mayor grado de turbulencia, este tendrá mayor capacidad de incorporar las partículas al seno del flujo y arrastrarlas con ella gracias a los pulsos de velocidades tridimensionales.

**Los parámetros que dependen de la resistencia de las partículas al movimiento son:**

Las fuerzas gravitacionales: las cuales dependen básicamente del peso de la partícula y la fuerza de rozamiento que pueden generar con el lecho y las márgenes. El tamaño de la partícula juega un papel importante, las partículas de gran tamaño además de tener mayor peso están expuestas a menores fuerzas por unidad de área y mayores rozamientos en las cavidades del lecho compuesto por la misma granulometría, necesitando estar ante una corriente de mayor capacidad para comenzar el movimiento.

Las fuerzas de cohesión: en las partículas más pequeñas las fuerzas electroquímicas cohesivas prevalecen ante las gravitatorias. Estas partículas están fuertemente ligadas formando flocúlos de distintas densidades dependiendo del grado de compactación en que se encuentran. Las fuerzas de cohesión dependen de la forma, materiales componentes de las partículas, la plasticidad y el grado de compactación, además las sustancias disueltas en el fluido pueden potenciar o deshacer estas uniones.

### **2.2.1.3. Procesos erosivos en suelos granulares y cohesivos**

Como ya se hizo mención, las propiedades intrínsecas que proporcionan resistencia a los suelos son la fricción interna y la cohesión.

Las rocas, gravas, y arenas son suelos granulares, donde la resistencia está dada por la fricción entre las partículas constituyentes del suelo. Los suelos granulares son de mayor tamaño y las partículas tienden a tener una forma esférica donde predominan las fuerzas gravitacionales.

Las arcillas y limos orgánicos son suelos cohesivos, ya que tienen características de cohesión y plasticidad. Estos suelos están compuestos por partículas más finas y con forma de placas donde dos dimensiones predominan sobre la tercera. Estas características le proveen de fuerzas electroquímicas que mantienen unidas las partículas superando ampliamente a las fuerzas gravitatorias.

Las partículas se cargan negativamente en las superficies y positivamente en bordes y vértices atrayéndose entre sí fuertemente. Además el contenido de humedad y sales disueltas afectan el comportamiento mecánico de estos suelos.

En el flujo hídrico, las partículas movilizadas de un lecho granular se mueven como entidades simples. En cambio, las partículas de un lecho cohesivo se mueven generalmente formando un conjunto agregado de partículas (Basile, 2018). Suelos granulares con suficiente contenido de finos se comportan y clasifican como suelos cohesivos también.

La condición hidrodinámica crítica se define como el instante en el que el flujo comienza a mover el lecho iniciando el proceso de erosión hídrica o "movimiento incipiente". Dicha condición suele estar representada generalmente a través de un valor crítico de la tensión de corte sobre el fondo  $\tau_{bc}$  o de la velocidad de corte  $u_{*c}$ .

### Lechos de suelos granulares

Considerando un flujo turbulento uniforme que se desarrolla en un canal rectangular ancho, constituido por un lecho de sedimentos granulares de diámetro uniforme, Shields (1936) fue el primero en arribar a una expresión como la 2.16 a través de un análisis dimensional. Posteriormente, mediante una serie de experimentos de laboratorio, logro corroborar la validez de la misma para una vasta gama de partículas angulares de barita, granito, ámbar y carbón (Buffington, 1999).

$$\tau_{*c} = \frac{\tau_{bc}}{(\rho_s - \rho)g \cdot d} = f(\text{Re}_{*pc}) \quad (2.16)$$

Donde:

- $\tau_{*c}$ : tensión de corte adimensional crítica sobre el fondo [adm].
- $d$ : diámetro característico de la partícula del lecho [m].
- $\text{Re}_{*pc}$ : número de Reynolds de la partícula crítico [adm] definido por la Ecuación 2.17

$$\text{Re}_{*pc} = u_{*c} \frac{d}{\nu} \quad (2.17)$$

Donde:

- $u_{*c}$ : velocidad de corte adimensional crítica [m/s].
- $\nu$ : viscosidad cinemática [m<sup>2</sup>/s].

De acuerdo a Basile (2018), la tensión de corte crítica, correspondiente al movimiento incipiente, fue definida por Shields como aquella para la cual el transporte de fondo tiende a cero. Esto lo determinó correlacionando la tasa de transporte de sedimentos con la tensión de corte sobre el fondo y extrapolando para transporte nulo, sin embargo, algunos investigadores

argumentan que Shields pudo haber incluso utilizado, en algunos casos, el nivel de movimiento general.

En la Figura 2.10 se presentan los resultados experimentales obtenidos por Shields (1936), juntamente con datos de otros investigadores incluidos por el autor en su diagrama original, representados según la relación establecida en la Ecuación 2.16.

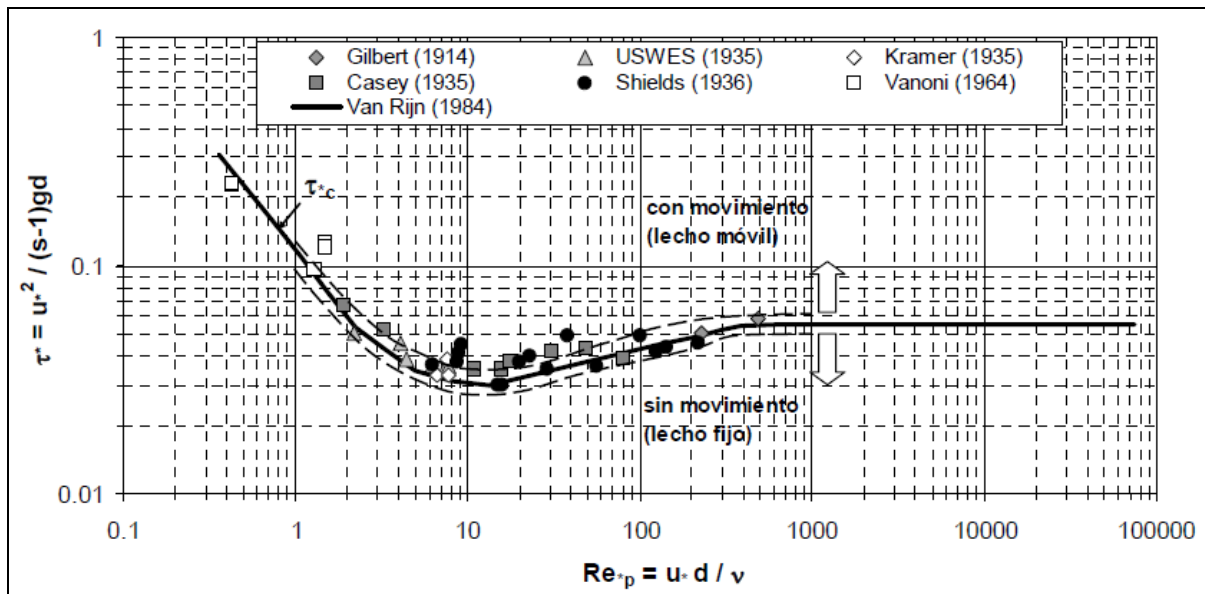


Figura 2.10. Diagrama de Shields original en el sistema de ejes  $(\tau_*, Re_{*p})$  (Basile 2018).

El primer tramo recto descendiente de la curva de Shields, hasta  $Re_{*p}=2$ , representa situaciones en las cuales el diámetro de la partícula es mucho menor al espesor de la subcapa viscosa  $\delta$ , por lo que las partículas se encuentran completamente dentro dicha subcapa sin exponerse al flujo turbulento completamente desarrollado. El último tramo horizontal, para  $Re_{*p} \geq 500$  aproximadamente, representa situaciones donde  $\delta$  es mucho menor que  $d$ , por lo tanto, las partículas se encuentran totalmente expuestas a la acción de un flujo turbulento completamente desarrollado, en esta zona  $\tau_{*c}$  constante y aproximadamente igual a 0.06, por consiguiente, la tensión de corte crítica es directamente proporcional al diámetro característico de la partícula. En tanto que, el tramo curvilíneo intermedio se corresponde con un régimen de transición, en el cual las partículas se encuentran, en parte expuestas al flujo turbulento completamente desarrollado y en parte cubiertas por la subcapa viscosa (Basile, 2018).

La curva de Shields, en el sistema de ejes coordenados de la Figura 2.10  $(\tau_*, Re_{*p})$  resulta poco útil, dado que  $u_{*c}$  debe determinarse por tanteo ya que aparece en ambas variable de los ejes cartesianos. Una forma más apropiada de representar la curva de Shields es en el sistema

de ejes  $(\tau_*, D_*)$  donde  $D_*$  es el diámetro adimensional definido por la Ecuación 2.18. En dicha ecuación  $s$  es la gravedad específica del sedimento [adm].

$$D_* = \left( \frac{\text{Re}_{*p}^2}{\tau_*} \right)^{\frac{1}{3}} = d \left[ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.18)$$

Diversas ecuaciones parametrizadas, ajustadas a diversas series de datos experimentales, han sido propuestas para representar la curva de Shields, algunas de ellas se presentan en la Figura 2.11, conjuntamente con datos de tensión de corte adimensional crítica en función de  $D_*$  para distintos criterios de inicio de movimiento (referencial, visual y competente).

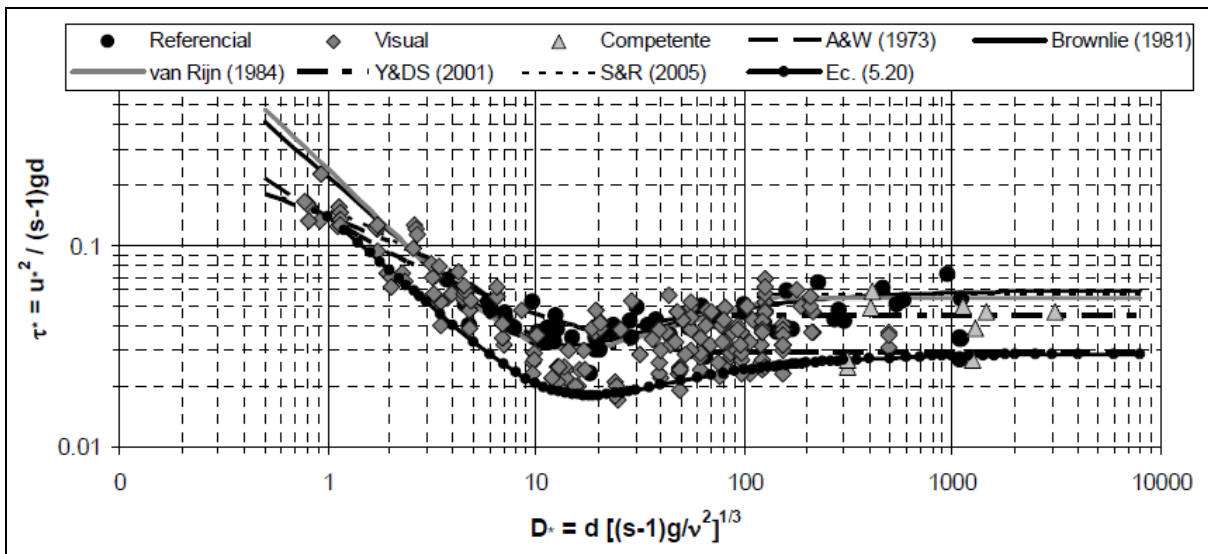


Figura 2.11. Tensión de corte adimensional crítica en función de  $D_*$  para distintos criterios de inicio de movimiento y curvas parametrizadas por diversos investigadores (Basile 2018).

La Figura 2.11, realizada por Basile (2018), presenta además una expresión envolvente desarrollada por el autor que involucra el 98% de los datos experimentales analizados. Expresión parametrizada regida por la Ecuación 2.19.

$$\tau_{*c} = 0.14D_*^{-0.9} + 0.029\text{EXP}(-18D_*^{-0.9}) \quad (2.19)$$

Según Basile (2018), se observa que dicha curva representa el límite inferior de los datos de  $\tau_{*c}$  para todo el rango de  $D_*$  (por encima de la misma se encuentra el 98 % de los datos experimentales). Particularmente se observa que, para  $D_* \geq 150$  ( $d \geq 6\text{mm}$ )  $\tau_{*c} = 0.027$  aproximadamente, y la curva tiende a  $\tau_{*c} = 0.029$  para valores elevados de  $D_*$ .

### Lechos de suelos cohesivos

Como se describió anteriormente, los suelos cohesivos resisten a la erosión por fuerzas electroquímicas, a diferencia de los suelos granulares que resisten básicamente por su peso

propio. Si bien los suelos cohesivos son más pequeños, requieren de tensiones de corte relativamente altas para ser erosionados o puesto es movimiento por acción del agua. Sin embargo, una vez desprendido, precisan de tensiones bajas para ser transportadas en suspensión en el seno del flujo hídrico.

En lo que respecta a suelos cohesivos y sus características frente a la erosión, los mismos deben ser discretizados en sedimentos cohesivos compactos consolidados y aquellos recientemente depositados no consolidados.

Por lo general, el desprendimiento de sedimentos cohesivos consolidados de un lecho se inicia de manera repentina, después de un período medianamente prolongado de la acción hidrodinámica. Dicho desprendimiento masivo de partículas en bloque se produce generalmente sin reposición de material desde aguas arriba. Por ello es más apropiado referirse a un procesos de erosión y no de movimiento incipiente, concepto que se ajusta mejor a los sedimentos granulares incoherentes (Basile, 2018).

Hoffmans y Verheij (1997) describen una serie de experimentos donde, para los autores, se evidencia que la erosión en suelos arcillosos compactos ocurre en diferentes etapas:

- Una etapa inicial donde las partículas son desprendidas individualmente
- Una etapa intermedia donde bloques y algunos conglomerados con uniones débiles son erosionados y transportados aguas abajo. Este proceso continúa y produce el desarrollo de un fondo más rugoso, lo que incrementa las pulsaciones turbulentas del flujo actuante sobre el mismo e induce fuertes vibraciones sobre las protuberancias que forman los distintos conglomerados.
- Finalmente, debido al aumento de las pulsaciones turbulentas, las uniones entre los conglomerados de mayores dimensiones son progresivamente debilitadas y destruidas, hasta que el agregado en bloque falla por fatiga y es instantáneamente desprendido y transportado por el flujo.

Los sedimentos cohesivos no consolidados, resisten tensiones corte relativamente más bajas que aquellos consolidados y presentan cierta similitud con sedimentos incoherentes, dado que puede existir un transporte activo de los mismos y consecuentemente reposición desde aguas arriba (Basile, 2018).

La Figura 2.12 presenta valores de Fuerza tractiva unitaria permisible (tensión de corte crítica) para el diseño de canales constituidos por materiales cohesivos. En dicha figura se

observa que a menor relación de vacíos (mayor compactación) mayores son las tensiones necesarias para que se desarrolle la erosión.

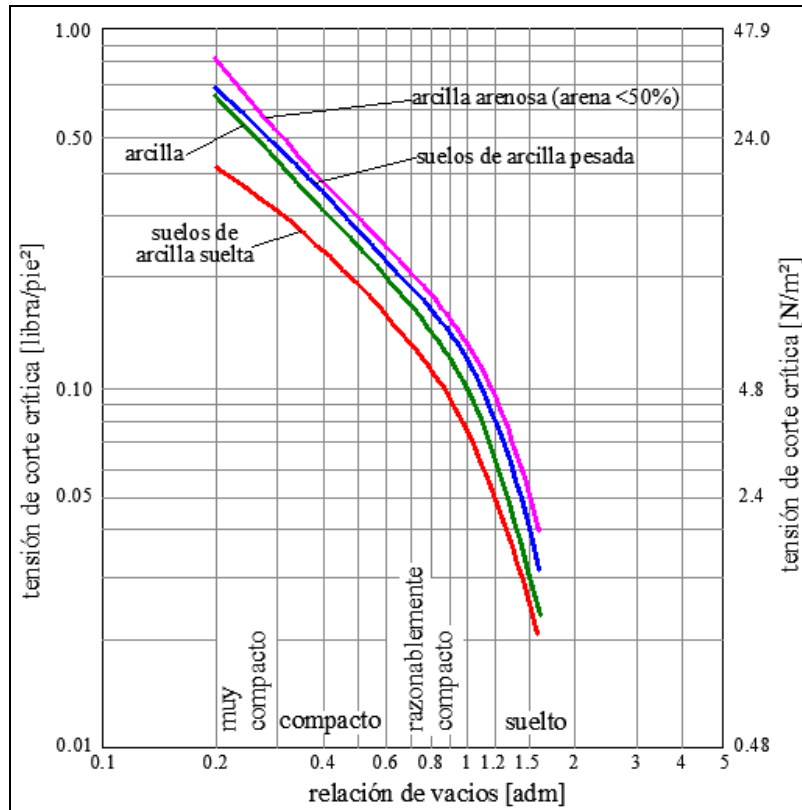


Figura 2.12. Fuerzas tractivas unitarias permisibles para canales de material cohesivo convertidas de los datos de la URSS sobre velocidades permisibles (Adaptado de Chow, 1994).

La Figura 2.13, re-elaborada por Basile (2018) mediante datos extraídos de Chow (1959) presenta relaciones de velocidad de corte crítica versus cohesión. En la misma el autor resalta que, por ejemplo, para una arcilla compacta con una cohesión  $C_0=73000 \text{ N/m}^2$ , la velocidad de corte crítica es aproximadamente  $u_{*c}=0.13\text{m/s}$  ( $\tau_{bc}=16.9\text{N/m}^2$ ). Considerando  $h=1\text{m}$  y  $n=0.028\text{s/m}^{1/3}$ , se obtiene que la velocidad media crítica de erosión es  $U_c = 1.48 \text{ m/s}$ .

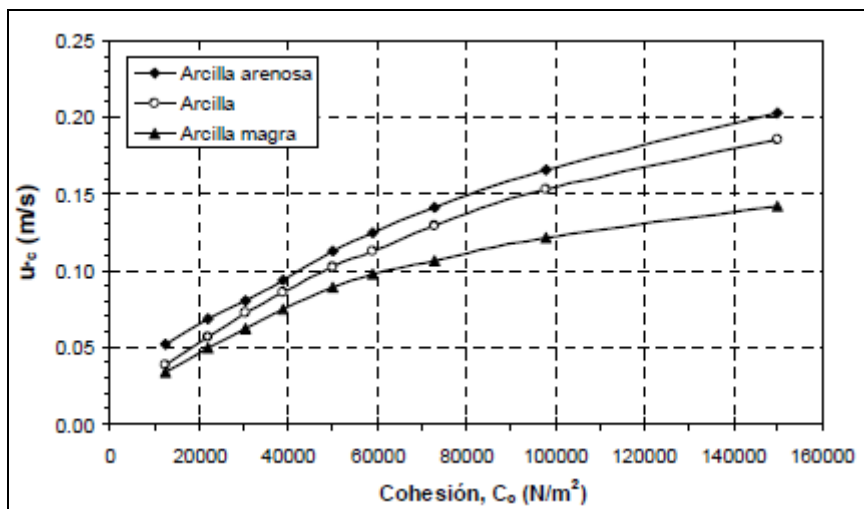


Figura 2.13. Velocidad de corte crítica versus cohesión en suelos arcillosos (Basile, 2018).

A su vez , Basile (2018) destaca que para parámetros hidrosedimentológicos plausibles de presentarse, queda demostrado que una arcilla muy compacta, con 12500N/m<sup>2</sup> de cohesión, presenta una elevada velocidad de corte crítica (2.05m/s) igual a la que presenta una grava uniforme muy gruesa de 67mm de diámetro.

La curva para arcilla, que se observa en la Figura 2.13, puede ser parametrizada mediante una función exponencial. Basile (2018) propuso la Ecuación 2.20, la cual presenta R<sup>2</sup>=0.99.

$$u_{*c} \left[ \frac{m}{s} \right] = \alpha \left( \frac{C_o}{\rho} \right)^\beta \tag{2.20}$$

Donde:

- ρ: densidad del agua en [kg/m<sup>3</sup>].
- C<sub>o</sub>: cohesión en [N/m<sup>2</sup>],
- Para arcilla arenosa: α=0.012, β=0.569.
- Para arcilla: α=0.0078, β=0.648.
- Para arcilla magra: α=0.0083, β=0.587.

En la Figura 2.14 se presentan curvas de velocidad media crítica, para h=1m y distintos valores del coeficiente de rugosidad de Manning, considerando arcillas compactas y muy compactas. En la misma se observa como las arcillas muy compactas presentan velocidades admisibles significativamente superiores.

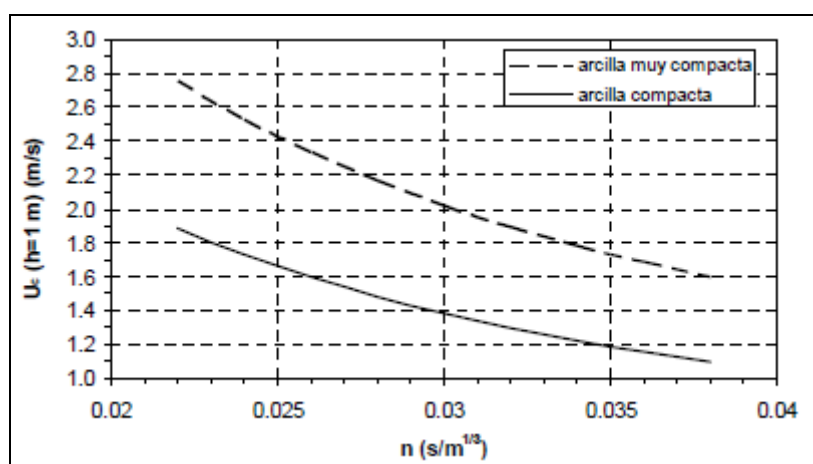


Figura 2.14. Velocidad media crítica (h=1 m) en función del coeficiente de rugosidad de Manning, para arcillas compactas y muy compactas (Basile, 2018).

Mirtskhoulava (1997) presento una ecuación para determinar la velocidad de corte crítica para suelos cohesivos. La misma contempla explícitamente la cohesión del sedimento según la Ecuación 2.21.

$$u_{*c} = \sqrt{k_1(s-1)g \cdot d_a + k_2 \frac{C_o}{\rho}} \quad (2.21)$$

Donde:

- $s$ : gravedad específica del sedimento [adm].
- $d_a$ : diámetro del agregado de partículas dispersas [m], el cual, de acuerdo a investigaciones del autor es aproximadamente 0.004m.
- $k_1$  y  $k_2$ : coeficientes dimensionales cuyos valores son 0.0121 y 0.000254 respectivamente.

La Ecuación 2.21 indica que la velocidad de corte crítica en suelos cohesivos depende del diámetro y de la cohesión de las partículas. Sin embargo, siempre prevalece el segundo término del segundo miembro de la ecuación.

En Figura 2.15 se representa la Ecuación 2.21, considerando  $s=2.7$  y tres valores de  $d_a$ , es decir, el sugerido por el Mirtskhoulava (1997) ( $d_a=4\text{mm}$ ), otro 100% mayor ( $d_a=8\text{mm}$ ) y otro 100% menor ( $d_a=2\text{mm}$ ). Para estos tres valores de  $d_a$  se observa que la variación de  $u_{*c}$  es muy pequeña, lo cual comprueba que la cohesión  $C_o$  es la que domina el proceso de inicio de erosión.

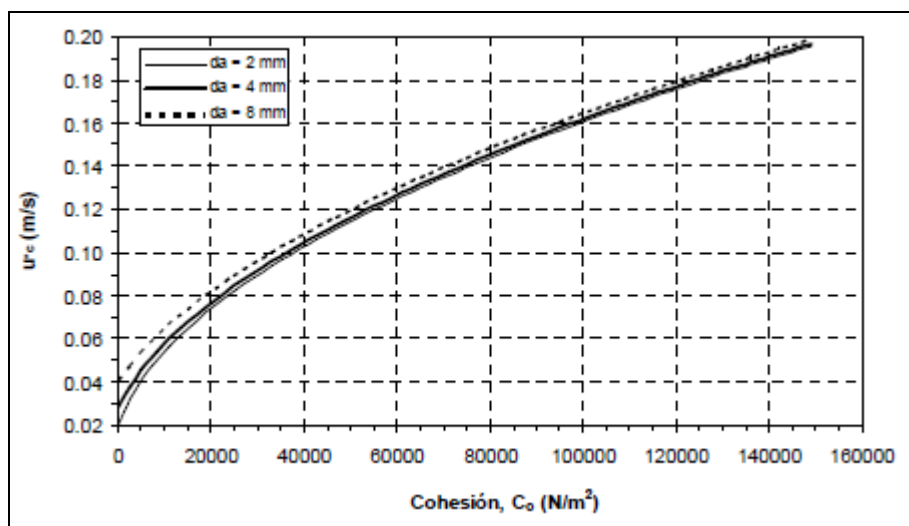


Figura 2.15. Velocidad de corte crítica en función de la cohesión, para la ecuación de Mirtskhoulava (1997), considerando  $s=2.7$  y tres valores de  $d_a$  (Basile, 2018).

Utilizando la Ecuación 2.21, para una arcilla compacta, con  $C_o=73000\text{N/m}^2$ , se estima una velocidad  $u_{*c}=0.139\text{m/s}$  (equivalente a  $\tau_{bc}=19.3\text{N/m}^2$ ), similar a la obtenida con la curva para arcilla presentada en la Figura 2.13.

A partir de la Ecuación 2.21, la velocidad media crítica de sedimentos cohesivos en una cauce, se obtiene mediante la Ecuación 2.22 (Basile, 2018).

$$U_c = \left[ 5.75 \log \left( \frac{11h}{k_s} \right) \right] u_{*c} \quad (2.22)$$

Donde:

- $h$ : profundidad del flujo [m].
- $k_s$ : altura de rugosidad equivalente, igual  $1.25d_a$ [m].

El término entre corchetes de la Ecuación 2.22 es el coeficiente de Chezy adimensional, que surge a partir del perfil logarítmico de distribución de velocidad en vertical. Por lo tanto, el diámetro del sedimento  $d_a$  interviene en las condiciones de inicio de erosión a través del primer término del segundo miembro de la Ecuación 2.21, el cual se ha demostrado que no tiene un peso dominante, y en la resistencia al flujo a través de  $k_s$ .

### 2.2.2. Erosión a nivel de cuenca

Los primeros procesos de erosión por acción del agua durante las precipitaciones ocurren en la superficie de la cuenca. Desde el impacto mismo de las gotas de lluvia sobre el suelo y la generación del flujo mamiforme en la superficie, las partículas de suelo son sometidas a esfuerzos capaces de erosionarlas. Sin embargo, no todo el sedimento producido por erosión en la cuenca alcanza el punto de control de la misma.

La erosión bruta o pérdida de suelo en la cuenca está compuesta por todo aquel material que ha sido disgregado o separado de la masa de suelo para ser incorporado al flujo hídrico. Dicha pérdida está dada por la erosión tanto por salpicadura como en lámina, como así también en pequeños flujos concentrados intermitentes que la misma erosión ha encausado en surcos y cárcavas.

Sin embargo, no todo el material erosionado se incorpora al sistema de desagüe. Parte del material se deposita en forma de abanicos aluviales, a lo largo de los cursos de agua, y en llanuras de inundación alcanzadas por las crecidas. La porción del material erosionado, que se transporta a través de la red de corriente hasta el punto donde nos interese evaluar la descarga sólida, se denomina producción de sedimentos de la cuenca (US-DI, 2006).

Dado la importancia que ha cobrado en la economía y la protección ambiental la pérdida de suelo en las cuencas, numerosas ecuaciones de predicción de pérdida de suelo han sido

desarrolladas en las últimas décadas, ecuaciones empíricas que han sido elaboradas utilizando datos recolectados en zonas geográficas específicas, limitando su aplicabilidad a zonas con similares características. La efectividad de estas formulaciones ha incentivado y permitido a investigadores de todo el mundo, aplicarlas en regiones geográficas de lo más variado, evaluado su eficiencia y calibrado los parámetros que las gobiernan según las características de cada región (Chaves, 2010).

### 2.2.2.1. Ecuación universal de pérdida de suelo

La ecuación universal de pérdida de suelo o Universal Soil Loss Equation (USLE), fue presentada por Wischmeier y Smith en 1978 y constituye una metodología para estimar la erosión superficial en parcelas agrarias, basada en el monitoreo y análisis estadístico de 47 cuencas piloto en 24 diferentes estados del centro y Este de los Estados Unidos.

Según USLE la pérdida de suelo anual por unidad de área en una parcela está dada por:

$$EH = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.23)$$

Donde:

- $EH$ : pérdida de suelo por erosión hídrica [T/(ha·año)], siendo  $T$ : toneladas métricas.
- $R$ : factor de erosividad de la lluvia y escorrentía [(MJ·mm)/(ha·h)].
- $K$ : factor de erodabilidad del suelo [(t·ha·h)/(ha·MJ·mm)].
- $L$ : factor topográfico de longitud del terreno [*admimensional*].
- $S$ : factor topográfico de pendiente del terreno [*admimensional*].
- $C$ : factor de cobertura vegetal [*admimensional*].
- $P$ : factor de prácticas de conservación del suelo [*admimensional*].

#### Factor R:

El factor de erosividad de la lluvia y escorrentía depende de la intensidad de la lluvia y del volumen total precipitado. El mismo se estima para cada tormenta significativa, generalmente mayor a 13mm de precipitación total (Wischmeier y Smith, 1978).

La determinación de  $R$  resulta del análisis pluviográficos de los eventos. Primeramente se determina el valor de la energía de lluvia  $E$  para cada intervalo de tiempo constante y posteriormente el índice de erosión  $EI$  de la tormenta. Según la metodología propuesta por Foster et. al. (1981) tenemos:

$$\begin{aligned} \text{ó} \quad e_j &= 0.119 + 0.0873 \log_{10} i_j \rightarrow i_j \leq 76 \text{ mm/h} \\ e_j &= 0.283 \quad \rightarrow i_j > 76 \text{ mm/h} \end{aligned} \quad (2.24.a \text{ y } b)$$

Donde:

- $e_j$ : energía cinética de la lluvia [MJ/(ha·mm)], para el intervalo de tiempo  $j$ .
- $i_j$ : intensidad de lluvia en el intervalo [mm/h].

La energía de la lluvia del evento resulta:

$$E = \sum e_j \cdot p_j \text{ [MJ/ha]} \quad (2.25)$$

Con  $p_j$  igual a la precipitación en mm en el intervalo  $j$ . Mientras que el índice de erosión del evento es:

$$EI = E \cdot I_{30} \text{ [(MJ·mm)/ha]} \quad (2.26)$$

Donde  $I_{30}$  es la máxima precipitación registrada en 30 minutos, expresada en mm. Finalmente el factor de erosividad anual  $R$  resulta de la suma de las  $EI$  de todos los eventos del año.

### Factor K

El factor de erodabilidad ó vulnerabilidad a la erosión del suelo se determina en función a: (i) el contenido de limo más arena muy fina (0.1-0.002mm), (ii) contenido de arcilla, (iii) contenido de arena, (iv) contenido de materia orgánica, (v) permeabilidad y (vi) textura del suelo.

El factor K puede ser determinado mediante la Ecuación 2.21 (Wischmeier y Smith, 1978):

$$K = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \quad (2.27)$$

Donde los terminas  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  se expresan como:

$$T_1 = 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 SAN \left( 1 - \frac{SIL}{100} \right) \right] \quad (2.28.a)$$

$$T_2 = \left( \frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \quad (2.28.b)$$

$$T_3 = 1 - \frac{0.25}{Cl + \exp(3.72 - 2.95Cl)} \quad (2.28.c)$$

$$T_4 = 1 - \frac{0.7SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)} \quad (2.28.d)$$

Donde:

- *SAN*: contenido de arena [%].
- *SIL*: contenido de limo [%].
- *CLA*: contenido de arcilla [%].
- *Cl*: contenido de materia orgánica [%].
- $SN1 = 1 - \left( \frac{SAN}{100} \right)$  [adm]

### Factores topográficos L y S

Los factores topográficos de longitud y pendiente del escurrimiento en la parcela fueron definido por Wischmeier y Smith (1978) como:

$$L = \left( \frac{l}{22.1} \right)^m \text{ [adm]} \quad (2.29)$$

$$S = 0.00654s^2 + 0.0456s + 0.065 \text{ [adm]} \quad (2.30)$$

Donde:

- *l*: longitud desde el inicio del escurrimiento hasta donde comienza la deposición del sedimento o el punto de control [m].
- *m*: exponente que varía según la pendiente de la cuenca. Igual a 0.5 para pendientes iguales o mayores de 5%; 0.4 para pendientes entre 3.5 y 4.5%; 0.3 para pendientes entre 1.0 y 3.0%; 0.2 para pendientes uniformes menores de 1%.
- *s*: pendiente media de la cuenca [%].

El valor de *l* representa la longitud promedio de la zona donde se desarrolla el flujo sobre el terreno en la subcuenca y se define como la inversa de la densidad de drenaje dividido 2 (Williams et al., 1976 citado por Basile et al, 2008a).

Los autores recomiendan que si la cuenca en estudio es cóncava, convexa o presenta pendientes no homogéneas en su superficie, es aconsejable subdividir en subcuencas de pendiente uniforme.

### Factor C

El factor de cobertura vegetal contempla la reducción de la erosión debido a la existencia de plantas sobre la superficie del terreno. Dicho factor varía de 0 a 1 y define la relación entre la erosión de la parcela en estudio y la erosión de la parcela estándar, con suelo desnudo (Wischemier y Smith, 1978).

El valor de *C* depende del tipo de vegetación y la fase de crecimiento en la que se encuentra, por lo que engloba la interacción de factores biológicos, químicos, físicos y de prácticas de manejo de los cultivos. La complejidad de tales interacciones hacen imposible la determinación objetiva del verdadero valor de *C* (Lane et al., 1983 citado por Basile et al., 2008a).

Para cultivos permanentes el valor de *C* es constante durante el año, no así para cultivos de cosecha anual. La determinación de *C* resulta de importancia debido a que puede ser alterado. El mismo puede ser modificado con la finalidad de minimizar las pérdidas de suelo en un manejo adecuado de la cuenca.

Los valores del factor de cobertura vegetal propuestos por Wischmeier y Smith (1978) para diferentes tipos de cobertura vegetal se presentan en las Tabla 2.3 a 2.5.

**Tabla 2.3.** Factor *C* para cultivos anuales según el tipo de cultivo, crecimiento vegetativo y cobertura (Wischmeier y Smith, 1978).

Cultivo y cobertura	Crecimiento vegetativo (CV)					
	Preparación del terreno	Siembra hasta 10 % CV	Crecimiento 10-50 % CV	Desarrollo 50-70 % CV	Madurez 80-90 % CV	Cosecha
Maíz sin residuos	0.690	0.770	0.680	0.490	0.350	0.740
Maíz con residuos		0.510	0.430	0.360	0.240	0.470
Maíz con residuos en curvas de nivel			0.250	0.240	0.220	
Frijoles con residuos		0.450	0.680	0.600	0.240	
Matorrales. altura 4 m. cobertura 25 %		0.230	0.140	0.091	0.042	
Pasto ralo cobertura 25 %		0.200	0.140	0.038	0.013	
Pasto cobertura 75 %		0.170	0.060	0.032	0.011	
Bosque cobertura 75-100 %					0.001	
Bosque cobertura 45-75 %					0.003	
Bosque cobertura 20-40 %				0.006		

**Tabla 2.4.** Factor C para áreas boscosas inalteradas según cobertura y condiciones del suelo (Wischmeier y Smith, 1978).

Cobertura dosel y sub-bosque	Cobertura superficial mayor a 5 cm	Factor C
100-75	100-90	0.0001-0.0010
70-45	85-75	0.0020-0.0040
40-20	70-40	0.0030-0.0090

Dosel: copa y región superior de los árboles en un bosque,

Sub-bosque o sotobosque: conjunto de vegetación que crece por debajo del dosel.

**Tabla 2.5.** Factor C para áreas boscosas quemadas según cobertura y condiciones del suelo (Wischmeier y Smith, 1978).

Cobertura superficial	Condición del suelo <sup>(*)</sup> y cobertura vegetal <sup>(**)</sup>							
	Excelente		Bueno		Regular		Pobre	
[%]	SV	VH	SV	VH	SV	VH	SV	VH
0	0.25	0.1	0.26	0.1	0.31	0.12	0.45	0.17
10	0.23	0.1	0.24	0.1	0.26	0.11	0.36	0.16
20	0.19	0.1	0.19	0.1	0.21	0.11	0.27	0.14
40	0.14	0.09	0.14	0.09	0.15	0.09	0.17	0.11
60	0.08	0.06	0.09	0.07	0.10	0.08	0.11	0.08
80	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06	0.05

<sup>(\*)</sup> Condición del suelo: Excelente: muy estable, con raíces y residuos; Bueno: moderadamente estable, trazas de residuos; Regular: altamente inestable, sin residuos; Pobre: sin suelo superficial, sin residuos.

<sup>(\*\*)</sup> Cobertura vegetal: SV: sin vegetación viva; VH: 75% cubierto de pasto o hierbas con caída de 50cm.

## Factor P

El factor de prácticas de conservación del suelo refiere a los manejos de cultivos en vista a la minimizar la erosión de las parcelas. Un factor igual a 1, representa a la erosión factible de suceder en la parcela estándar, donde las cárcavas de los cultivos están dispuestas perpendicular a las curvas de nivel, sin límites en la longitud de los líneas de cultivo, situación que maximiza los procesos de erosión dada las altas velocidades y caudales que se desarrollan.

Para disminuir el factor P, se debe plantar en terrazas o siguiendo las curvas de nivel, a modo de reducir las velocidades del flujo y retener localmente los sedimentos que pueden llegar a generarse. La Tabla 2.6 presenta valores de P propuestos por Wischmeier y Smith (1978) de acuerdo a las pendientes del terreno y las prácticas conservacionistas aplicadas.

**Tabla 2.6.** Factor *P* para cultivos en terrazas y curvas de nivel (Wischmeier y Smith, 1978).

<i>Pendiente</i> [%]	<i>Cultivos en terrazas</i> <sup>(*)</sup>	<i>Cultivos en curvas de nivel</i> <sup>(**)</sup>	
	<i>P</i>	<i>Longitud máxima</i> [m]	<i>P</i>
1 a 2	0.30	120	0.6
3 a 5	0.25	90	0.5
6 a 8	0.25	60	0.5
9 a 12	0.30	36	0.6
13 a 16	0.35	24	0.7
17 a 20	0.40	18	0.8
21 a 25	0.45	15	0.9

<sup>(\*)</sup>Factor para erosión dentro de las terrazas.

<sup>(\*\*)</sup>Factor para erosión en curvas de nivel y entre terrazas.

### Relaciones de Emisión de Sedimentos

Como se describió anteriormente, no todo el sedimento producido por erosión en la cuenca alcanza el punto de control de la misma. La pérdida de suelo *EH* estimada por la USLE debe ser afectada por la relación de erogación de sedimentos *RES*. En este contexto, las relaciones más difundidas son (Kohli et al., 2014):

$$\text{Vanoni (1975): } RES = 0.470A^{-0,125} \tag{2.31.a}$$

$$\text{US-DA (1979): } RES = 0.566A^{-0,11} \tag{2.31.b}$$

$$\text{Williams y Berndt (1972): } RES = 0.627SLP^{0,403} \tag{2.31.c}$$

Siendo *A* el área de cuenca en km<sup>2</sup> y *SLP* la pendiente media ponderada del curso principal en porcentaje. Finalmente la descarga específica resulta *DE = RES·EH*.

#### 2.2.2.2. Ecuación universal modificada de pérdida de suelo

Sobre la base de que el escurrimiento superficial es un mejor indicador de la producción de sedimentos que la lluvia, debido a que puede presentarse precipitación sin generación de escorrentía, Williams (1975) citado por (US-DI, 2006) modifico la USLE reemplazando el factor *R* por un factor de escorrentía definido como una función del caudal pico y el volumen de escurrimiento directo total generado por la tormenta analizada.

La producción neta de sedimentos durante una precipitación según a ecuación universal modificada de pérdida de suelo, MUSLE según sus siglas en inglés, es:

$$DE_e = \alpha (VQ_p)^\beta \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \tag{2.32}$$

Donde:

- $DE_e$ : descarga específica por evento [T/ha], siendo  $T$ : toneladas métricas.
- $V$ : volumen de escurrimiento directo del evento [ $m^3$ ].
- $Q_p$ : caudal pico del evento [ $m^3/s$ ].
- $\alpha$  y  $\beta$ : coeficientes con valores 11.8 y 0.56 respectivamente.
- $K, L, S, C$  y  $P$ : son los mismos factores definidos para la USLE.

La Ecuación 2.26 es empírica y estima exclusivamente la erosión superficial, sin contemplar los procesos de erosión en cauces ni remoción masiva de sedimentos (Basile et al., 2008a). La utilización de la MUSLE produjo predicciones de producción de sedimentos más precisos que la USLE, especialmente para eventos de gran precipitación. Sin embargo, la utilidad de la MUSLE depende en gran medida de la exactitud de las variables hidrológicas de entrada (US-DI, 2006), por lo que la implementación de la misma es solo justificable en regiones donde las variables hidrometeorológicas de los eventos pluviográficos se encuentren discretizados en periodos de tiempo subdarios, registrados con metodología e instrumentales confiables.

Esta formulación de la MUSLE, exhibe analogía con expresiones de transporte global de sedimentos en un evento como la que presenta Basile (2018), donde el transporte instantáneo de sedimentos es expresado como el producto de un factor hidrológico instantáneo, un factor morfológico y un factor sedimentológico según:

$$Q_t = \sum_{i=1}^N Q_{ti} = \alpha_s \cdot \Pi_S \cdot \Pi_M \cdot \Pi_{HI} \quad (2.33)$$

Donde:

- $Q_t$ : transporte instantáneo volumétrico de sedimentos.
- $Q_{ti}$ : transporte instantáneo volumétrico de sedimentos sobre el número de clases granulométricas  $N$ .
- $\alpha_s$ : coeficientes de proporcionalidad.
- $\Pi_S$ : factor sedimentológico.
- $\Pi_M$ : factor morfológico.
- $\Pi_{HI}$ : factor hidrológico instantáneo.

Para determinar el transporte global de sedimentos producido por un evento se requiere integrar la Ecuación 2.33 sobre la duración del hidrograma. Si se considerando que, durante el tránsito de la crecida, los factores morfológicos y sedimentológicos no sufren significativas alteraciones (hipótesis razonable en eventos hidrológicos ordinarios) el transporte de sedimentos queda únicamente en función de  $\Pi_{HI}$ .

Finalmente, asumiendo un hidrograma simplificado triangular, con caudal pico  $Q_p$  y un caudal base igual a cero, puede demostrarse que el factor hidrológico instantáneo queda definido por la Ecuación 2.34, similar a la MUSLE.

$$\Pi_{HI} = Q_p^\alpha V \quad (2.34)$$

Donde  $\alpha$  es una constante y  $V$  es el volumen total de exceso de precipitación.

Finalmente, reemplazando la Ecuación 2.34 en la 2.33 obtenemos una expresión para la erogación total de sedimentos (Ecuación 2.35), similar a la MUSLE.

$$DE_e = \alpha_s \cdot \kappa \cdot Q_p^\alpha V \quad (2.35)$$

Donde  $\kappa$  es una constante que engloba los factores sedimentológicos y morfológicos.

### 2.2.2.3. Revisiones a la ecuación universal de pérdida de suelo

Debido a las simplificaciones que propone la USLE referidas a la homogeneidad de los parámetros de la ecuación de producción de sedimentos, surgieron diversas teorías a fin de profundizar en las relaciones entre la pérdida de suelo y los diferentes estados del sistema a lo largo de periodos prolongados de tiempo (Renard et al., 1991 y 1997; Foster et al, 1999).

Con investigaciones adicionales, experimentos, datos y nuevos recursos tecnológicos disponibles, los investigadores continúan intentando mejorar la USLE, lo que llevó al desarrollo de la Revisión de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE). Esta última tiene la misma fórmula que USLE, pero incorpora una serie de mejoras para determinar cada uno de los factores que la comprenden. Estos incluyen mapas nuevos y revisados; un enfoque variable en el tiempo para el factor de erodabilidad del suelo; un nuevo enfoque para evaluar el factor de gestión de cobertura; una nueva ecuación para evaluar la influencia de la pendiente; y nuevos valores para las prácticas de conservación.

Las diversas variantes de la RUSLE son modelos de erosión diseñado para predecir la pérdida promedio anual de suelo producto de la precipitación durante prolongados periodos de tiempo, en lotes con cultivos definidos y sistemas de manejo especificados, como así también

en pastizales y condiciones no agrícolas tales como sitios de construcción con marcados cambios a lo largo del tiempo (Renard et al., 1997).

Este modelo presenta diversas teorías para determinar los parámetros característicos de la USLE, los cuales pueden ser considerados como valores medios de los distintos estados del sistema en el tiempo.

Entre las consideraciones más relevantes de los métodos se observa que la RUSLE contempla que la pérdida de suelo en una pendiente de campo puede variar a lo largo de la misma. En una pendiente larga y uniforme, la pérdida desde la parte superior es menor que la media y la erosión cerca del final es considerablemente más alta.

Por otro lado, la RUSLE puede calcular la pérdida promedio de suelo para un sistema multipropósito, para un año de cultivo determinado en una rotación, o para un período de etapa del cultivo particular dentro de un año de cosecha.

### **2.2.3. Erosión generalizada a nivel de cauce**

Similar a lo expuesto en el apartado 2.2.1.2 de este capítulo, la erosión generalizada en cauces de suelo cohesivo es controlada por dos juegos de fuerzas: (i) las fuerzas hidráulicas, las cuales rompen y remueven las partículas del lecho, (ii) y las fuerzas resistentes. Las primeras, llamas también fuerzas tractivas, dependen de la tensión de corte media y de la estructura de la turbulencia próxima al lecho. Mientras que las fuerzas resistentes son predominantemente de naturaleza electroquímica.

#### **2.2.3.1. Fuerza tractiva**

Bajo un concepto más general que la Ecuación 2.15, la tensión de corte media sobre el lecho de un cauce puede ser calculada en función de la pendiente hidráulica  $S_h$  como:

$$\tau = \gamma \cdot R_h \cdot S_h \quad (2.36)$$

En casos donde la pendiente hidráulica no se presenta explícitamente puede resultar ventajoso establecer la tensión de corte en función a la velocidad media del flujo. La velocidad según la ecuación de Manning establece:

$$V = \frac{1}{\eta} S_h^{1/2} R_h^{2/3} \quad (2.37)$$

Despejando la pendiente hidráulica de la ecuación anterior tenemos:

$$S_h = \frac{V^2 \eta^2}{R_h^{4/3}} \quad (2.38)$$

Si sustituimos la pendiente por su equivalente en términos de velocidad media del flujo se llega a la siguiente ecuación:

$$\tau = \gamma \frac{V^2 \eta^2}{R_h^{1/3}} \quad (2.39)$$

### 2.2.3.2. Método Lischtván y Lebediev

La erosión general en cursos puede ser evaluada por el método de Lischtván y Lebediev, el cual se basa en la determinación de la condición de equilibrio entre la velocidad media del flujo en una franja  $U_m$  y la velocidad media necesaria para comenzar a erosionar el lecho  $U_{me}$ . (Pouey, 1998)

#### Velocidad media del flujo

Este método considera que la velocidad media del flujo disminuye a medida que se profundiza el fondo. Al suponer un caudal constante, el radio hidráulico aumenta profundizándose el cauce por erosión del lecho, mientras que las márgenes permanecen inalteradas.

La velocidad media para una franja o línea vertical está dada por la Ecuación 2.40:

$$U_m = \alpha_u \frac{d_0^{5/3}}{d_s} \quad (2.40)$$

Donde:

- $U_m$ : Velocidad media en la vertical para  $d_0$  [m/s].
- $d_0$ : profundidad inicial [m].
- $d_s$ : profundidad final del fondo erosionado [m].
- $\alpha_u$ : es un coeficiente determinado por la Ecuación 2.41.

$$\alpha_u = \frac{Q_d}{\mu \cdot B_e \cdot d_m^{5/3}} \quad (2.41)$$

Con:

- $Q_d$ : caudal de diseño o máximo de la crecida para la cual se desea calcular la erosión [ $m^3/s$ ].
- $\mu$ : coeficiente que tiene en cuenta las construcciones laterales producida por los obstáculos. Si no hay obstáculos  $\mu = 1$ .
- $B_e$ : ancho efectivo de la superficie libre [m].
- $d_m$ : tirante medio calculado como  $A/B_e$ .
- $A_m$ : área hidráulica o mojada para  $Q_d$ .

Para que los caudales unitarios permanezcan constantes, como lo plantea este método, la rugosidad a lo ancho de la sección debe ser uniforme, al igual que la del material del subsuelo que se va descubriendo por la erosión.

### Velocidad media erosiva

La velocidad media mínima necesaria para erosionar el lecho de un cauce puede ser evaluada mediante las formulaciones propuestas por Maza según (Pouey, 1998):

$$U_{me} = 0.000173 \cdot \beta_u \cdot \gamma_d^{1.18} \cdot d_s^{66.28/\gamma_d^{0.725}} \text{ [m/s]} \quad (2.42)$$

Donde:

- $\gamma_d$ : peso específico seco del material del lecho o peso volumétrico seco. Igual al peso seco de la muestra entre su volumen inicial [ $kg/m^3$ ].
- $\beta_u$ : coeficiente que considera el periodo de retorno del caudal de diseño. Para periodo de retorno entre 15 y 1500 años puede utilizarse la Ecuación 2.43.

$$\beta_u = 0.8416 + 0.03342 \cdot \ln T \quad (2.43)$$

Con:

- $T$ : periodo de retorno [años].
- $\ln$ : logaritmo natural

La Tabla 2.7 presenta magnitudes de referencia para velocidades admisibles en suelos rocosos y cohesivos, según el Laboratorio de Hidráulica de Leningrado (BOGDEO) (Pouey, 1998).

**Tabla 2.7.** Velocidades admisibles de referencia para distintos suelos  
(BOGDE, citado por Pouey, 1998).

Tipo de suelo	Profundidad del flujo [m]					
	1	3	5	10	15	20
	Velocidad admisible del suelo [m/s]					
<i>Limos poco compactos</i>	0.35	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
<i>Limos medianamente compactos</i>	0.70	0.90	0.95	1.10	1.20	1.25
<i>Limos compactos</i>	1.05	1.30	1.45	1.65	1.80	1.90
<i>Arcillas poco compactadas</i>	0.40	0.50	0.55	0.65	0.70	0.75
<i>Arcillas medianamente compactadas</i>	0.85	1.05	1.15	1.35	1.45	1.55
<i>Arcillas compactadas</i>	1.20	1.50	1.65	1.90	2.05	2.20
<i>Alebolita chica</i>	0.50	0.60	0.70	0.80	0.85	0.90
<i>Alebolita media</i>	1.00	1.25	1.40	1.60	1.70	1.80
<i>Alebolita grande</i>	1.50	1.90	2.05	2.40	2.60	2.70
<i>Caliza grande en estratos</i>	3.50	4.40	4.85	5.50	6.00	6.32
<i>Caliza grande sin estratos</i>	5.00	6.25	6.90	7.90	8.60	9.10
<i>Suelo arenoso calizo</i>	3.50	4.40	4.85	5.50	6.00	6.35
<i>Suelo arenoso dolomítico</i>	5.00	6.25	6.90	7.90	8.60	9.10
<i>Granito</i>	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00

## 2.2.4. Sedimentos y contaminantes en cuencas urbanas

### 2.2.4.1. Problemáticas de cuencas urbanas de cabecera

Los procesos de expansión urbanística de los últimos siglos, además de modificar la respuesta hidrológicas de las cuencas, con mayores volúmenes de escurrimiento superficial y el aumento de las velocidades del flujo, han contribuido al deterioro de la cobertura natural de los suelos, con cada vez más área permeables con baja cobertura vegetal o inclusive suelos expuestos sin cobertura (Zambrano Najera y Gómez Valentín, 2015).

Dadas estas condiciones, los suelos son más fácilmente erosionables, incrementándose el volumen de suelo erosionado el cual es transportado y depositado en el sistema de desagüe, ya sea natural o artificial. Estos sedimentos pueden ocasionar significativos problemas en el funcionamiento del sistema de desagüe, puesto que disminuyen su capacidad hidráulica o, inclusive pueden colmatar las estructuras superficiales de retención del flujo y/o sólidos, agravando aún más las problemáticas del flujo superficial, como los fenómenos de inundación y contaminación crónicas de los cuerpos de agua receptores.

Estas problemáticas resultan más marcadas en zonas urbanas donde se presenta un rápido y desordenado crecimiento urbano, a la vez que existen condiciones hidrológicas adversas, como lluvias intensas y cuencas pequeñas con fuerte pendiente (Arandes, 1992). Situación

que se presentan en las cuencas urbanas sobre la Sierra Central de Misiones, como el área urbana de Oberá.

De esta manera, cobra cada vez mayor relevancia el análisis de la producción de sedimentos en las cuencas urbanas, evidenciándose la importante de reconocer las zonas de mayor producción, así como los procesos que lideran dicha producción. Por tal razón, las cuencas urbanas de cabecera resultan de especial importancia, ya que al tener cobertura vegetal natural aportan la mayor cantidad de sedimentos inorgánicos que se incorporan al sistema de desagüe, pudiendo llegar a ser cerca del 80% del total de sedimentos aportados (Seco, 2014).

Por otro lado, resulta imprescindible determinar las zonas más críticas de una ciudad respecto a la producción de sedimentos, bien sea por su alta posibilidad de aportar sedimentos (suelos desnudos) o por la alta erodabilidad de dichos suelos (altas velocidades). Por tanto, adicional a una correcta estimación de la producción de sedimentos se hace necesario poder visualizar la dinámica espacial del fenómeno de generación y deposición de sedimentos (Zambrano Najera y Gómez Valentín, 2015).

#### **2.2.4.2. Acumulación y arrastre de poluentes**

La urbanización provoca un aumento de las cantidades de poluentes en las cuencas hidrográficas, donde se destaca la materia orgánica, bacterias, metales pesados, hidrocarburos, pesticidas y sedimentos. El aumento en las velocidades y volúmenes de escurrimiento, transportando tales poluentes puede causar severos impactos, que presentan consecuencias onerosas debido a que perjudican los cuerpos de agua receptores y afectan las condiciones sanitarias de la población (Dotto et al, 2007).

Las fuentes de generación de sedimentos en áreas urbanas, presentan una complejidad adicional respecto de las áreas naturales (Figura 2.16). Los diversos contaminantes y sedimentos puede ser provenientes de fuentes locales o bien importadas, incluso de área lejanas.

Además de la erosión propiamente dicha de las superficies permeables, las superficies impermeables presentan una deposición creciente en el tiempo durante los días sin lluvia de poluentes que pueden ser removidos y transportados por el escurrimiento superficial durante las tormentas. La tasa de remoción y transporte de sedimentos en las áreas impermeables durante los eventos pluviográficos depende de la disponibilidad de material.

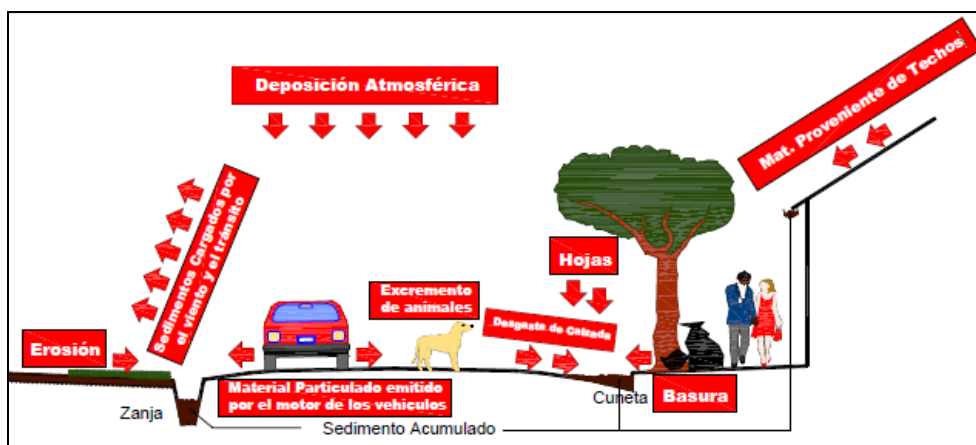


Figura 2.16. Fuentes de poluentes en áreas urbanas (Butler y Clark, 199,5 citado por Dotto, 2006).

La acumulación de sedimentos en las áreas impermeables de la urbanización puede ser expresada en unidades de [masa/(día área)], [masa/(día longitud de cunetas)] o bien [masa/día]. A su vez, el fenómeno puede ser descrito por distintos modelos de acumulación del tipo, lineal, potencial, exponencial o de saturación también conocidas como ecuación de Michaelis-Menton, los cuales se presentan la Figura 2.17.

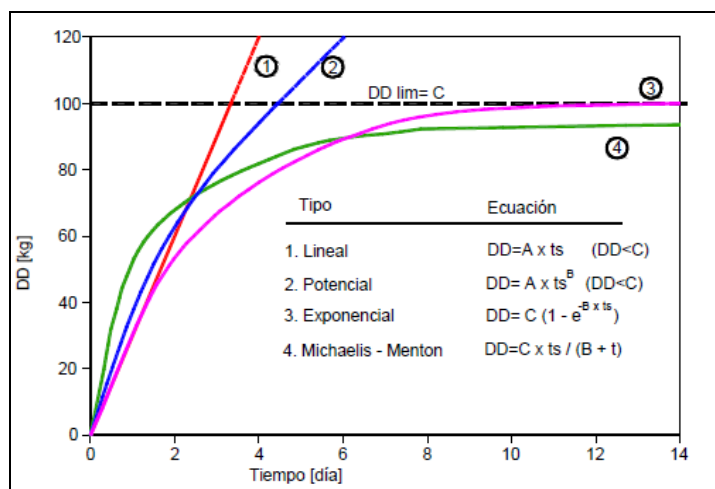


Figura 2.17. Modelos de acumulación de sedimentos (Huber y Dickinson, 1988, citados por Mendez, 2012). Referencias: (DD) polvo y suciedad; (ts) tiempo seco; (B) parámetro de ajuste; (C) acumulación máxima.

La Tabla 2.8 presenta valores diarios de acumulación lineal de sedimentos en cunetas de calle para distintos investigadores citados por Mendez (2012).

Tabla 2.8. Modelos de acumulación lineal adoptados por longitud de cuneta (Adaptado de Mendez, 2012).

Investigador	Ubicación	Usos de suelo	Polvo y suciedad acumulada [g/(m día)]
American Public Works Association APWA (1969)	Chicago (Estados Unidos)	Residencial-Unifamiliar	10.42
		Residencial-multifamiliar	34.23
		Comercial	49.11
		Industrial	68.46
		Sin desarrollar o parques	22.32
Zafra Majía (2009)	Torrelavega (España)	Residencial (densidad baja)	1.64
		Residencial (densidad alta)	2.53

Por otro lado Sartor et al. (1972), citado por Deletic (1998), sugieren una relación exponencial según la Ecuación 2.44.

$$M(t) = M_0 \left(1 - e^{-k(t_{seco} + t)}\right) \quad (2.44)$$

Donde  $M(t)$  es la acumulación de sólido disponible en la superficie para un tiempo  $t$  transcurrido desde el inicio de la primera lluvia en  $g/m^2$ ,  $t_{seco}$  es periodo de tiempo sin precipitaciones precedente al instante analizado y  $t^*$  es el tiempo virtual calculado asumiendo que la disposición de sedimentos es cero a  $t^*$  días antes del inicio de la precipitación antecedente. En la Ecuación 2.33  $M_0$  es la máxima cantidad de sedimento que se puede acumular en la superficie y  $k$  es la constante de acumulación. Ambos parámetros debe ser calibrados para cada cuenca en particular.

Investigadores de todo el mundo han aptado por el modelo propuesto por Sartor. Algunos de los parámetros ajustados para dicho modelo se presentan en la Tabla 2.9. Cabe mencionar que la ciudad de Santa María, Estado de Rio Grande do Sul, Brasil limita con la provincia de Misiones presentando características hidromorfológicas similares a la zona de estudio.

**Tabla 2.9.** Modelos de acumulación exponencial adoptados por unidad de área en calles (Adaptado de Mendez, 2012).

Investigador	Ubicación	Usos de suelo	$M_0[g/m^2]$	$k[1/día]$
Deletic (1997 y 2000)	Dunde (Escocia)	Residencial (estacionamiento)	27	0.015
		Comercial (tránsito de vehículos alto)	100	0.100
	Belgrado (Rep. Serbia)	Residencial (tránsito de vehículos medio)	10	0.045
	Lund (Suecia)	Residencial (estacionamiento)	18	0.015
Dotto (2006)	Santa María (Brasil)	Residencial (tránsito de vehículos alta)	140	0.200
		Residencial (tránsito de vehículos bajo)	160	0.180

### 2.2.4.3. Importancia de la limpieza de calles

Un apartado especial merece la limpieza de calles, cuya eficiencia de lavado depende fundamentalmente del tipo de mecanismo empleado.

Según Ranchet y Ruperd (1983), citados por Mendez (2012), el 50% del peso total de sedimentos acumulados puede eliminarse por barrido manual, mientras que con barredoras de vacío o por aspiración puede alcanzarse el 93%. Además, la aspiración recoge las partículas más finas, responsables del mayor grado de contaminación del escurrimiento pluvial urbano por absorción de poluentes.

La limpieza de calles no solo representa una cuestión estética, sino que contribuye al control de residuos sólidos y de contaminantes factibles de reducir la calidad de los cuerpos de agua receptores del desagüe pluvial.

#### 2.2.4.4. Fenómeno del primer flujo

El fenómeno del primer flujo en la respuesta del sistema pluvial ante un evento pliviográfico, se evidencia al encontrarse mayores concentraciones de poluentes, durante los primeros instantes de la precipitación, aun cuando intensidades y caudales mayores se den con posterioridad.

El estudio del mismo resulta de fundamental importancia para el diseño de unidades de tratamiento de efluentes pluviales o de sistemas combinados pluvio-cloacales (Mendez, 2012).

En la Figura 2.18 puede observarse muestras de aguas pluviales, obtenidas en una cuenca urbana de la ciudad de Porto Alegre, Brasil.



*Figura 2.18. Muestreo de calidad de agua pluvial en Porto Alegre, Brasil (Tucci, 2007).*

En la figura anterior, dispuestas en sentido horario siguiendo la cronología de su captura, iniciando la precipitación con la botella en posición del reloj 45 min, se evidencia una pequeña concentración de sólidos disueltos al instante inicial de la tormenta, luego un marcado crecimiento de los mismos, para posteriormente disminuir hacia el final del evento.

Tucci (2007) considera que durante los primeros 25mm de lluvia, generalmente se concentra el 95% de la carga en suspensión. Sin embargo las causas que generan el fenómeno del primer flujo varían según las características de las cuencas.

Se sugiere que el control de la primera descarga es una medida crítica en la reducción de la contaminación de las aguas pluviales urbanas

Li et al. (2007) estudiaron el fenómeno del primer flujo en una cuenca urbana de clima subtropical en la ciudad de Wuhan, China. La cuenca en estudio posee área de 4.8km<sup>2</sup>, con 85% de impermeabilidad y una densidad poblacional estimada en 130 habitantes por hectárea, con un clima tipo monzónico subtropical y 1300mm de precipitación media anual.

Como resultado de los 8 eventos analizados los autores determinaron que, interceptar el primer 30% de la escorrentía superficial, puede eliminar el 62% del total de sólidos disueltos y la mayoría de otros poluentes. Además establecieron que, a mayor cantidad de días secos previos a la tormenta, mayor es la carga de contaminantes en el flujo.

## 2.2.5. Modelación de la producción de sedimentos

### 2.2.5.1. Estado del arte

Para estimar los procesos de erosión a escala de cuenca son generalmente usados modelos determinísticos, los cuales a su vez, según Basile et al. (2010), pueden ser clasificados en empíricos, conceptuales, de base física o una combinación de ellos, de acuerdo a la profundidad del abordaje. En función de la escala de tiempo pueden ser clasificados en continuos o de eventos. Por otro lado, de acuerdo a la representación de los parámetros del modelo, las variables de estado, las condiciones de borde y los datos de entrada y salida, los modelos pueden definirse como agregados, distribuidos o semidistribuidos (Basile et al., 2010; Lane et al., 1988; Singh y Woolisher, 2002; Borah y Bera., 2003).

Los modelos **empíricos** o paramétricos son aquellos que, mediante formulaciones empíricas, pretenden interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos. Son más simples que los conceptuales y de base física y, en general, requieren menor cantidad de datos. Son modelos de lógica inductiva y, generalmente, de aplicación únicamente a las condiciones para los que fueron desarrollados y calibrados. Además, asumen la condición de que el sistema se encuentra invariante durante el experimento (Almorox Alonso et al., 2010).

Los modelos **conceptuales** se basan en los mismos principios que lo de base física, pero permiten una mayor adaptación a la realidad integrando modelos hidrológicos, de erosión y de transporte de sedimentos, para obtener generalmente como resultado, la emisión de sedimentos a la salida de la cuenca. Los mismos representan un papel intermedio entre los modelos empíricos y de base física (Almorox Alonso et al., 2010), si bien son capaces de

describir los procesos fundamentales que gobiernan la erosión y requieren una caracterización de la dinámica de la cuenca, no alcanzan el nivel de detalle de descripción del fenómeno como los de base física.

Los modelos de **base física** incorporan en su análisis leyes de conservación de masa y energía, utilizando la ecuación de continuidad para representar un estado de la conservación de la materia y su transformación en el espacio y tiempo (De Regoyos, 2003, citado por Pizarro et al., 2009). Estos modelos, consideran que se produce deposición una vez superada la capacidad de transporte del flujo superficial o del canal. Además, describen detalladamente, a lo largo de toda la unidad de discretización, el movimiento de las partículas desagregadas o depositadas, siendo diferentes las ecuaciones utilizadas por cada uno.

La modelación empírica es útil para la estimación de producción de sedimentos en forma continua en áreas que puedan ser evaluadas de manera agregada. Resulta de utilidad para realizar las primeras estimaciones del comportamiento del sistema y la tasa de erosión general a escala anual o plurianual.

En cuencas urbanas de cabecera (hillslope), se requiere la descripción detallada de la variabilidad espacial y temporal de las propiedades de la cuenca y de la precipitación, y por tal razón, los modelos en base física distribuidos son los más apropiados para este tipo de análisis (Zambrano Najera, 2015). Sin embargo, diversos autores proponen que estos últimos deben ser aplicados de manera cuidadosa porque al ser más complejos, presentan problemas de sobre parametrización, solicitud de datos poco realistas y/o condiciones de aplicación no extrapolables a otras regiones (Merrit et al., 2003, Woolhiser, 1996).

Para la modelación de procesos de erosión en cauces es adecuado el uso de técnicas basadas en comparaciones de tensiones y/o velocidades (Chow, 1994; Juarez Badillo y Rico Rodríguez, 2004), y en un abordaje más completo, conjuntamente con la consideración de la ecuación de continuidad sedimentos en suspensión (en casos en que se desprece el transporte de fondo) (Basile, et al. 2010).

Sin importar el modelo utilizado, no hay un modelo o grupo de modelos general que resulte apropiado para todos los problemas y situaciones geográficas, por lo tanto, es razonable la modificación continua de los modelos existentes y el desarrollo de otros nuevos (Basile et al., 2010; Lane et al., 1988).

### 2.2.5.2. Módulo de calidad de agua del SWMM

El módulo de calidad de agua del SWMM puede ser enmarcado dentro de los modelos sedimentológicos conceptuales. El mismo permite estudiar la generación, entrada y transporte de cualquier tipo de contaminante definidos por el usuario, dentro de los cuales pueden encuadrarse los sedimentos urbanos.

La acumulación y arrastre de contaminantes desde las áreas de las cuencas se determinan a partir de los usos del suelo asignados a dichas áreas. Además, es posible introducir cargas de contaminantes en los distintos elementos del sistema de desagües pluviales, tanto durante las precipitaciones como en tiempo seco.

#### Usos del Suelo

Los usos del suelo sirven para categorizar los distintos usos y ocupaciones del suelo dentro de cada subcuenca, los cuales serán utilizados para evaluar la acumulación y arrastre de contaminantes en cada una de las mismas. Cada subcuenca puede tener asignados numerosos usos de suelo dentro de ella, cada uno con su respectivo porcentaje de influencia y sus características de acumulación y arrastre de poluentes.

Los procesos que definen cada uno de los usos del suelo son:

- Acumulación de contaminantes

La acumulación de contaminantes dentro de cada uso de suelo se describe como una masa por unidad de área en la subcuenca. La cantidad de contaminante acumulado es una función del número de días de clima seco previos a la lluvia y puede calcularse mediante modelos del tipo:

Función exponencial: La acumulación de contaminante  $B$  [kg/ha] sigue un crecimiento exponencial que se aproxima asintóticamente a un determinado valor máximo  $C_1$  [kg/ha], mediante una constante de crecimiento  $C_2$  [días<sup>-1</sup>], con  $t$  en días.

$$B = C_1 \left( 1 - e^{-C_2 t} \right) \quad (2.45)$$

Función potencial: la acumulación es proporcional a una constante de crecimiento  $C_4$  [kg/ha] y al tiempo  $t$  [días] elevado a una cierta potencia  $C_5$  [-], hasta alcanzar un valor máximo establecido  $C_3$  [kg/ha].

$$B = \left( C_3, C_4 t^{C_5} \right) \quad (2.46)$$

Función de saturación tipo Michaelis-Menton: La acumulación comienza de forma lineal y progresivamente disminuye en intensidad a lo largo del tiempo, hasta alcanzar un valor de saturación según la Ecuación 2.40, donde  $C_6$  [días] se denomina constante de semi-saturación (número de días para alcanzar la mitad de la máxima acumulación posible) y  $C_7$  [kg/ha] es la acumulación máxima.

$$B = \frac{C_7 \cdot t}{C_6 - t} \quad (2.47)$$

- Arrastre de contaminantes

El arrastre de contaminantes para un determinado uso del suelo ocurre durante los eventos pluviográficos simulados y puede describirse mediante los siguientes modelos:

Arrastre potencial: La carga de arrastre  $W$  [ppm] es proporcional al producto de un coeficiente de arrastre  $C_8$  [(ppm ha)/kg], el material disponible por acumulación  $B$  [kg/ha] y la escorrentía  $q$  [l/(s ha)] elevada a una cierta potencia  $C_9$  [-].

$$W = C_8 \cdot B \cdot q^{C_9} \quad (2.48)$$

Curva de flujo de arrastre: También denominada curva de relación entre el caudal líquido y la carga de poluente, presenta una relación similar a la anterior sin la influencia de la acumulación del contaminante, con  $C_{10}$  [ppm] y  $C_{11}$  [-].

$$W = C_{10} \cdot q^{C_{11}} \quad (2.49)$$

Concentración media del evento: Se trata de un caso particular de la curva de flujo de arrastre donde, en la Ecuación 2.42,  $C_{11}=1$  y  $C_{10}$  representa una concentración media constante de contaminante arrastrado.

La curva tipo exponencial es el único modelo de arrastre del SWMM que considera que dicho fenómeno depende de un proceso previo de concentración del mismo (Mendez 2012). Collins et al. (2005) sostiene que esta aplicación está limitada a pequeñas áreas impermeables, donde el aporte de poluentes es finito y está condicionado al material existente sobre la superficie, el cual resulta de la acumulación previa por días secos. En cambio en áreas permeables el aporte de poluentes tales como sedimentos puede ser considerado ilimitado, sobre todo al analizarse un evento aislado.

- Limpieza de calles

El programa permite también evaluar el impacto de la limpieza de calles, permitiendo asignar a cada uso de suelo una limpieza periódica capaz de reducir la acumulación de determinados agentes contaminantes.

### Traslado de contaminantes

El modelo de calidad del agua en el interior de los conductos asume que éste se comporta como un Tanque de Mezcla Completa (TMC), el cual supone que el material que ingresa al mismo se mezcla de manera instantánea y homogénea dentro del tanque, con lo cual se produce una concentración en el interior del mismo que también es igual a la concentración de salida (Muñoz Couto, 2009).

En el TMC la ecuación de balance de masa se plantea de manera que exista un flujo estable (asumiendo que la tasa de material acumulado dentro de este es cero). La concentración de un determinado poluyente en el extremo final de un conducto, en un determinado instante de tiempo, se obtiene mediante la integración de la ecuación de conservación de la masa (Ecuación 2.50), utilizando valores medios para las magnitudes que varían a lo largo del tiempo, tales como el caudal y el volumen de agua en el conducto.

$$\left(\sum \delta_e^i \cdot Q_e^i - \sum \delta_s \cdot Q_s^j\right) \Delta t = \delta_s \Delta V \quad (2.50)$$

Donde:

- $\delta_e^i$ : concentraciones media de poluentes para los distintos caudales de entrada.
- $Q_e^i$ : caudales de entrada medios para el paso de tiempo dado.
- $\delta_s$ : concentraciones de poluentes para los distintos caudales de salida y dentro del conducto.
- $Q_s^j$ : caudales de salida medios para el paso de tiempo dado.
- $\Delta V$ : variación del volumen dentro del conducto.

Aunque la consideración de un tanque de flujo en pistón pueda parecer una suposición más realista, las diferencias entre ambos modelos son pequeñas si los tiempos de viaje del agua a lo largo del conducto son del mismo orden de magnitud que el incremento de tiempo del modelo hidráulico de transporte.

La modelación de la calidad del agua dentro de los nudos con unidades de almacenamiento emplean las mismas aproximaciones que las realizadas para los cálculos en conductos. Para otros tipos de nudos que no tienen volumen, la calidad del agua que sale del nudo es simplemente la mezcla de concentraciones de agua que entra en el mismo.

### 2.2.5.3. Otros modelos disponibles

Modelos de producción de sedimentos a escala de cuenca han sido desarrollados basados en la formulación empírica de USLE, ejemplos de ellos son **AGNPS** (Young et al., 1987), **SWRRB** (Arnold et al., 1989), **RUSLE** (Renard et al., 1991), **SWAT** (Arnold et al., 1998).

Respecto a los modelos conceptuales son citables: **HSPF** (Walton y Hunter, 1996), **SWRRB** (Williams y Nicks, 1985), **EMSS** (Watson et al., 2001) y **LASCAM** (Viney y Sivapalan, 1999).

En lo que concierne a modelos de base física y distribuidos han sido desarrollados: **ANSWERS** (Beasley et al., 1977), **WEPP** (Foster y Lane, 1987), **KINEROS** (Woolisher et al., 1990), **CASC2D-SED** (Julien y Rojas, 2002), **EROSSET** (Sun et al., 2002), **LISEM** (De Roo et al., 1996), Modelo de Zambrano Najera (2015), entre otros.

La Figura 2.19, desarrollado por Zambrano Najera (2015), presenta un resumen de la evolución de los modelos de erosión hídrica, con algunos de los modelos sedimentológicos que pueden modelar pequeñas cuencas con ciertas características urbanas, figura al que debe sumársele el modelo desarrollado por el autor. El mismo concluye que la mayor parte de los modelos simula la erosión utilizando las ecuaciones de transporte de Foster y Meyer (1972), considerando desprendimiento por impacto y por flujo, y transporte por flujo solamente. La erosión en el canal sólo es considerada por algunos modelos.

A su vez, la forma en que se describen el proceso erosivo varía de un modelo a otro. Por ejemplo, algunos modelos no distinguen entre erosión en surcos y erosión entre surcos. Mientras que otros modelos calculan el desprendimiento separadamente para ambos elementos y luego los suman para obtener el desprendimiento total, asumiendo que todo el material que se desprende en las zonas entre surcos se transporta por los surcos. Hay modelos que incluyen los surcos asignando toda la escorrentía a los surcos y dividiendo por el número de surcos, obteniendo así una descarga y velocidad promedio para cada reguero con lo que se estima luego la capacidad de transporte. Este enfoque asume que todas las partículas que se desprenden en las zonas entre surcos son conducidas al cauce. Otros por su parte modelan

ambas zonas explícitamente y transporta el agua y el sedimento de las zonas entre surcos hacia los surcos.

Existen modelos que transportan el sedimento de las zonas entresurcos a los surcos, pero luego modelan la erosión generada en los surcos más dinámicamente usando sub-rutinas de los surcos y además estiman el desprendimiento de sedimentos debido al colapso de las paredes laterales y superiores de los canales o surcos.

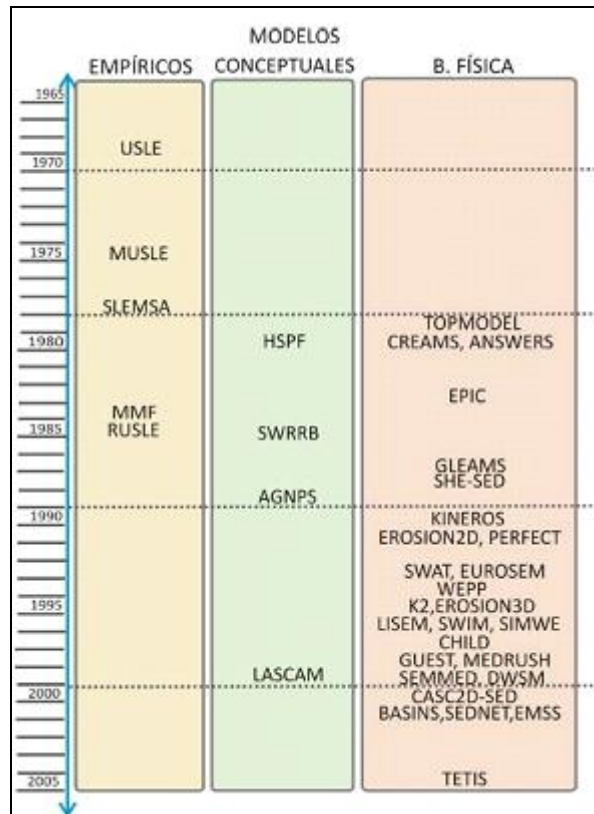


Figura 2.19. Evolución de la modelación de la erosión (Zambrano Najera, 2015)

La mayoría de los modelos simulan los procesos erosivos considerando un tamaño representativo de las partículas, muy pocos consideran diferentes tamaños de partículas.

Las formulaciones para determinar la capacidad de transporte del flujo varían también entre los modelos. Entre las teorías más utilizadas están: una versión modificada de la ecuación de Yalin (1963), variaciones a la ecuación de Engelund-Hansen (1967), la ecuación modificada de Kilinc-Richardson (1973), el concepto de esfuerzo crítico, el concepto de **Stream Power o Potencia de Flujo** desarrollado por Yang (1973), entre otras.

Similar a la generación nacional de modelos hidrológicos-hidráulicos, se han desarrollado diversos modelos matemáticos de producción, transporte y deposición de sedimentos. Particularmente en el DH-FCEIA-UNR se han desarrollado diversos módulos sedimentológicos para ser acoplados los modelos hidrológico-hidráulicos, a diferentes escalas

espaciales y temporales. El modelo **EROSUP** (Basile, et al., 2008a) estima la producción media anual a nivel de cuenca mediante la utilización de USLE e información SIG del clima, topografía, tipo de suelo, cobertura vegetal y usos del suelo. El **CTSS8-SEDMU** (Basile, et al., 2008b) evalúa la producción por evento a nivel de cuenca mediante la utilización de MUSLE y el acople al modelo hidrológico-hidráulico CTSS8. De manera similar el **CTSS8-SED** (Basile, et al., 2008c) permite calcular la tasa de disgregación del suelo por impacto de la lluvia y por el flujo sobre el terreno, el transporte de sedimentos y los procesos de disgregación y sedimentación en las celdas valle y celdas río.

## **2.3. Modelación hidrosedimentológica en CUSCSH**

### **2.3.1. Características de los procesos hidrosedimentológicos en CUSCSH**

Las distintas características fisiográficas de una cuenca poseen gran influencia en el escurrimiento del agua dentro de la misma (Springall, 1980). Entre las más determinantes se puede mencionar principalmente su área, pendiente, tipo de suelo, características de la red de drenaje, entre otras. Por otro lado, muchas veces se requiere determinar una relación entre las características del escurrimiento y las características fisiográficas de la cuenca, por lo que el correcto relevamiento de estas últimas resulta de gran interés para la investigación hidrológica.

Si bien muchos de los mecanismos de los procesos hidrológicos en zonas de llanura son extrapolables a zonas de topografía escarpada, existen una serie de diferencias que no pueden ser obviadas al momento de describir dichos mecanismos.

*“La diferencia cuantitativa más importante que se encuentra entre los parámetros para cuencas de pendiente y de llanura provienen en los diferentes periodos de tiempo en el cual interactúan las variables consideradas” (Zimmermann, 2008).*

En áreas de llanura la variable de salida del sistema ante eventos lluviosos, representada por el escurrimiento superficial, presenta un retardo respecto al pulso de lluvia, variable de entrada del sistema. En cambio en áreas de marcada topografía, el escurrimiento se presenta con una distribución temporal similar a la distribución de la precipitación.

En las zonas de reducida energía topográfica, el agua se mueve más lentamente, dando lugar a una superposición de efectos determinantes en los procesos de anegamiento. El flujo lento y las retenciones en pequeñas ondulaciones del terreno favorecen la infiltración y la

evaporación, las cuales se dan por prolongados periodos de tiempo y extensas zonas de influencia. Es así como, en zonas de fuertes pendientes, las pérdidas contempladas durante las tormentas son menores, generando mayores volúmenes de excedentes y mayores velocidades.

El agua para infiltración está disponible por más tiempo en las zonas de llanura, debido a su reducida velocidad de desagüe superficial, generando un importante flujo vertical, hacia abajo inicialmente y hacia arriba en épocas de seca. En cambio en zonas de serranía, el flujo es preponderantemente horizontal regidos tanto por flujo superficial como por el subsuperficial.

Si bien en zonas serranas la infiltración es menor que en zonas de llanura, la misma puede alcanzar grandes volúmenes ante tormentas prolongadas, en regiones húmedas con elevados módulos pluviométricos como la en estudio. Una saturación de humedad en los suelos de laderas de altas pendientes disminuye la estabilidad de los taludes naturales de tierra pudiendo producirse deslizamientos de tierras y flujos de lodos.

Este tipo de fenómeno es característico en ciudades de regiones tropicales y subtropicales de topografía accidentada, pero se agravan considerablemente en urbes de gran densidad habitacional con urbanizaciones desarrolladas literalmente sobre y al pie de laderas factibles de deslizamiento (Rodríguez, 2014).

Además de los deslizamientos de tierra por saturación de los suelos en eventos de larga duración, en regiones con elevadas pendientes topográficas, los cursos de agua presentan una elevada capacidad de arrastre durante eventos de corta duración y grandes intensidades. Situación que se agrava en ríos y arroyos que reciben los excedentes hídricos de áreas naturales deforestadas y luego atraviesan zonas urbanas.

### **2.3.2. Antecedentes de modelación hidrológica-hidráulica en CUSCSH y la región**

Los primeros estudios científicos del comportamiento de las cuencas urbanas de la región pertenecen al Grupo de Investigación es del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. Sus estudios concluyen que las ciudades de Misiones poseen problemáticas hidroambientales similares a las de otras ciudades del NEA, donde el continuo aumento poblacional no es acompañado por un plan de regulador que limite y planifique las zonificaciones y sus respectivas superficies impermeables, las cuales poseen directa

---

incidencia en la generación del escurrimiento superficial y la aparición de zonas anegadas ante tormentas de cierta intensidad (Depettris et al., 2011).

Efectivamente, para la visión tradicional de la hidrología sanitarista, las regiones como la de Oberá presentan una óptima situación, con la capacidad de erogar rápidamente los excedentes superficiales. Por tal motivo existen escasos estudios hidrológicos urbanos en la zona, concentrándose los mismos en las grandes ciudades de la región con reducida energía topográfica, como la ciudad de Posadas, Corrientes y Resistencia (Huk y Mercanti, 1999; Depettris et al., 2011; Ruberto et al., 2013).

Sin embargo, en los últimos años se han producidos en la zona eventos extremos, y otros de menor tenor, que han puesto en evidencia la necesidad de estudiar y evaluar la respuesta de los sistemas hidrológicos urbanos en zonas serranas, con ciudades de mediana envergadura, en continua expansión y avance sobre la selva misionera.

Existen investigaciones sobre la calibración de modelos hidrológicos en ambientes urbanos de la ciudad de Oberá (Rodríguez, 2014), donde se ha discretizado minuciosamente los usos del suelo en una micro-cuenca piloto en una zona residencial de densidad media. En dicho trabajo se relevó una micro-cuenca de 10.3ha, 61.8% de impermeabilidad y 5.7% de pendiente media, discriminando los distintos usos del suelo lote a lote, con el agregado de determinar las superficies impermeables directa e indirectamente conectadas. La calibración del modelo hidrológico, mediante la utilización de registros pluviométricos e hidrométricos, permitió demostrar la celeridad de respuesta de este tipo de cuencas, y la necesidad de trabajar con datos locales, dado que el tiempo de respuesta de la cuenca modelada durante eventos frecuentes, resulto menor a lo recomendado por la bibliografía.

Posteriormente, mediante el monitoreo y reconstrucción de distintos escenarios a lo largo del tiempo en dicha cuenca, se estimó que tras 110 años de urbanización, la cuenca había sufrido las siguientes alteraciones respecto a sus condiciones naturales originales (Rodríguez, 2014):

- La materilización de las calles altero la dinámica del escurrimiento incorporando nuevas zonas de aportes, incrementando el área de la cuenca en 34%.
- La impermeabilización paso de cero a 63.5%.
- Debido a que las áreas de aporte incorporadas tenían pendiente media menor a la media original, la pendiente media de la cuenca se redujo en 13.5%, determinada mediante el criterio de Alvord

- Considerando al cauce como el sistema de desagüe principal de la cuenca original y a los cordones cuneta como el del sistema actual, este último presenta pendiente media 39.3% menor y rugosidad hasta 10 veces menor a la del cauce original.
- Además, se vieron modificados el diagrama de frecuencias altimétricas y la curva hipsométrica de la cuenca.

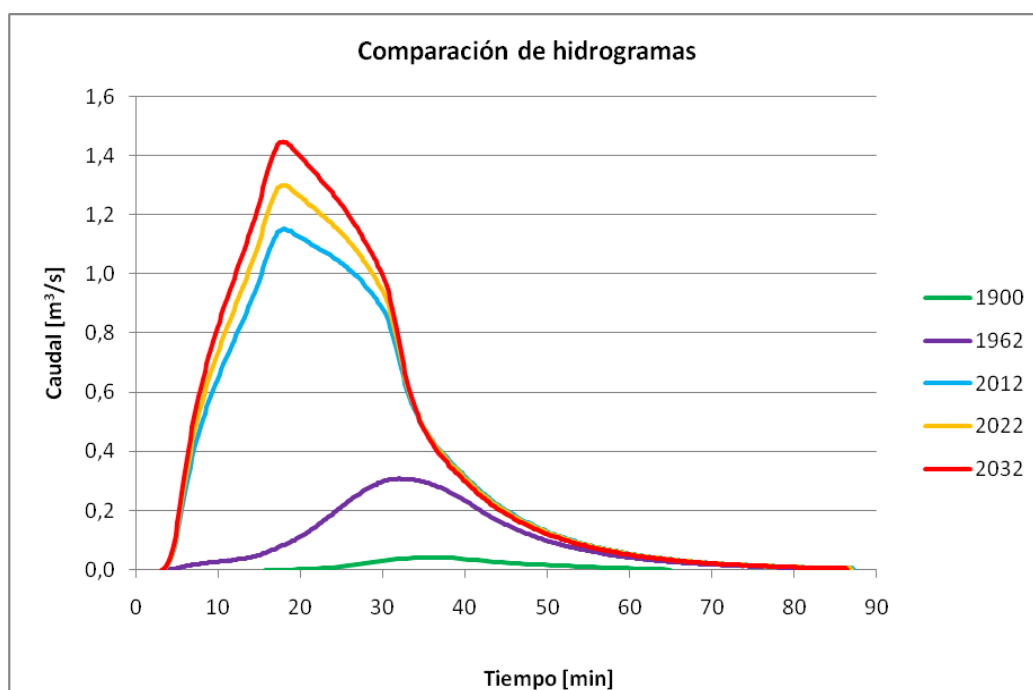
Al contar con el modelo hidrológico calibrado y el registro de los cambios temporales de la ocupación y usos del suelo de la cuenca, se evaluó el impacto hidrológico de la urbanización en su avance sobre las selvas autóctonas de Misiones, mediante la modelación de 5 escenarios ubicados cronológicamente para un evento frecuente de 2 años de recurrencia y 30 minutos de duración. Un escenario actual, el cual fue calibrado mediante relevamiento y monitoreo de la cuenca, dos escenarios previos con distintos grados de antropización y dos posibles escenarios futuros propuestos en caso de que se mantengan las tendencias de crecimiento e impermeabilización de la cuenca.

Bajo las condiciones actuales de la cuenca (año 2012 con 63.5% de impermeabilidad) puede estimarse que el caudal máximo por unidad de área se vio incrementado en 21.5 veces respecto al original (año 1900 cubierto por selva Paranaense), el volumen de escurrimiento por unidad de área se incrementó 23.5 veces y el tiempo al pico disminuyó a la mitad.

Mientras que para un posible escenario futuro (año 2032 con 70.7% de impermeabilidad) el caudal máximo por unidad de área se incrementaría en 27.1 veces el original, el volumen de escurrimiento por unidad de área aumentaría 27.3 veces y el tiempo al pico se reduciría en un 51%.

En la Figura 2.20 se observan los hidrogramas resultantes de las 5 modelaciones. En ella se puede apreciar la variación en la morfología de los hidrogramas. Cabe destacar que la materialización del ejido urbano ha aumentado el área de aporte de la cuenca respecto a la original, por lo que el impacto reflejado en el aumento de los caudales máximos y el volumen de escurrimiento directo totales son aún mayores a los detallados anteriormente por unidad de área.

Estas investigaciones sobre el comportamiento hidrológico de las cuencas urbanas de la provincia de Misiones se limitaron a modelar los parámetros de flujo a la salida de las cuencas, sin profundizar en la dinámica del escurrimiento superficial dentro de las mismas ni determinar los parámetros de flujo en los componentes del sistema de desagüe pluvial.



**Figura 2.20.** Comparación de hidrogramas resultantes para cinco escenarios con distintos grados de antropización en una microcuenca de Oberá (Rodríguez, 2014).

Para el análisis del riesgo de inundación y degradación del ambiente en urbes urbanas con características similares a las zonas serranas de Misiones, de pendientes pronunciadas y grandes volúmenes precipitados, es posible citar trabajos internacionales como Maksimović et al. (1993) quienes desarrollaron investigaciones en conjunto entre la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Belgrado, Yugoslavia y el Centro Tecnológico de Hidráulica de San Pablo, Brasil. En dicho trabajo, denominado “Problemas de desagüe urbano en zonas húmedas tropicales”, los autores resaltan la importancia de contar con información local para la correcta ejecución de las futuras obras y la implementación de nuevas técnicas de manejo integral del recurso.

Limitando con la provincia de Misiones, en la República Federativa del Brasil, se encuentra el estado de Rio Grande do Sul, en el cual se han desarrollado numerosos trabajos de investigación referentes al impacto hidrológico de la urbanización a través de la modelación hidrológica. Muchos de ellos acogidos por el IPH-UFRGS.

Entre los trabajos con características similares al de la presente tesis es citables el desarrollado por Soares Cruz (2004), el cual evaluó, mediante la modelación hidrológica, la optimización del drenaje urbano de dos macrocuencas de la zona metropolitana de Porto Alegre, con pendientes medias cercanas al 5%. Entre los resultado concluyentes, destaca que un aumento del 5% en el valor del CN repercute en un incremento superior al 50% en el costo de la solución optimizada para el manejo de los desagües pluviales.

Mediante la modelación hidrológica de micro cuencas en la ciudad de Porto Alegre, Forgiarini (2010) determino la conveniencia de utilizar incentivos económicos positivos, por ejemplo reducción de impuestos, para incentivar a los propietarios a realizar un control de los excedentes hídricos superficiales a escala de lotes. El costo de los incentivos aceptados por los propietarios encuestados resuelto menor al necesario para construir obras de control a nivel de macrodrenaje. Como resultado final de su investigación, el autor asegura que los incentivos económico positivos contribuirán a un proceso de educación ambiental del desagüe pluvial urbano, formando ciudadano conscientes y actuantes en la búsqueda de un ambiente sustentable.

### **2.3.3. Antecedentes de evaluación de producción de sedimentos en CUSCSH y la región**

En lo que respecta a las investigaciones de procesos de erosión, en Misiones existen números estudios (Fernández et al., 1989 y 2015; Ligier et al., 2004), la mayoría de ellos realizados por el INTA, sobre el potencial de erosión de los suelos en áreas naturales y rurales. Investigaciones destinadas a conservar y optimizar el manejo de las áreas de cultivo como así también proteger el medio ambiente natural.

Particularmente Ligier et al. (2004), realizaron un trabajo cuyo objetivo fue elaborar una mapa de riesgo de erosión hídrica potencial, mediante la aplicación de la USLE y utilizando como base la información obtenida en el Mapa Edafológico de la provincia.

Los autores destacan la importancia de los métodos para predecir la erosión como herramientas en la conservación del suelo. Estos son necesarios para conocer su magnitud, identificar áreas de excesiva erosión y hasta para proyectar a largo plazo la relación entre erosión y productividad del suelo. Los detalles de los resultados de esta investigación se presentan en el Capítulo 3, Sección 3.1.4.2.

Los mapas citados han contribuido a la formulación de legislación vigente, la cual limita los cambios en la ocupación y usos del suelo de las áreas rurales en función a la potencialidad de erosión del suelo.

Hasta la presentación de este trabajo, no se han encontrado investigaciones científicas sobre los procesos de erosión en cuencas urbanas de la provincia, ni trabajos referentes a la perturbación geomorfológica de los cauces naturales desencadenados por la dinámica de la urbanización.

Respecto a investigaciones de erosión superficial a nivel nacional utilizando al USLE, numerosos estudios en todo el territorio argentino utilizaron la metodología propuesta por Arnoldus (1978), citado por Basile et al., (2008a), quien propuso evaluar el valor de  $R$  en función del índice de Fourier modificado, según la Ecuación 2.51.

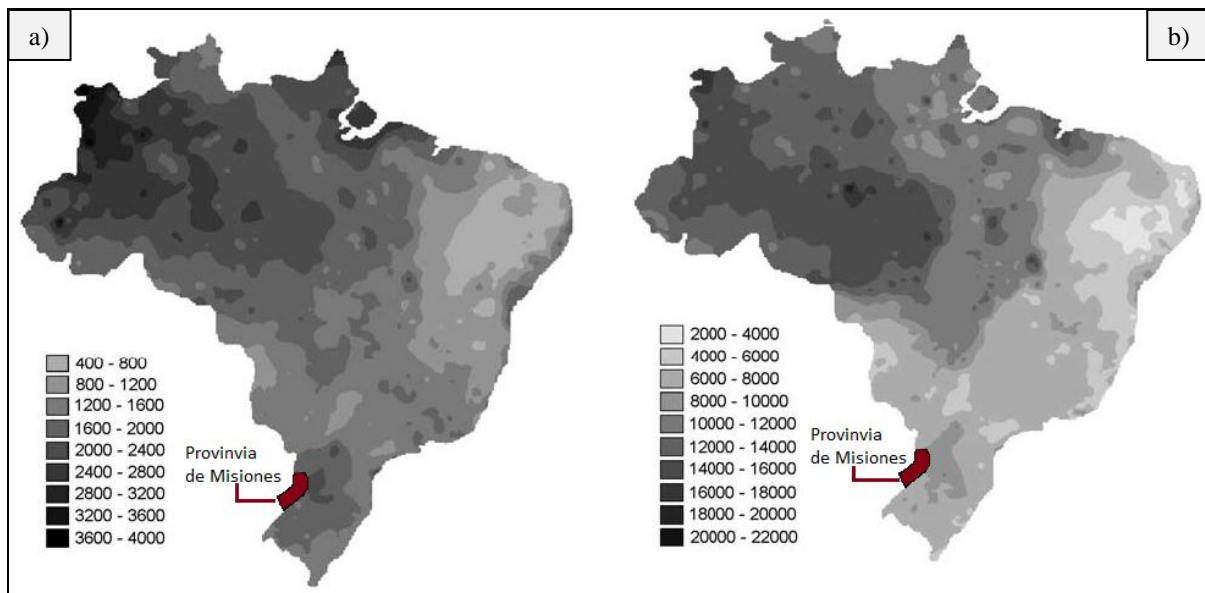
$$\log R = 1,93[\log IFM] - 1.52 \tag{2.51}$$

En la Ecuación 2.51  $R$  resulta en [(ton·pié·pulgada)/(acre·h)] y debe ser multiplicado por un factor de 17.02 para obtener unidades de [(MJ·mm)/(ha·h)]. Y  $IFM$  es el índice de Fourier modificado según:

$$IFM = \frac{1}{P_{MA}} \sum_{k=1}^{12} P_k^2 \text{ [mm]}, \quad P_{MA} = \sum_{k=1}^{12} P_k \tag{2.52.a y b}$$

con  $P_k$  precipitación media del k-esimo mes [mm] y  $P_{MA}$  precipitación media anual [mm].

Otras metodologías para determinar el valor de  $R$  han sido desarrolladas y calibradas para distintas regiones. Da Silva (2004) investigo la erosividad de las precipitaciones anuales en todo el territorio de Brasil, aplicando para cada región del país, las distintas ecuaciones de erosividad desarrolladas a partir de investigaciones precedentes. En la Figura 2.21.a y b pueden observarse las precipitaciones medias anuales y la erosividad de la lluvia respectivamente, producto de la interpolación de los valores mediante un SIG.



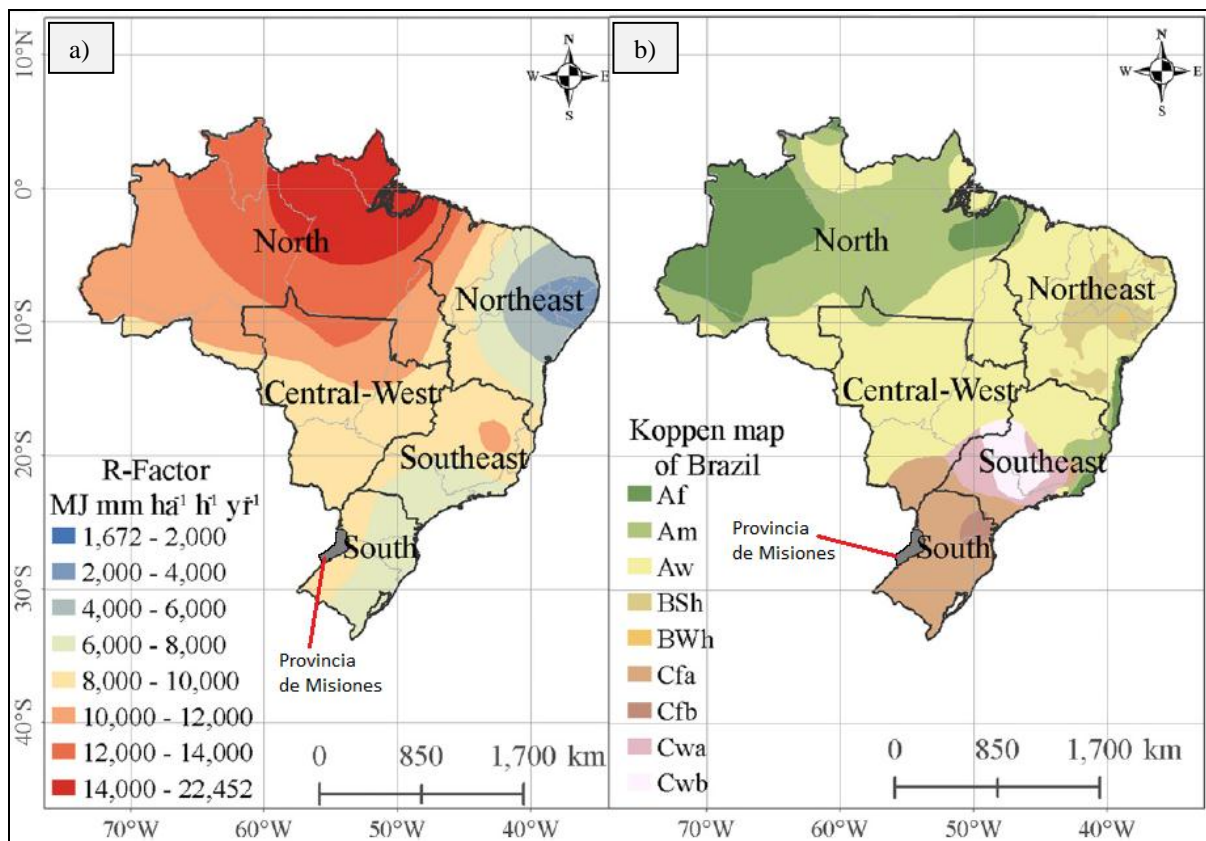
**Figura 2.21.a.** Mapa de precipitaciones medias anuales para Brasil [mm]. **b.** Mapa de factor R para Brasil [(MJ mm)/(ha h año)] (Adaptado de Da Silva, 2004).

Para la región sur, comprendida por los estados de Paraná, Santa Catarina y Rio Grande do Sul, todos limítrofes con la provincia de Misiones, el autor utilizo la Ecuación 2.53. desarrollada por Rufino et al. (1993).

$$R = \sum_{i=1}^{12} (19.55 + 4.2P_k) \quad (2.53)$$

En las figuras anteriores puede observarse que, para los estados limítrofes con Misiones, las precipitaciones anuales se encuentran entre 1600 y 2400 mm, mientras que la erosividad de la lluvia está en un rango de 6000 a 10000 [(MJ mm)/(ha h año)].

Posteriormente Sanches Oliveira et. al. (2012) realizaron una recopilación más detallada de los modelos de erosividad desarrollados y ajustados en diversas localidades de Brasil. Como resultado obtuvieron los mapas presentado en la Figuras 2.22.a, donde se exhiben la valores de erosividades determinados, y la Figura 2.22.b, la cual muestra las zonas climáticas de Brasil.



**Figura 2.22.a.** Mapa del factor R para Brasil. **b.** Clasificación climática para Brasil (Adaptado de Sanches Oliveira et. al., 2012). Referencias: (Af) ecuatorial completamente húmedo; (Am) monsoónico ecuatorial; (Aw) ecuatorial de invierno seco; (Bsh) estepa árida cálida; (Bwh) desierto árido cálido; (Cfa) templado y húmedo de verano cálido; (Cfb) templado y húmedo de verano templado; (Cwa) templado de invierno seco y verano cálido; (Cwb) templado de invierno seco y verano templado.

En las figuras anteriores puede observarse como, para la región limítrofe con Misiones, el clima está definido como templado y húmedo de verano cálido, mientras que la erosividad de la lluvia se encuentra entre los 8000 y 10000 [(MJ mm)/(ha h año)].

Respecto a los datos locales de erosividad, Gvozdenovich et al. (2015), personal de la EEA-INTA Paraná han desarrollado un software de uso gratuito y disponible en la web, para

predecir la erosión hídrica de suelos en todo el territorio argentino. En el mismo puede observarse el mapa indicado en la Figura 2.23 donde se exhiben los valores de  $R$  para la región Noreste de la Argentina. Además, los datos disponibles para el territorio de la provincia de Misiones se presentan en la Tabla 2.9. Los valores citados resultan de la aplicación de la Ecuación 2.20.

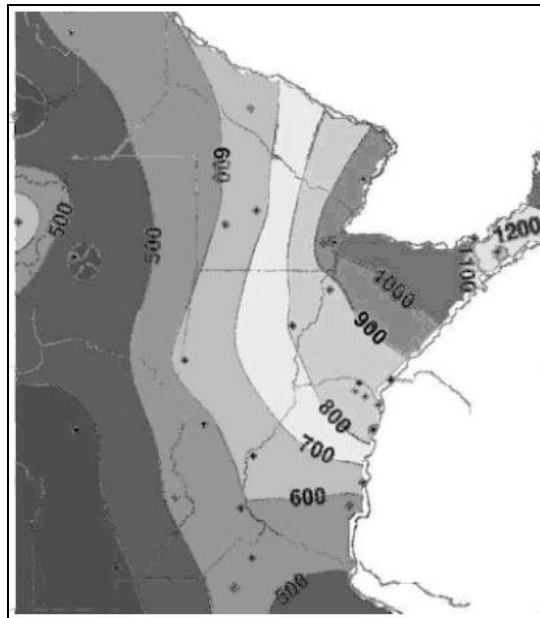


Figura 2.23. Mapa del factor  $R$  [(MJ mm)/(ha h)] para el NEA (1950-2005) (Gvozdenovich et al., 2015).

Tabla 2.10. Valores de  $R$  para la provincia de Misiones (Gvozdenovich et al., 2015)

Estación meteorológica	$R$ [(MJ mm)/(ha h)]
Cerro Azul	12010
Posadas	10810
Puerto Iguazú	10130

La ecuación para determinar el valor de  $K$ , inicialmente propuesta por Wischmeier y Smith (1978), tiende a sobrestimar la erodabilidad de los suelos tropicales (Dangler et al., 1976 citado por Chaves, 2010). Chaves (1996) desarrollo una ecuación de regresión lineal para estimar  $K$  en la región central de Brasil con:

$$K = 0.00043 \frac{(AF + SIL)}{CO} + 0.000437AR + 0.000863SIL [(t \cdot ha \cdot h)/(ha \cdot MJ \cdot mm)] \quad (2.54)$$

Donde:

- $AF$ : contenido de arena fina (0.1-0.002 mm) [%].
- $SIL$ : contenido de limo [%].

- *CO*: contenido de materia orgánica [%].
- *AR*: contenido total de arena [%].

Diversos autores han elaborado tablas y nomogramas para una estimación inicial de la erosividad del suelo en función a distintos parámetros del mismo. La Tabla 2.11 presenta valores de *K* propuestos por Kirkby y Morgan (1980) en función a la composición del suelo.

**Tabla 2.11.** Factor de erosividad *K* según la textura y cantidad de materia orgánica del suelo (Kirkby y Morgan, 1980).

<i>Textura</i>	<i>Contenido de materia orgánica</i>		
	<i>&lt;0.5 %</i>	<i>2 %</i>	<i>4 %</i>
<i>Arena</i>	0.007	0.040	0.003
<i>Arena fina</i>	0.021	0.018	0.013
<i>Arena muy fina</i>	0.055	0.047	0.037
<i>Arena franca</i>	0.016	0.013	0.011
<i>Arena fina franca</i>	0.032	0.026	0.021
<i>Arena muy fina franca</i>	0.058	0.050	0.040
<i>Franco arenoso</i>	0.036	0.032	0.025
<i>Franco arenoso fino</i>	0.046	0.040	0.032
<i>Franco arenoso muy fino</i>	0.062	0.054	0.043
<i>Franco</i>	0.050	0.045	0.038
<i>Limo franco</i>	0.063	0.055	0.043
<i>Limo</i>	0.079	0.068	0.055
<i>Franco areno limoso</i>	0.036	0.033	0.028
<i>Franco arcilloso</i>	0.037	0.033	0.028
<i>Franco arcillo limoso</i>	0.049	0.042	0.034
<i>Arcilla arenosa</i>	0.018	0.017	0.016
<i>Arcilla limosa</i>	0.033	0.030	0.025
<i>Arcilla</i>	0.017-0.038		

Chaves (2010) cita que la distribución de precipitaciones, los tipos de cultivo y las prácticas de manejo de los mismos, generalmente son distintos en zonas templadas que en zonas tropicales y subtropicales, por lo que los valores de *C* propuestos por el método original de USLE, determinados para regiones templadas, deben ser tomados con prudencia en otras regiones.

Respecto a la MUSLE, los valores propuesto originalmente de  $\alpha$  (11.8) y  $\beta$  (0.56) en la Ecuación 2.32, resultaron de la calibración de cuencas en los estados de Texas y Nebraska (EEUU) y en muchos casos han arrojado resultados satisfactorios al ser utilizado en otras latitudes, no obstante es recomendable ajustar dichos coeficientes en cada caso particular (Kohli et al., 2014).

Kohli et al. (2014) obtuvieron valores de 35 y 0.57 para  $\alpha$  y  $\beta$  respectivamente para la cuenca del Río Tapenagá, en la provincia de Chaco, con de 4940km<sup>2</sup> de área de aporte, en un región subtropical de llanura.

Existen antecedentes nacionales e internacionales referidos a la modelación hidrosedimentológica en cuencas urbanas (Soares Cruz, 2004; Mendez, 2012; Zambrano Nájera, 2015; Maskimovic et al., 1993), sin embargo cada modelo debe ser ajustado realizando la parametrización de coeficientes regionales.

En la región del NEA particularmente, se ha realizado el monitoreo, modelación y calibración de modelos hidrosedimentológicos. Mendez (2012) realizó el análisis de la carga de sedimentos acumulados en tiempo seco (días sin lluvia) y del total de sólidos suspendidos en el escurrimiento superficial en las calles de una micro cuenca de la ciudad de Resistencia. Para su investigación, en una micro-cuenca urbana de 4.2ha y 72% de impermeabilidad en la ciudad de Resistencia, el autor utilizó en el SWMM para modelar tanto la transformación lluvia-caudal como la generación y transporte de sedimentos por el flujo hídrico.

Los parámetros adoptados para el modelo de transformación lluvia-caudal se presentan en la Tabla 2.12. Allí puede observarse que el modelo de infiltración utilizado fue el de Horton.

**Tabla 2.12.** Valores adoptados de los parámetros del modelo transformación lluvia-caudal en Resistencia (Mendez, 2012).

Parámetro	Unidad	Cuenca	
		Derecha	Izquierda
Ancho característico	[m]	38	52
Pendiente media superficial	[%]	0.5	0.5
Porcentaje de área impermeable sin almacenamiento	[%]	35	35
Coefficiente de Manning para áreas impermeables	[adm]	0.015	0.015
Coefficiente de Manning para áreas permeables	[adm]	0.15	0.15
Almacenamiento en depresiones en áreas impermeables	[mm]	7	7
Almacenamiento en depresiones en áreas permeables	[mm]	12	12
Tasa de infiltración máxima	[mm/h]	85	85
Tasa de infiltración mínima	[mm/h]	12	12
Constante de disminución	[1/h]	8	8
Tiempo de secado	[días]	4	4

Para la modelación de la acumulación de sedimentos en áreas impermeables durante los periodos sin lluvias el autor utilizó un modelo de acumulación exponencial según la Ecuación 2.38.

El ajuste del modelo se realizó mediante el método de los mínimos cuadrados arrojando valores de 600g/m<sup>2</sup> para  $C_1$  (acumulación máxima posible) y 0.05 para  $C_2$  (constante de

crecimiento), con un  $R^2$  igual a 0.74. Dichos valores representan los ajustados para todas las mediciones, posteriormente el autor subdividió las áreas de acumulación en función a los sedimentos detectados a lo largo de las cunetas.

Para el modelo de calidad de agua el autor utilizo dos tipos de modelos de lavado:

### Cunetas de calle

En cunetas de calle se adoptó un modelo de lavado del tipo potencial según la Ecuación 2.48, el cual requiere establecer la cantidad de sedimentos acumulados en tiempo seco previo al escurrimiento, resultado  $C_8$  (coeficiente de arrastre) y  $C_9$  (exponente de arrastre) calibrados en 0.03 y 2.2 respectivamente.

Del monitoreo realizado en tiempo seco surgió la subdivisión en 4 usos de suelo, en función a la cantidad de sedimento detectado. En la Tabla 2.13 se presentan los parámetros adoptado para el modelo de acumulación, también de tipo exponencial según la Ecuación 2.45, para cada subárea.

**Tabla 2.13.** Valores adoptados de los parámetros del modelo acumulación de sedimentos en cunetas de calle en Resistencia (Mendez, 2012).

<i>Usos del suelo</i>	$C_1$	$C_2$
	[kg/ha]	[adm]
<i>Bajo</i>	3000	0.05
<i>Medio</i>	6000	0.05
<i>Alto</i>	9000	0.05
<i>Muy alto</i>	12000	0.05

### Usos de suelo restantes

En los usos de suelo restantes se utilizó un modelo del tipo relación de caudales según la Ecuación 2.49, discterizados en curva de relación derecha e izquierda. Los valores de los parámetros utilizados se indican en la Tabla 2.14.

**Tabla 2.14.** Valores adoptados de los parámetros del modelo producción tipo relación de caudales en Resistencia (Mendez, 2012).

<i>Parámetro</i>	<i>Curva de relación Derecha</i>	<i>Curva de relación Izquierda</i>
$C_{10}$	0.010	0.049
$C_{11}$	1.66	1.33

---

## 2.4. Sistemas de drenaje urbano sostenibles

### 2.4.1. Evolución de la gestión del drenaje urbano

Durante su evolución histórica la hidrología y la gestión de drenaje pluvial urbano han pasado por diferentes etapas. Desde sus inicios, el proceso de urbanización debió hacer frente a graves problemas epidemiológicos resultantes de la concentración de la población, surgiendo así el concepto sanitarista inicial que gobernó durante mucho tiempo la gestión de las aguas de lluvia.

Desbordes (1987), citado por Bertoni et al. (2004) identifica tres períodos esenciales de la hidrología urbana en los países desarrollados:

- Una etapa inicial ligada al concepto sanitarista del drenaje de las ciudades.
- Una etapa transitoria caracterizada por la racionalización del cálculo hidrológico-hidráulico y la normatización de estudios y proyectos.
- La etapa actual ligada al enfoque científico y ambientalista del drenaje urbano.

El concepto sanitarista de drenaje urbano se basó en un conjunto de medidas, generalmente estructurales, destinadas a remover las aguas pluviales de las áreas a sanear, de la forma más rápidamente posible. Si bien estas medidas son necesarias para la solución de muchos problemas, en casos complejos suelen tener un costo elevado y no son suficientes por sí solas para obtener una solución sustentable en el tiempo (Ramos Verneiri, 2013).

Producto de los inconvenientes y falencias de los métodos tradicionales de gestión, a mediados del siglo XX, se introdujo en los países más desarrollados un cambio de paradigma que logro imponer un enfoque sistémico y ambientalista en la hidrología urbana, por el cual el agua de lluvia paso a ser concebido como parte de un concepto más amplio: La gestión del agua pluvial urbana o “Urban Stormwater Management” (ASCE y WEF, 1992).

Bajo este nuevo enfoque la detención temporal de los excedentes hídricos superficiales comenzó a ser practicado para controlar los caudales máximos de las nuevas urbanizaciones. La regulación de caudales en cuencas urbanas desde principios de los 1970s pasó a ser una práctica común en urbanizaciones de países desarrollados y su uso se incorporó en planes directores de drenaje urbano. Posteriormente, se iniciaron actividades para caracterizar, cuantificar y mitigar los impactos de la urbanización sobre la calidad del agua de los cuerpos receptores (Ramos Verneiri, 2013).

## 2.4.2. Enfoque alternativo para la gestión de aguas de lluvia

Las nuevas prácticas en el manejo del sistema pluvial plantean una serie de técnicas armónicas con el medio ambiente, sin perder de vista que pertenecen a otro gran sistema como lo es el hidrológico. Esto está evidenciado por un nuevo énfasis en la premisa de retardar, o almacenar en lo posible, el agua de lluvia en el lugar donde precipita (Bertoni et al., 2002).

Las nuevas técnicas de control de la escorrentía a nivel mundial son las denominadas Prácticas e Mejor Manejo o Best Management Practices (BMPs). Las mismas son conocidos con distintas denominaciones según los países donde son empleados, entre las más reconocidas son citables (Rodríguez Bayon et al., 2005): Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), Mejores Prácticas de Control (MPC), Buenas Prácticas Ambientales (BPAs), Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TEDUS), Low Impact Development (LID), Water Sensitive Urban Design (WSUD), entre otros.

Muchas de estas técnicas se basan en la desaceleración y reducción del escurrimiento mediante sistemas de almacenamiento y/o infiltración, estructuras de control de erosión, entre otras.

Como ejemplo de manuales de diseño de drenaje urbano que han incorporado estas técnicas pueden mencionarse: Urban Storm Drainage Criteria Manual (UDFCD, 2001), Urban Drainage Design Manual (US-DT-FHWA, 2001), Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems (ASCE y WEF, 1992), entre otros.

Numerosas ciudades y países alrededor del mundo han puesto de manifiesto sus verdaderas intenciones en contribuir al desarrollo del drenaje urbano sustentable, promoviendo acciones concretas y promulgando legislaciones inherentes al manejo de los recursos hídricos.

Particularmente en nuestro país, la ciudad de Resistencia posee una ordenanza la cual dicta que, todo proyecto debe cumplir el "impacto hidrológico cero", verificándose que el caudal pico del hidrograma generado como respuesta del sistema de desagüe del proyecto no se incrementa, en relación a la respuesta original (Pilar y Depettris, 2000; citados por Bertoni et al., 2002).

En tanto que la Ciudad Autónoma de Buenos Aires dispuso que para el año 2020 el 50% de los techos de los edificios públicos debe ser cubierto por terrazas verdes, provocando así una reducción de los excedentes hídricos superficiales, un aumento en los tiempo de

---

concentración de las cuencas y una disminución de entre 2 y 3°C en la temperatura de los edificios.

Donde las comunidades luchan, con cada vez más áreas impermeables, contra el control de inundaciones y la degradación de la calidad del agua, estos enfoques paisajistas simples pueden tener un impacto positivo mensurable (CP-BES, 2008).

#### **2.4.2.1. Conceptos básicos**

Las BMPs son concebidos bajo la ideología de reproducir, de la mejor manera posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o antropización por parte del hombre. Con el objetivo de (i) minimizar los impactos de la dinámica de la urbanización respecto a la cantidad y calidad de los excedentes hídricos superficiales, tanto en el origen de los mismos, como durante el transporte y su restitución final en los cuerpos de agua, (ii) así como maximizar la integración paisajística, el valor social y ambiental de la intervención sobre los recursos hídricos (Perales Momparler y Andrés-Doménech, 2007).

Bertoni et al. (2002) recomiendan una serie de conceptos claves para un manejo adecuado del sistema de desagües pluviales. Los autores hacen saber que no son todos, pero contienen una filosofía básica merecedora de difusión y consideración:

- La lluvia que precipita en un sitio dado debe, en una solución ideal de diseño, ser absorbida o retenida en el sitio con el objetivo de que después de la urbanización la cantidad de agua que se eroga desde ese sitio no sea significativamente diferente de la que escurría en su situación original. Este objetivo puede ser conflictivo con status legales actuales, lo cual no reduce su validez.
- El diseño óptimo de dispositivos de recolección, almacenamiento y tratamiento debe complementarse con un balance entre costos de capital, operación y mantenimiento, conveniencia pública, protección ambiental, riesgos de daños por inundación y otros objetivos comunitarios.
- Debe haber un continuo reconocimiento de que hay un balance entre responsabilidades y obligaciones para coleccionar, almacenar y tratar el agua pluvial entre propietarios y la comunidad como un todo.
- Una nueva aceptación de que el agua pluvial es una componente del total de los recursos hídricos de un área, la cual no debe descartarse sino que debe utilizarse para completar este recurso.

- La reevaluación de las técnicas de manejo del escurrimiento en una cuenca es una necesidad universal que es responsabilidad del sector público y debe ser también un objetivo.

#### **2.4.2.2. Corrientes de opinión**

En las últimas décadas han emergido tres corrientes de opinión en la tecnología de gestión del agua pluvial urbana (US-EPA, 2004, citado por Ramos Vernieri, 2013), las cuales se describen continuación:

##### **Controles en la fuente**

Esta corriente pregona los dispositivos de detención en la fuente, es decir en el lugar mismo donde es generado el escurrimiento (Figura 2.24.a). Las prácticas en la fuente son las más difundidas en han sido adoptadas en muchos países a través de una legislación adecuada, o a través de un programa global de control de crecidas.

Uno de los principales criterios es establecer el caudal máximo que puede entrar al sistema público de drenaje proveniente de loteos, instalaciones comerciales e industriales. Este límite corresponde generalmente al caudal máximo del predesarrollo para un tiempo de retorno dado. Este caudal es restrictivo y obliga al proyectista a utilizar los dispositivos citados dentro del área a desarrollar, para mantener este caudal aguas abajo.

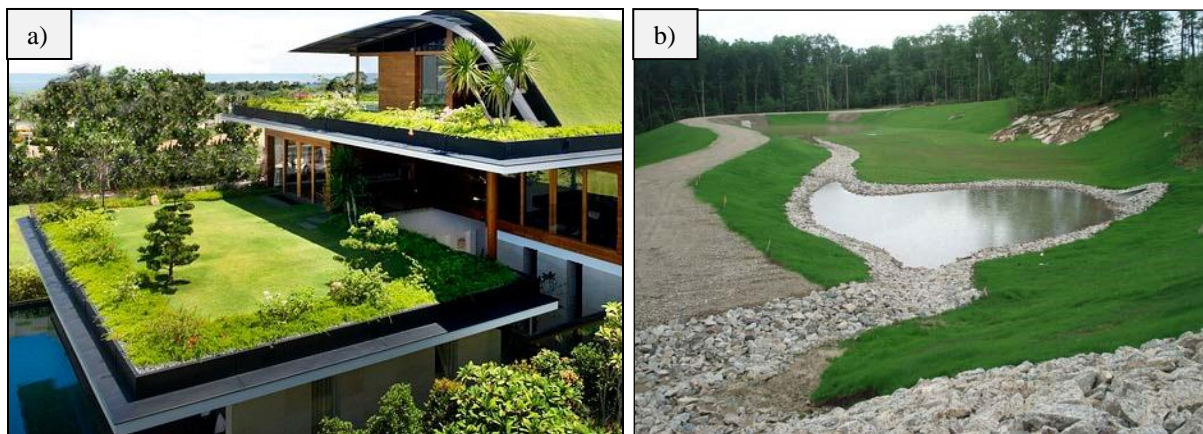
Para muchas jurisdicciones, el uso de controles locales es percibido como la única alternativa política e institucional práctica, dado que la mayoría de los sitios disponen del área necesaria para incorporar controles locales.

##### **Controles regionales**

Una segunda corriente está a favor de los dispositivos de detención a escala regional (Figura 2.24.b). Actualmente, este enfoque de gestión es utilizado exitosamente en grandes áreas metropolitanas. Esta corriente sostiene que los controles regionales ofrecen un enfoque más racional que los controles locales ofreciendo las siguientes ventajas:

- Pueden utilizar dispositivos de evacuación de múltiples niveles para regular pequeñas crecidas y mejorar la de calidad de agua erogada.
- Resultan más efectivos en la relación costo-beneficio, debido a que menos controles son menos caros de construir y mantener que muchos controles locales.

- Sirven áreas de drenaje más grandes con dispositivos de salida más grandes y fáciles de diseñar, construir, operar y mantener.
- Están generalmente bajo la jurisdicción de una agencia pública y, por lo tanto, es más probable que reciban un mantenimiento continuo.
- Pueden proveer tratamiento para desarrollos nuevos y existentes, y típicamente captar toda la escorrentía de las calles públicas, la cual a menudo no es recibida por controles locales.
- Cubren superficies más grandes de suelo, por lo que permiten otros usos compatibles, tales como recreación, hábitat de fauna o espacios abiertos estéticos.



*Figura 2.24.a. Techo verde, control en la fuente. b. Depósito de detención regional.*

### **Controles a micro escala basados en el paisaje**

La tercera corriente de opinión se inclina por las prácticas Low Impact Development (LID), conocidas también como Desarrollo Urbano de Bajo Impacto (DUBI). A diferencia de los dos enfoques previos, que se han usado por más de 40 años, el enfoque DUBI es reciente y en gran parte desconocido para la mayoría de las jurisdicciones locales.

El DUBI permite controlar los excedentes hídricos superficiales generados durante una tormenta desde su fuente. Mediante la utilización de sucesivas áreas reservadas para minimizar el impacto hidrológico hacia aguas abajo, que provocan una retención temporal (bioretenciones).

Dicho desarrollo se logra integrando funciones hidrológicas (control de volumen, frecuencia, recarga y descarga) utilizando cuatro principios de manejo (Burgos, 2007):

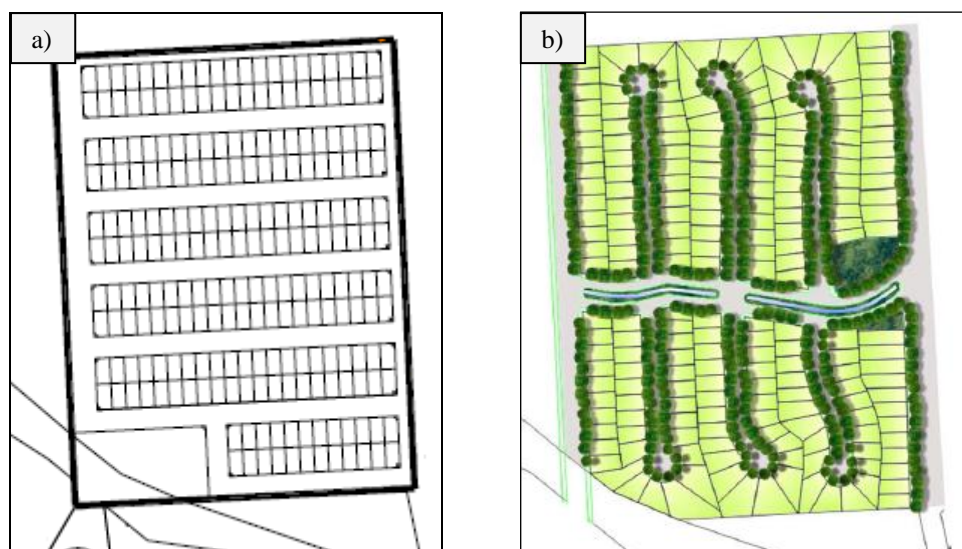
- 1- Minimiza los impactos al reducir la impermeabilidad, conservando los recursos naturales y manteniendo los drenajes naturales.

- 2- Provee un sistema de microreservorios de retención temporal del escurrimiento, dispuestos eficientemente en la zona de desarrollo.
- 3- Mantiene y en lo posible aumenta el tiempo de concentración de la cuenca previo a la acción antrópica, controlando los tiempos de flujo.
- 4- Implementa un efectivo programa de educación para usar medidas de prevención de riesgos ambientales.

Experiencias internacionales demuestran el correcto funcionamiento de urbanizaciones no convencionales desarrolladas bajo las premisas del DUBI, sin embargo siempre aplicadas en altos niveles sociales, donde suelen encontrarse lotes de gran magnitud, numerosos espacios verdes, etc., por lo que siempre se señaló al DUBI como un desarrollo costoso.

Burgos (2007) realizó la comparación, mediante modelación hidrológica utilizando el ArHymo, de la respuesta hidrológica de un barrio de viviendas sociales en la zona urbana de Gran Mendoza utilizando un desarrollo urbano convencional y un DUBI.

En una superficie disponible de 8.2ha, próxima al piedemonte y pendiente media de 5%, se propusieron dos loteos según se indican la Figura 2.25.



*Figura 2.25.a. Loteo convencional. b.DUBI. (Burgos, 2007).*

El autor concluyó que con la aplicación del DUBI, en lugar del convencional, se observó una disminución del 25% del presupuesto de infraestructura pública necesario, habiendo reducido la cantidad de lotes en un 13%, además de una reducción en los caudales pico superior al 40% para recurrencias de 2 y 5 años, cercano al 30% para una recurrencia de 50 años.

### 2.4.2.3. Integración de enfoques

En la actualidad no existe consenso sobre cuál de las corrientes es el enfoque óptimo a ser utilizado, además ninguna de ellas es adecuada para resolver todas las problemáticas de todas las latitudes. Por otro lado, dentro de una misma región específica, el enfoque apropiado para una zona urbana degradada existente puede resultar diferente del enfoque requerido para proteger un área rural medianamente conservada.

Así mismo, las técnicas adecuadas para el control de inundaciones pueden resultar obsoletas para controlar la calidad de las aguas de lluvia. Es así como la tendencia mundial se centra en la gestión integrada del recurso hídrico, mediante la combinación de diversos enfoques y dispositivos.

La Tabla 2.15 presenta una clasificación propuesta por Rodríguez Bayon et al. (2005) de las BMPs dependiendo de su funcionalidad. Las técnicas citadas deben combinarse para alcanzar los objetivos globales establecidos para el sistema.

**Tabla 2.15.** Clasificación de las diferentes tipologías de BMPs. (Rodríguez Bayon et al., 2005)

<b>Medidas preventivas</b>	<b>Sistemas de transporte permeable</b>
Legislación	Drenes filtrantes o drenes franceses
Educación	Cunetas verdes
Programación económica	Franjas filtrantes
<b>Sistemas de infiltración o control en origen:</b>	<b>Sistemas de tratamiento pasivo</b>
Superficies permeables	Depósitos de detención
Pozos y zanjas de infiltración	Estanques de retención
Depósitos de infiltración	Humedales artificiales

La jerarquía de técnicas a considerar en el diseño de la cadena de gestión comprende, según Perales Momparler y Andrés-Doménech (2007) los siguientes apartados (Figura 2.26):

- Prevención: aplicación de medidas no estructurares.
- Control en origen: control de la escorrentía en la fuente o en sus inmediaciones.
- Gestión del entorno urbano: gestión de agua a escala local.
- Gestión en cuencas: gestión de la escorrentía a escala regional.
- Dado que la lluvia es el desencadenante de todos los procesos de generación de escorrentía y erosión, su caracterización es fundamental para abordar con éxito los problemas desencadenados por el desagüe pluvial. Los episodios de precipitaciones más frecuentes producen menores escorrentías pero mayores concentraciones de poluentes en el flujo hídrico provocando severos impactos de contaminación por acumulación en los cuerpos de agua receptores, en cambio eventos menos frecuentes

producen mayores volúmenes de escurrimiento e impactos más severos por inundación. Por lo tanto, un diseño integral desde el punto de vista de la calidad y la cantidad de excedentes hídricos, debe trabajar con todo el espectro de eventos de lluvia (Perales Momparler y Andrés-Doménech, 2007). La Tabla 2.16 presenta los periodos de retorno de lluvia recomendables a utilizar según el objetivo del dispositivo a diseñar.

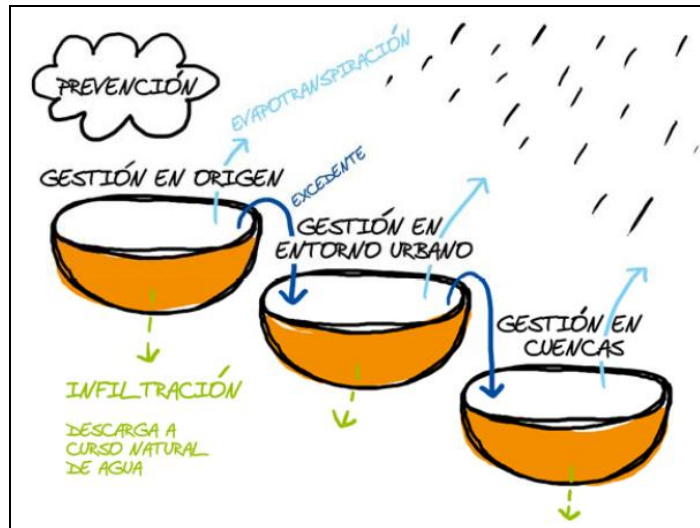


Figura 2.26. Cadena de gestión del agua (Perales Momparler y Andrés-Doménech, 2007).

Tabla 2.16. Selección del periodo de retorno según el objetivo de diseño, (Adaptado de Perales Momparler y Andrés-Doménech, 2007).

Objetivo de diseño	Periodo de retorno de la lluvia [años]				
	0.01	0.1	1	10	100
Técnicas de infiltración					
Control de contaminantes					
Control de erosión en el medio receptor					
Control de las inundaciones					



## **CAPÍTULO 3**

### **REGIÓN MISIONERA DE OBERÁ**

#### **Y LA CUENCA EN ESTUDIO**

### **3.1. Aspectos climáticos, edafológicos, orográficos e hidrográficos de la región de Oberá**

#### **3.1.1. Clima**

##### **3.1.1.1. Estaciones meteorológicas analizadas**

La provincia de Misiones y particularmente en la zona de estudio, disponen de un considerable número de estaciones meteorológicas, aunque pocas cumplen con los requisitos de tener registros confiables y longevos a la vez (Litwin y Franco, 1987). Además, ya en investigaciones anteriores se ha podido comprobar las dificultades de obtener información precisa de variables de relevancia, dado la negativa que muestran algunas instituciones que cuentan con determinada información (Rodríguez, 2014).

De todas maneras, se ha podido interactuar con diferentes organismos, que de una u otra manera, han colaborado con la disponibilidad de los datos necesarios para este trabajo.

En el análisis de las variables climatológicas de la zona de estudio, se utilizó la información disponible en las estaciones meteorológicas que a continuación se detallan. Para cada variable se dio prioridad a la información confiable proveniente de las estaciones cercanas a la cuenca en estudio. De no existir disponibilidad desde estaciones cercanas, se optó por emplear información con adecuado nivel de confiabilidad disponible en estaciones más alejadas.

##### **Estación experimental agropecuaria INTA Cerro Azul**

Esta estación cuenta con la más completa medición de variables hidrometeorológicas de la provincia. Con una serie de registros desde el año 1967 a la actualidad, sin embargo, se ha podido acceder a la información procesada desde 1967 a 1996, dado que los registros posteriores se encuentran en etapa de actualización. Dicha estación se emplaza a las afueras de la Localidad de Cerro Azul en el Departamento de Leandro N. Alem, en el centro de la

---

Provincia de Misiones, a 36.7km del centro de la ciudad de Oberá en dirección Suroeste (27°39'25"S; 55°26'14"O).

Además de contener la mayor cantidad y calidad de datos, esta estación, al igual que la ciudad de Oberá, se sitúa a la vera de la Ruta Nacional 14, sobre la Sierra Central de Misiones.

Entre las variables climatológicas más relevantes que se registran en esta estación son citables: precipitación diaria y subdiaria mediante fajas pluviográficas, temperaturas diarias mínimas, medias y máximas, temperaturas a distintos niveles dentro del suelo, humedad relativa, evaporación en tanques, velocidad y dirección del viento, ente otras.

### **Estación meteorológica Samambaya**

Esta estación, si bien cuenta con una menor cantidad de variables registradas, se presenta como la estación con datos significativos más confiable en la cercanía de la zona. Dicha estación se encuentra a las afueras de la Localidad de Guaraní, en el Departamento Oberá, a 9.3km del centro de la ciudad de Oberá, en dirección Suroeste (27°34'02"S; 55°08'27"O).

Es el INTA Cerro Azul quien fiscaliza y colabora con los operarios de la estación. En la misma se lleva registro de precipitaciones diarias, humedad relativa y temperaturas diarias mínimas, medias y máximas. Los datos de esta estación fueron obtenidos de INTA (2013).

### **Estación meteorológica CELO**

La Cooperativa de Electricidad Limitada de Oberá (CELO) cuenta con una estación meteorológica ubicada en la Planta de Tratamiento de Líquidos Cloacales que la misma administra. Dicha planta se encuentra hoy día, debido al avance de la urbanización, dentro del casco urbano de la ciudad de Oberá (27°28'24"S; 55°08'41"O), por lo que representaría de manera óptima las condiciones climatológicas de la zona de estudio.

Esta estación cuenta con un serie de registros de desde el año 1998 a la actualidad de precipitaciones diarias, humedad relativa y temperaturas diarias mínimas, medias y máximas.

Al igual que la estación de Samambaya, son los integrantes del INTA Cerro Azul quienes fiscaliza y colabora con los operarios de cooperativa en su formación y evaluación. Sin embargo, dada el continuo cambio de operarios día a día del instrumental, el personal del INTA resalta la necesidad de tener presente los posibles errores en los registros, sobretodo de temperaturas y humedades.

### **Estación meteorológica del SMN Oberá**

Dentro del casco urbano, semi-céntrico de la ciudad de Oberá (27°29'01"S; 55°07'54"O) se encuentra una estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) operada por un agente civil de la Fuerza Aérea Argentina.

En esta estación, si bien se han registrados variables meteorológicas desde el año 1970, las fajas pluviográficas, que representa los datos más significativos para el abordaje de los excedentes hídricos superficiales, han sido enviados periódicamente al SMN sin haber sido copiados y archivados, mientras que, de los datos de temperatura y humedad si se han dejado registros, aunque de manera precaria, sin desarrollarse análisis alguno de las series registradas.

En esta estación se lleva registros de precipitaciones diarias, temperaturas diarias medias mínimas, medias y máximas y humedad relativa. Lamentablemente debido al escaso mantenimiento de los equipos, el pluviógrafo se encuentra actualmente fuera de funcionamiento.

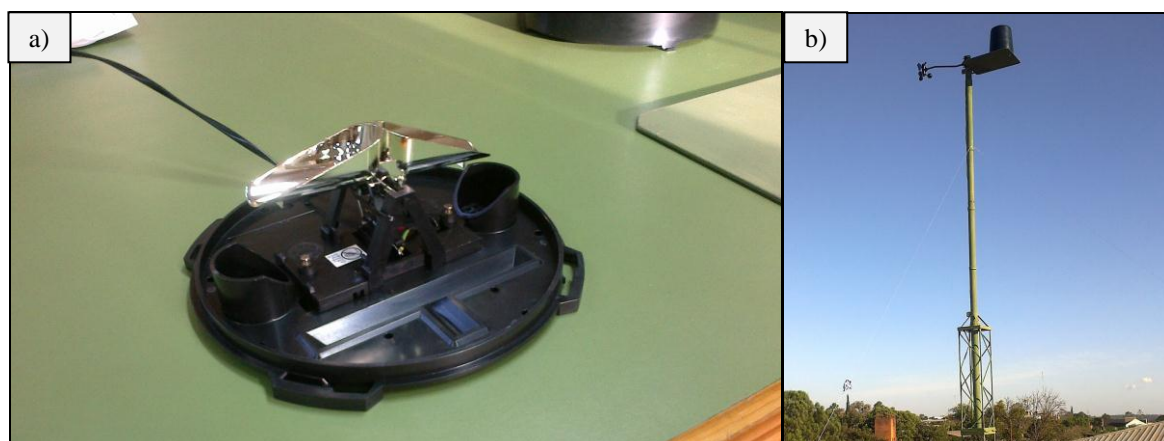
Se ha logrado acceder, por parte de la SMN, a los registros de precipitaciones diarias de esta estación. Sin embargo, la gran cantidad de datos faltantes hace imposible realizar cualquier tipo de análisis de los mismos.

### **Estación meteorológica FI-UNaM**

Actualmente se está trabajando en la instalación de una estación meteorológica en el predio de la Facultad de Ingeniería de Oberá de Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM) (27°29'06"S; 55°06'38"O). Los fondos para la adquisición del equipamiento y la infraestructura complementaria necesaria fueron obtenidos gracias a un proyecto de extensión impulsado por los docentes del Departamento de Ingeniería Civil.

Se trata de una estación digital con sensoriamiento remoto y almacenamiento automático de la información, lo que permite una discretización de las variables en el tiempo, tanto de las tormentas como de las demás variables meteorológicas registradas.

Actualmente, solo se lleva registro de las precipitaciones mediante un pluviómetro digital a cangilones con 0.2mm de precisión (Figuras 3.1.a y b).



**Figuras 3.1.a.** Pluviómetro digital a cangilones FI-UNaM.  
**b.** Estación meteorológica experimental FI-UNaM.

Si bien la estación es de características muy modernas y está operada por personal instruido, la misma se encuentra actualmente en periodo de prueba y calibración, por lo que no se cuentan con registros de series históricas.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de las estaciones meteorológicas descriptas anteriormente, indicando su distancia lineal hasta el Centro Cívico de la ciudad de Oberá y la información utilizada de cada una de ellas.

**Tabla 3.1.** Estaciones meteorológicas utilizadas en la caracterización climática de Oberá.

<b>Estación</b>	<b>Latitud Sur</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Distancia al CC Oberá</b>	<b>Información utilizada</b>
INTA Cerro Azul	27°39'25''	55°26'14''	36.7km	Curvas I-D-F
Samambaya	27°39'25''	55°26'14''	9.3km	Temperaturas Humedad ambiente
CELO	27°28'24''	55°08'41''	2.8km	Precipitaciones diarias
SMN Oberá	27°29'01''	55°07'54''	1.1km	-
FI-UNaM	27°29'06''	55°06'38''	1.0km	Precipitaciones subdiarias

### Estaciones meteorológicas de la SSRH

Para una descripción del régimen pluviográfico de la provincia de Misiones y sus alrededores, se encuentra disponible en la web información de las estaciones meteorológicas monitoreadas por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH).

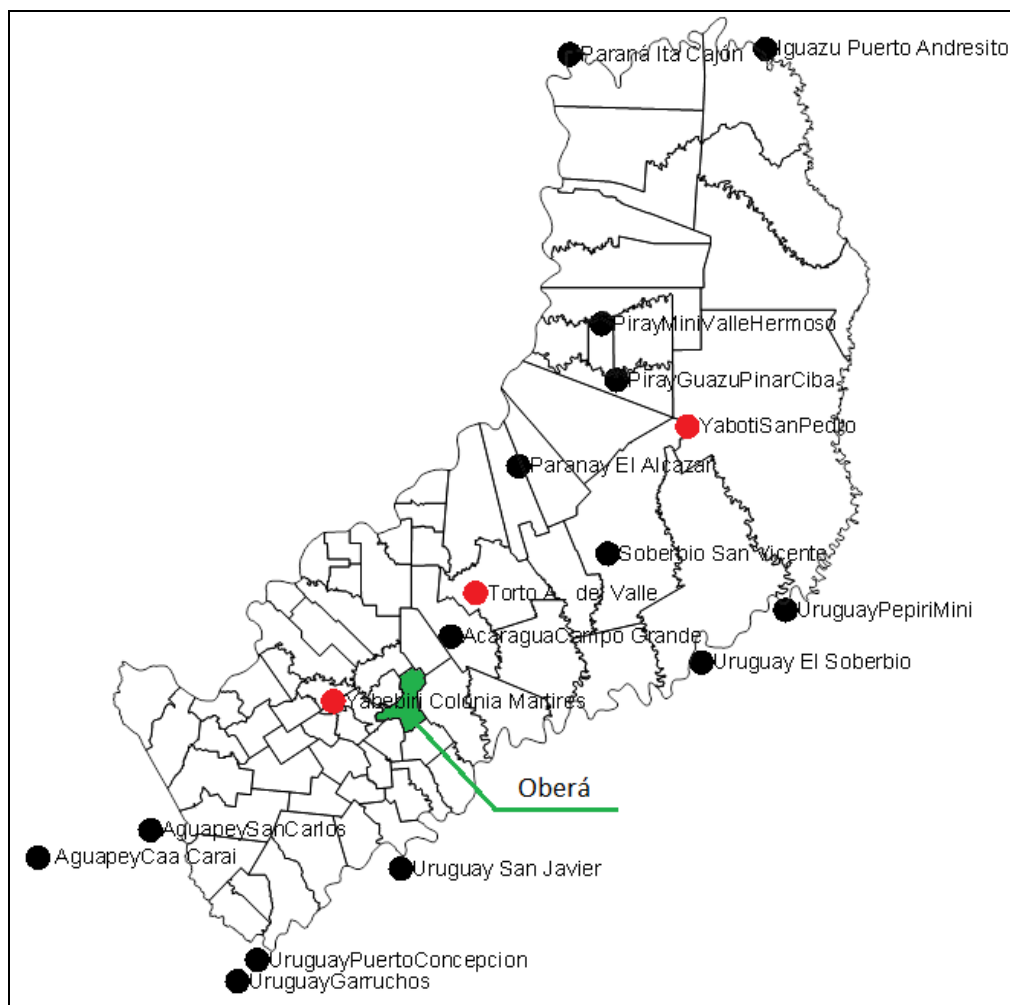
En la Figura 3.2 puede observarse la ubicación de las estaciones meteorológicas con datos de lluvias diarios disponibles para la Misiones y la provincia de Corrientes en cercanías del límite entre dichas provincias.

En la Tabla 3.2 se detallan las coordenadas de las mismas, distancia a Oberá, módulos pluviométricos y precipitaciones máximas diarias registradas. En la misma puede observarse como toda la provincia presenta módulos superiores a los 1600mm, con un máximo de 2113mm en la estación Yabotí-San Pedro, ubicada a 128km de Oberá, mientras que la máxima precipitación diaria registrada es de 394mm perteneciente a las estaciones de

Yabebirí-Colonia Martires y Torto-Aristobulo de Valle, ubicadas a 23 y 47km respectivamente, siendo estas dos de las tres estaciones más cercanas a la ciudad de Oberá.

**Tabla 3.2.** Estaciones meteorológicas SSRH en Misiones y alrededores.

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Distancia a Oberá [km]	Modulo [mm]	Máximo diario [mm]
Iguazú-Puerto Andresito	25° 35' 26"	53° 59' 42"	237	1847	166
Paraná-Ita Cajón	25° 36' 15"	54° 35' 34"	214	1613	156
Paranay-El Alcazar	26° 45' 03"	54° 45' 23"	88	1895	236
Piray Guazú-Pinar Ciba	26° 30' 43"	54° 27' 14"	126	1903	230
Piray Miní-Valle Hermoso	26° 21' 18"	54° 29' 54"	139	1808	181
Uruguay-El Soberbio	27° 17' 56"	54° 11' 36"	93	1880	205
Uruguay-Pepirí Miní	27° 09' 13"	53° 55' 58"	123	1803	190
Uruguay-Puerto Concepción	28° 07' 08"	55° 34' 52"	84	1681	265
Uruguay-San Javier	27° 52' 09"	55° 07' 49"	43	1643	162
Yabebirí-Colonia Mártires	27° 24' 04"	55° 20' 06"	23	1911	<b>394</b>
Torto-Aristobulo del Valle	27° 06' 11"	54° 53' 29"	47	1948	<b>394</b>
Yabotí-SanPedro	26° 38' 31"	54° 14' 07"	128	<b>2113</b>	250
Acaragua Campo Grande	27° 13' 24"	54° 58' 07"	32	1973	185
Soberbio-San Vicente	26° 59' 44"	54° 28' 57"	83	1928	170
Uruguay-Garruchos (Corrientes)	28° 10' 38"	55° 38' 36"	93	1681	186
Aguapey-Caa Carai (Corrientes)	27° 49' 28"	56° 15' 30"	119	1465	190
Aguapey-San Carlos (Corrientes)	27° 45' 12"	55° 54' 28"	84	1724	316



**Figura 3.2.** Estaciones meteorológicas SSRH en Misiones y alrededores.

### 3.1.1.2. Precipitaciones

#### Precipitaciones medias

Para la evaluación de las precipitaciones medias mensuales en la ciudad de Oberá y la cuenca en estudio, se utilizaron los datos de la estación CELO, con una serie de 14 años de datos en el periodo 1998-2011.

Para esta estación la precipitación media anual es de 1925mm con un mínimo registrado durante el año 2005 de 1477mm y un máximo de 2639mm en el año 2002.

En la Figura 3.3 se presentan las precipitaciones medias mensuales. En ella vemos que el mes de agosto se presenta como el mes más seco dentro del periodo analizado, con 96mm de promedio en el mes; mientras que el mes más lluvioso corresponde a octubre, con 252.6mm. Como dato significativo podemos mencionar que el mes más lluvioso en este periodo para esta estación, fue el mes de octubre de 2002 con 493mm, mientras que el día más lluvioso se presentó el 21 de agosto de 2002 con 123.1mm precipitados en 24 hs.

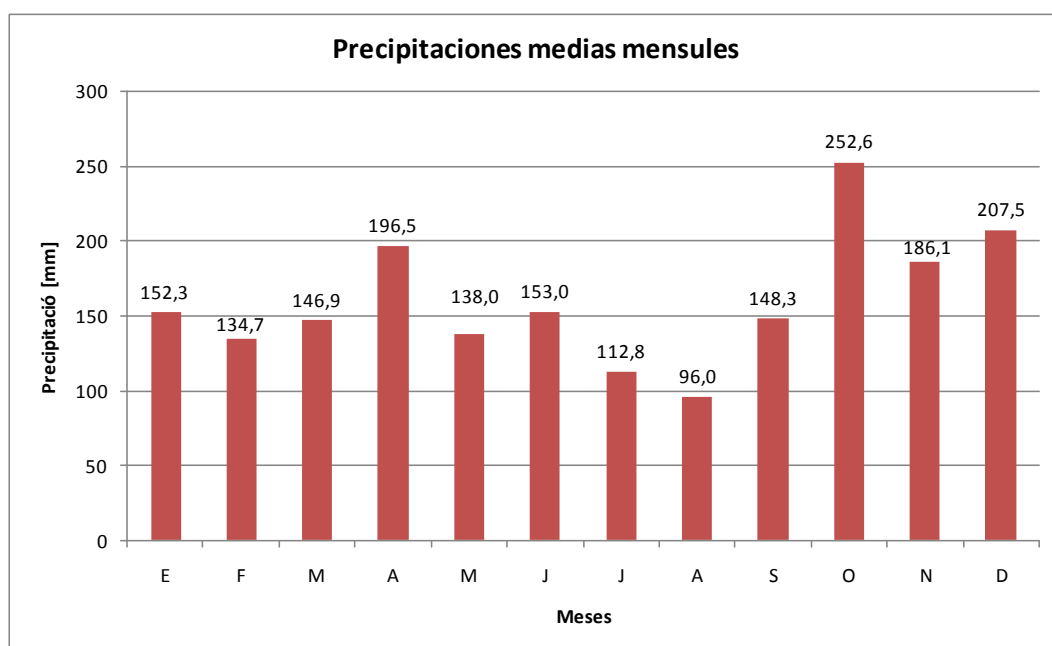


Figura 3.3. Distribución de precipitaciones medias mensuales en la zona de estudio (1998-2011).

#### Curvas intensidad-duración-frecuencia

Litwin y Franco (1987) presentaron un informe a la Comisión mixta Argentino-Paraguaya del río Paraná, la cual fue creada para la evaluación de factibilidad de represas hidroeléctricas sobre el dicho río, el cual contenía datos de la estación INTA Cerro Azul, más puntualmente, un análisis de las tormentas registradas en el período 1966-1984.

El informe presenta curvas de intensidad–duración–frecuencia (Figuras 3.4 y 3.5) a través de una función ajustada por mínimos cuadrados de tipo hiperbólica:

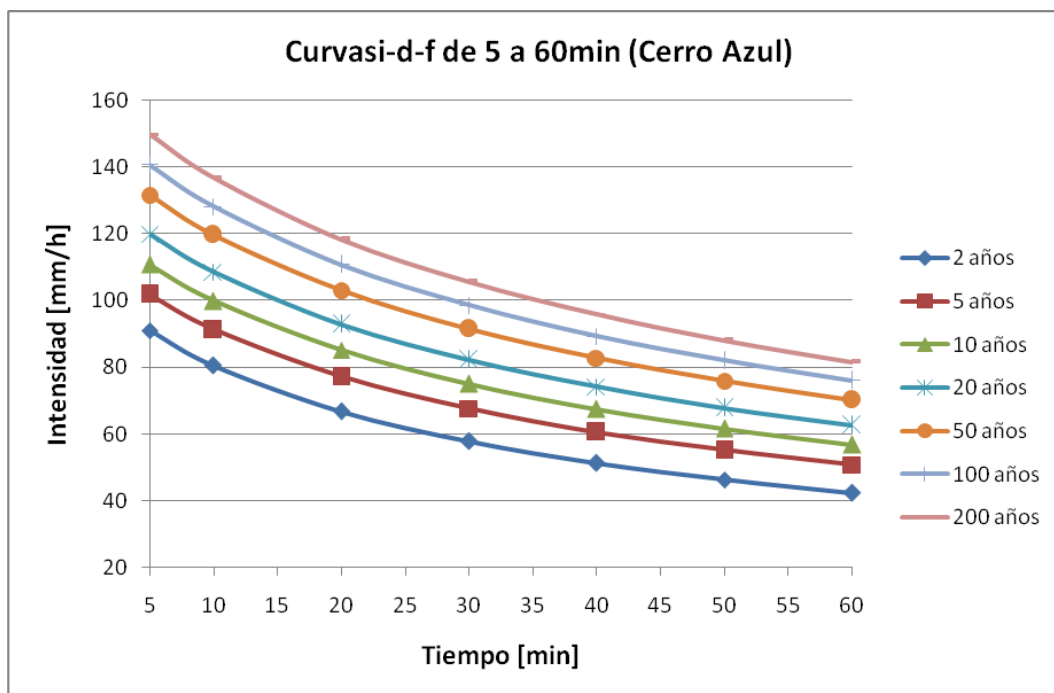
$$i = \frac{a}{D^{0.82} + c} \quad (3.1)$$

Donde:

- $i$ : intensidad en mm/hs
- $D$ : duración de la tormenta en minutos
- $a$  y  $c$ : constantes tabuladas en función de los años de recurrencia, las cuales se observan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Constantes de las curvas  $i$ - $d$ - $f$  para Cerro Azul (1966-1984) (Litwin y Franco, 1987).

Recurrencia [años]	$a$	$c$
2	1984.01	18.06
5	2530.53	21.12
10	2916.41	22.6
20	3285.62	23.68
50	3765.52	24.87
100	4123.72	25.57
200	4481.44	26.19



**Figura 3.4.** Curvas  $i$ - $d$ - $f$  de 5 a 60 minutos para Cerro Azul (1966-1984) (Adaptado de Litwin y Franco, 1987).

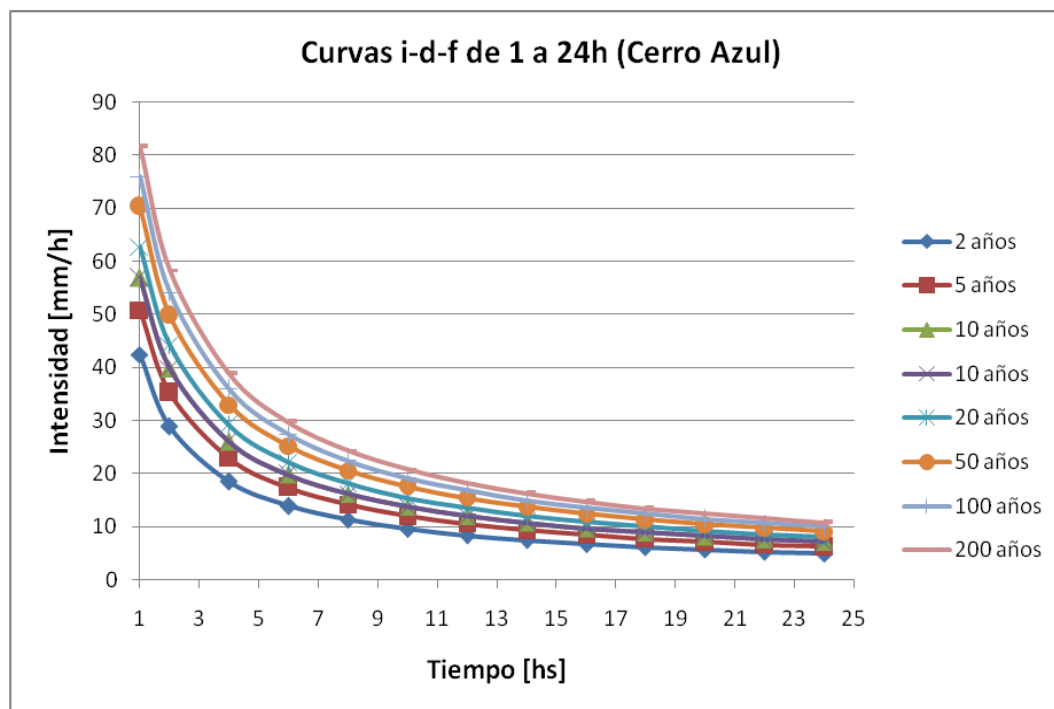


Figura 3.5. Curvas i-d-f de 1 a 24 horas para Cerro Azul (1966-1984) (Adaptado de Litwin y Franco, 1987).

### Caracterización de las tormentas

Además de poseer elevados módulos pluviométricos anuales, la región se encuentra sometida a intensas precipitaciones de frentes convectivos.

Las tormentas intensas, con grandes volúmenes precipitados en pequeños períodos de tiempo, generalmente, son provocados por el pasaje de líneas de inestabilidad provenientes del Sudoeste, usualmente asociadas a frentes fríos de la misma dirección. La duración de estas tormentas depende directamente del tiempo de permanencia de estos sistemas de frente frío y su velocidad de desplazamiento. Mientras que las tormentas de mayor duración, más de tres días, se presentan en la región como frentes semiestacionarios, asociados a sistemas de baja presión en las zonas más altas de la atmosfera, provenientes del Oeste. Los volúmenes de precipitación, en estos casos, están íntimamente relacionados con la distribución de humedad y temperatura en la troposfera inferior (Litwin y Franco, 1987).

Como ejemplo de un evento intenso, podemos citar el del día 1 de diciembre de 2012, donde precipitaron 276mm en menos de 12h, según los registros de la estación FI-UNaM (FI-UNaM, 2016), Lo crítico de esta tormenta fue la intensidad precipitada, por ejemplo, los 96.4mm precipitados en los 30 minutos de mayor intensidad. En la Tabla 3.4 se detallan la lámina en intensidades registradas en los distintos intervalos de tiempo.

Tabla 3.4. Precipitaciones máximas por intervalos de tiempo de la tormenta de 1-dic-12 (FI-UNaM, 2016).

Duración	[min]	1	5	15	30	60	120	240	360	480	720
	[h]	0.017	0.08	0.25	0.5	1	2	4	6	8	12
Precipitación	[mm]	6.4	21.6	56.4	96.4	131.4	147.0	191.8	242.6	249.0	276.0
Intensidad media	[mm/h]	384.0	259.2	225.6	192.8	131.4	73.5	48.0	40.4	31.1	23.0

### 3.1.1.3. Temperaturas

Para la descripción de las temperaturas en la zona de estudio se utilizaron los datos de la estación Samambaya, las cuales son observadas a una altura de 1.5m sobre el suelo. Para dicha estación la temperatura media anual es de 19.4°C.

En la Figura 3.6 se presentan las temperaturas medias mensuales, en ella vemos que tanto para temperaturas mínimas, medias y máximas se presenta el mes de enero como el más caluroso, mientras que el mes de julio se el mes más frío del año en temperaturas medias y mínimas.

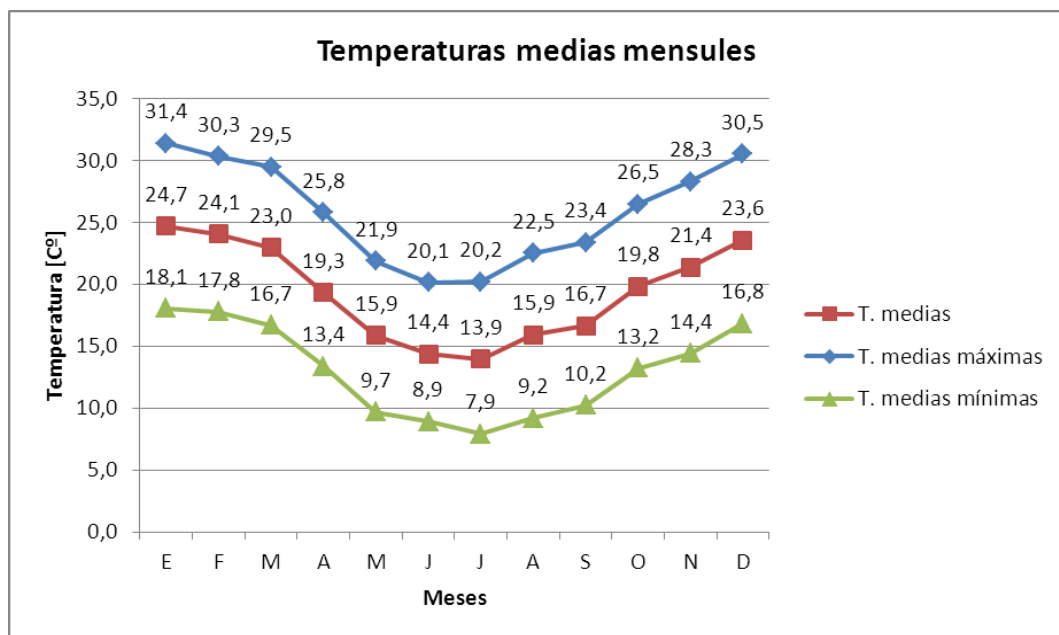


Figura 3.6. Distribución de temperaturas medias mensuales en la zona de estudio (1998-2012).

### 3.1.1.4. Humedad ambiente

Al igual que las temperaturas, para el análisis de la humedad ambiente se tomaron los datos de la estación Samambaya, el cual cuenta con valores diarios de humedad relativa.

De la Figura 3.7 se visualizan las humedades relativas medias mensuales. En la misma podemos observar que el mes de junio se presenta como el de mayor humedad, mientras que es el mes de agosto el de menor humedad relativa en el ambiente. Es de hacer mención

nuevamente, que es el mes de agosto el que se exhibe históricamente con menores precipitaciones.

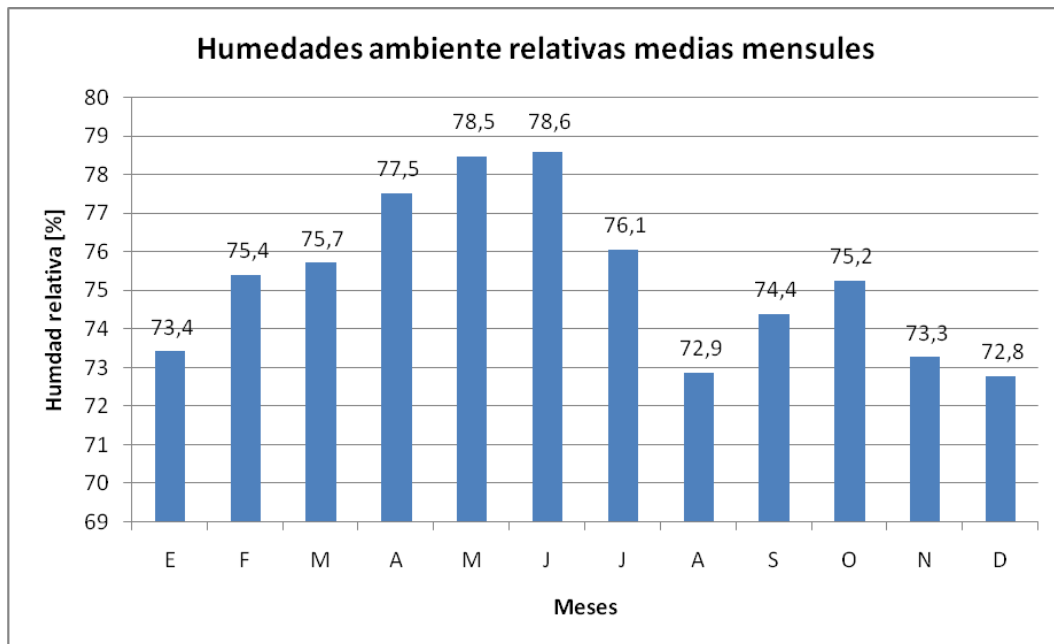


Figura 3.7. Distribución de humedades relativas medias mensuales en la zona de estudio (1998-2012).

En la Figura 3.7 podemos observar valores altos de humedad todo el año, sin diferencia significativa de humedad entre las distintas estaciones del año. Estos altos valores constantes de humedad y temperatura, contribuyen al rápido crecimiento de las plantas y el desarrollo de la selva paranaense, favoreciendo condiciones óptimas de retención al escurrimiento superficial.

### 3.1.1.5. Evapotranspiración

Para la evaluación de la evapotranspiración potencial se utilizó el método de Thornthwaite (Zimmermann, 2008) el cual se basa en numerosos experimentos realizados en casillas lisimétricas. Dicho método plantea la evapotranspiración potencial mensual en mm para un mes ficticio de 30 días como:

$$E_m = 16 \left( 10 \frac{T}{I} \right)^\alpha \quad (3.2)$$

Donde:

- $I$ : índice calórico (Ecuación 3.3)
- $i$ : índices mensuales (Ecuación 3.4)
- $T$ : temperatura media mensual [°C]
- $\alpha$ : exponente (Ecuación 3.5)

$$I = \sum_1^{12} i \quad (3.3)$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (3.4)$$

$$\alpha = 675 \times 10^{-9} \cdot I^3 - 77 \times 10^{-7} \cdot I^2 + 1.972 \times 10^{-5} \cdot I = 0,49249 \quad (3.5)$$

Finalmente la evapotranspiración potencial se obtiene como:

$$ETP = E_m \frac{N}{12} \frac{d}{30} \quad (3.6)$$

Donde:

- N: número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y la latitud de la zona de estudio, 27° 30' Sur para nuestro caso.
- d: número de días del mes.

En la Tabla 3.5 se detalla en cálculo de la *ETP* para cada mes del año, utilizando el método de Thorthwaite y las temperaturas medias de Samambaya. En ella observamos que la evapotranspiración potencial mensual varía a lo largo del período desde un máximo de 161.6mm en enero y un mínimo de 34.6mm en julio.

**Tabla 3.5.** Evapotranspiración potencial de Thorthwaite para la zona de estudio [mm].

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>T [°C]</i>	24.7	24.1	23.0	19.3	15.9	14.4	13.9	15.9	16.7	19.8	21.4	23.6
<i>i</i>	11.2	10.8	10.0	7.8	5.7	4.9	4.7	5.8	6.2	8.0	9.0	10.5
<i>I</i>	94.7											
<i>α</i>	2.24											
<i>Em [mm]</i>	137.0	129.4	116.4	79.3	50.8	40.8	38.1	51.1	56.8	83.8	99.3	123.6
<i>N [h]</i>	13.7	13.1	12.35	11.6	10.9	10.5	10.5	11.2	12	12.8	13.4	13.8
<i>d [días]</i>	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
<i>ETP [mm]</i>	161.6	131.9	123.8	76.6	47.7	35.9	34.6	49.2	56.8	92.3	111.3	147.4

Cabe destacar que diversos estudios indican que el método de Thorthwaite para la evaluación de la evapotranspiración potencial puede arrojar errores en épocas en que la advección del aire cobra mayor importancia, no obstante es muy utilizado como primera aproximación de la demanda climática ideal del agua (Litwin y Franco, 1987).

### 3.1.1.6. Balance hídrico

Para hallar la evapotranspiración real *ETR* se utilizó el método del balance hídrico de Thorntwaite (Zimmermann, 2008), quien plantea un límite en las reservas del suelo y realiza

un balance a lo largo de un periodo anual de los ingresos por precipitación  $P$  y salidas por evapotranspiración real y escurrimiento superficial  $Q$ .

Para la zona de estudio se considera que el límite de capacidad de retención del perfil del suelo es de 150mm (Litwin y Franco, 1987). Esta reserva está disponible para satisfacer la demanda de evapotranspiración requerida por falta de precipitación. En caso de colmatarse las reservas, el exceso de precipitación se transforma en excedente disponible para flujo superficial y percolación profunda.

Según Thorntwaite, la mitad del excedente se escurre en el mes considerado y la otra mitad, por escurrimiento subterráneo, es trasladado al mes siguiente (Zimmermann, 2008).

En la Tabla 3.6 se detalla el cálculo del balance hídrico para la zona en estudio, en función a las variables climáticas detalladas anteriormente.

**Tabla 3.6.** Balance hídrico de Thorntwaite para la zona de estudio [mm].

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>P</b>	152.3	134.7	146.9	196.5	138	153	112.8	96.0	148.3	252.6	186.1	207.5	1924.7
<b>ETP</b>	161.6	131.9	123.8	76.6	47.7	35.9	34.6	49.2	56.8	92.3	111.3	147.4	1069.0
<b><math>\Delta R</math></b>	-9.3	2.8	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>R</b>	140.7	143.5	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150	
<b>ETR</b>	161.6	131.9	123.8	76.6	47.7	35.9	34.6	49.2	56.8	92.3	111.3	147.4	1069.0
<b>Def</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Exc</b>	0	0	16.7	119.9	90.3	117.1	78.2	46.8	91.5	160.3	74.8	60.1	855.7
<b>Q</b>	39.35	19.7	18.2	69.0	79.7	98.4	88.3	67.5	79.5	119.9	97.3	78.7	855.7
<b>P-ETP</b>	-9.3	2.8	23.1	119.9	90.3	117.1	78.2	46.8	91.5	160.3	74.8	60.1	855.7

En la Tabla 3.6 observamos que las reservas del suelo se ven escasamente afectadas solo durante los meses de enero y febrero, encontrándose de demanda de evapotranspiración siempre zaceada, por lo que, según estos valores medios mensuales históricos no se presentan estaciones secas. Es de hacer notar, que la escorrentía superficial existe durante todo el periodo, con importantes volúmenes erogados desde abril a diciembre.

### 3.1.1.7. Clasificación climática

#### Köppen (1918)

Según la clasificación propuesta por Köppen (1918), citado por SMN (2012) la zona de estudio está comprendida en el clima "C" seguido por las letras "a" y "f", formándose el tipo climático "Caf" que significa clima húmedo subtropical (veranos muy calurosos) con

temperaturas en el mes más frío entre 0°C y 18°C y en el mes más cálido con temperaturas promedio mayores a los 22°. No hay estación seca.

### **Thornthwaite (1948)**

De acuerdo a la clasificación climática propuesta por Thornthwaite (1948), citado por Litwin y Franco (1987), el clima de la región en estudio es húmedo, mesotermal (temperaturas medias), con escaso o nulo déficit de agua y elevada concentración en verano, que da origen a una vegetación boscosa.

### **Blair (1962)**

Blair (1962), citado por SMN (2012), clasifico las zonas climáticas en función a los promedios pluviométricos mensuales y anual. Para este autor la zona en estudio se clasifica como húmeda con módulos pluviométricos comprendidos entre 1000 y 2000mm.

### **Papadakis (1962)**

Papadakis (1962), citado por Olinuck (1998), define cinco tipos de regímenes pluviométricos. En dicha clasificación la zona de estudio corresponde a un régimen isohigro, con estaciones hídricas poco definidas. En cualquier estación, pueden presentarse sequías o abundantes lluvias. Las precipitaciones del semestre frío tienden a igualar a las del semestre cálido.

#### **3.1.1.8. Tendencias de cambio climático**

En el 2015, el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, publicó "*Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones*" (CIMA, 2015), en el marco de la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Posteriormente, basados en este trabajo, Dickie y Coronel (2016) realizaron un análisis de los cambios registrados en la región húmeda de la Argentina, comprendida por las provincias de Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires.

Particularmente, para la región comprendida por las provincias de Corrientes y Misiones los autores sintetizan los siguientes cambios climáticos que en el período 1950-2010:

- La temperatura media aumentó 0.1°C.
- La temperatura mínima media aumentó 0.4°C.
- La temperatura máxima media aumentó 0.3°C.
- En promedio, el número de días con heladas se redujo y casi han desaparecido en las zonas bajas de Misiones.

- La precipitación media anual aumento 94.1mm (representando un aumento del orden 5% en 60 años para la zona de estudio).

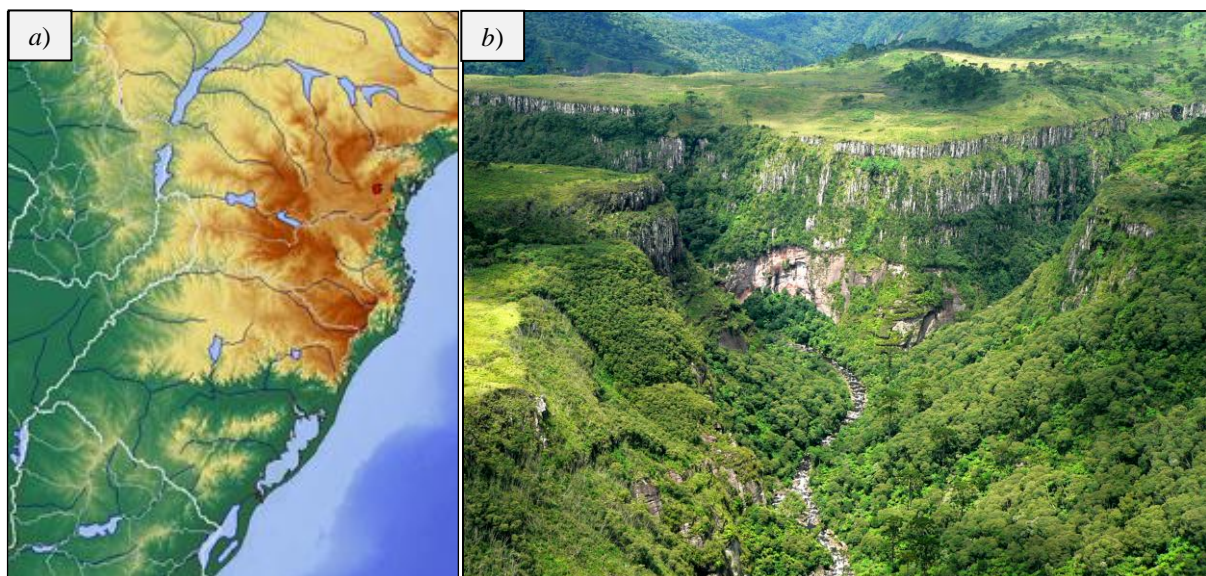
El informe de CIMA (2015) concluye que “...el calentamiento de esta región habría estado generado en buena medida por el aumento de los gases de efecto invernadero, aunque regionalmente modulado por otros procesos como los relacionados con la lluvia o con cambios en la circulación atmosférica. Igualmente los indicadores de extremos, como aquellos asociados con heladas u olas de calor han cambiado en forma consistente con la temperatura media, evidenciando también el calentamiento regional”.

Además, el citado informe afirma que la precipitación media anual ha aumentado en casi toda la región húmeda de la Argentina y en muchas zonas en forma significativa. Aumento producido en todas las estaciones del año, excepto en el invierno en el que prácticamente hubo una disminución de la precipitación. Esta última conclusión hace presuponer que, además de un aumento de las precipitaciones existe una tendencia a la concentración de las lluvias en los meses no invernales.

### 3.1.2. Edafología

#### 3.1.2.1. Geología

White (1908), citado por Hausen (1919), asegura que las rocas que afloran en el territorio Misionero pertenecen a las formaciones Saõ Bento y Serra Geral (Figuras 3.8.a y b), de la formación Santa Catalina, en la parte más meridional de Brasil, por lo que Misiones se presenta como una transición entre esta formación y la llanura chaco-pampeana.



**Figura 3.8.a.** Alcance de la Formación Serra Geral (Relief Map, 2016).  
**b.** Paisaje característico de la Formación Serra Geral en Brasil (ICMBio, 2016).

Según Gentili y Rimoldi (1979) la región del centro de la provincia de Misiones, se enmarca dentro del ambiente geológico denominado Formación Curuzú Cuatiá, de gran extensión dentro de la Mesopotamia (Figuras 3.9.a y b). Dentro de la misma se pueden dividir dos segmentos: uno de origen magmática denominado Miembro Posadas, sinónimo de Formación Serra Geral, y otro de origen clástica llamado Miembro Solari, sinónimo de la Formación Saõ Bento.

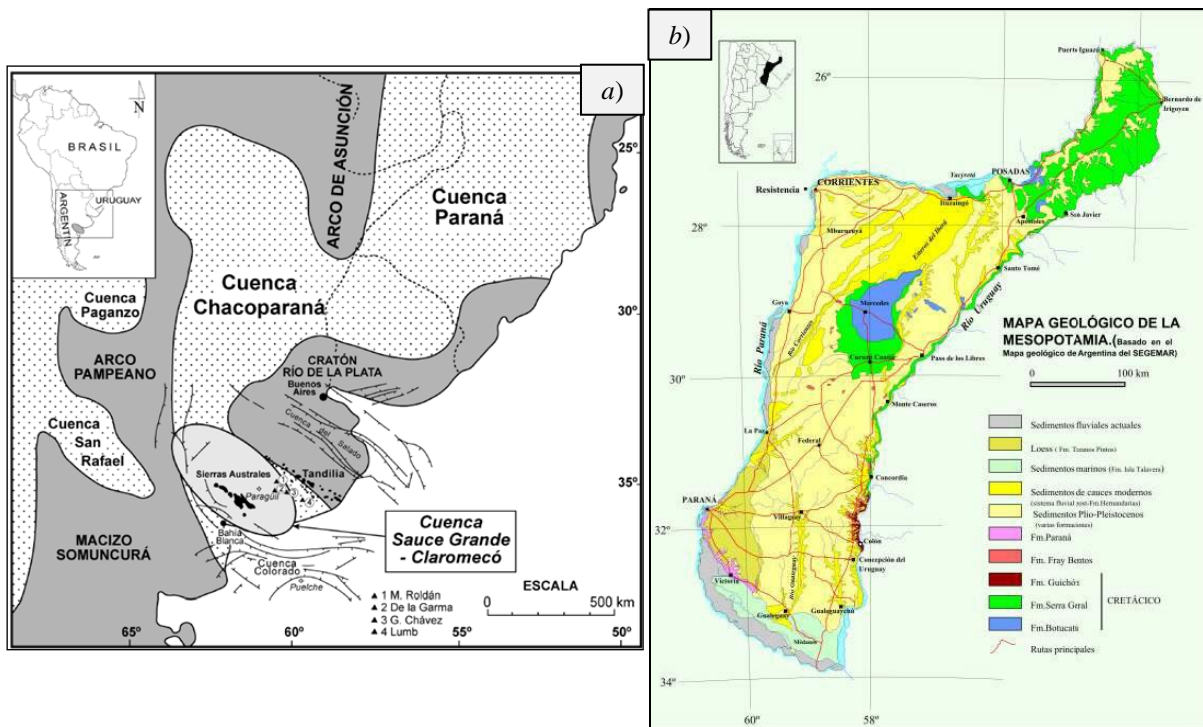


Figura 3.9.a. Extensión de las cuencas neopaleozoicas del centro y noreste argentino (Zambrano, 1974, modificado por Di Pasquo et al., 2006);

b. Mapa geológico de la Mesopotamia. En Misiones: en verde Formación Serra Geral, en beige sedimentos Plio-pleistocenos (varias formaciones) y en azul Formación Botucatú. (SEGEMAR, 2006).

Según Loczy (1966), citado por De Salvo (1990), en un alcance más amplio, el territorio de la provincia se encuentra sobre el ambiente geológico de la Cuenca del Paraná. Este ambiente presenta una fosa tectónica de forma elipsoidal con su eje principal en dirección N-NE, coincidiendo el mismo en su parte superior con el curso del río Paraná y en su parte inferior con el del río Uruguay.

Durante el Paleozoico Medio se inicia la sedimentación de la cuenca, pero es a partir del Mesozoico, donde se depositan las areniscas de la Formación Misiones, conocida como Formación Botucatú en Brasil, el cual es el mayor depósito de sedimentos continentales del mundo (Harrington, 1950, citado por De Salvo, 1990).

Posteriormente, en el Cretácico, se inicia un magmatismo básico de gran extensión areal dentro de la cuenca, alcanzando los  $1150000\text{km}^2$  con un espesor promedio de 650m confeccionado por los sucesivos derrames basálticos (Reinert, 2007).

Dichos derrames salieron a la superficie a través de grandes fisuras sobre la corteza terrestre. Con un espesor promedio de 40m, los mismos presentan una zona central o basal compuesta por basalto denso y una zona superior formada por basalto vesicular amigdaloides, de no más de 5m de espesor, que constituye el techo de cada derrame.

Durante los períodos de calma magmática, elementos de la misma lava junto a sedimentos terrígenos, como arenas depositadas o suelos residuales, forman un tercer tipo litológico denominado brecha.

El resultado es entonces una roca de génesis mixta que se denomina brecha basáltica por el carácter anguloso de los clastos que la constituyen (Reinert, 2007).

El basalto de Misiones presenta una estructura con un significativo fracturamiento, característico de basaltos muy densos. Los autores Gentili y Rimoldi (1979) afirman que el Departamento de Oberá se enmarca dentro de la denominada Formación Apóstoles, la cual presenta afloramientos representativos en las márgenes del Río Uruguay.

Dada las características climáticas de la región, el basalto de la provincia de Misiones ha sufrido un proceso de meteorización significativo, dando lugar al desarrollo de suelos residuales de naturaleza arcillosa o limo-arcillosa de color pardo rojiza, que en los niveles inferiores asume una coloración roja.

En las áreas de meteorización avanzada, se produce generalmente una concentración de sesquióxidos de hierro y aluminio debido al proceso de laterización. El espesor de la zona meteorizada varía de acuerdo con la composición mineralógica del basalto y de las condiciones topográficas (Reinert, 2007).

### **3.1.2.1. Edafología y estratigrafía**

Ligier et al. (1990) realizaron un reconocimiento de los órdenes representativos de los suelos misioneros desarrollando los siguientes seis órdenes:

#### **Ultisoles**

Representan la mayor superficie de la provincia, predominan en la meseta central y se les identifica como suelos rojos (Figura 3.10.a).

Una de las características más importantes de estos suelos es la presencia de un horizonte argílico, el cual se genera por el arrastre mecánico, o por el agua gravitacional, de las fracciones más finas, fundamentalmente arcilla, de la superficie al interior del suelo. Las partículas dispersas en el agua o eluviadas (descenso mecánico), se depositan en profundidad, bien rodeando las estructuras ya existentes, o bien taponando los poros de menor tamaño.

Otra característica de los Ultisoles es la baja saturación de base en el perfil, por lo que son suelos generalmente asociados a climas cálidos y húmedos, y se localizan en paisajes morfológicos antiguos.

Los procesos de génesis a destacar, además del acarreo mecánico, es el lavado de base de las cuencas. Debido a las condiciones climáticas en las que evolucionan estos suelos, se produce una alteración rápida y compleja de los minerales capaces de meteorizarse para formar arcillas y óxidos.

### **Oxisoles**

Estos suelos también son denominados suelos rojos y se encuentran en la región de meseta, pero se dificulta su identificación en el paisaje (Figura 3.10.b). Se caracterizan por presentar un horizonte en avanzado estado de alteración de sequeóxidos (óxido de *Fe* y *Al* en los dos primeros metros de la superficie) o por contener plintita (laterita rica en *Fe*) en los primeros 30cm de la superficie mineral del suelo.

Los procesos más importantes durante la evolución de los Oxisoles son la pérdida de *Si* y concentración de *Fe* libre y Gipsita junto a la desaparición de los minerales fáciles de meteorizar y el lavado de los nutrientes (*Ca*, *Mg*, *K*, etc.).

### **Entisoles**

Estos también conforman los suelos rojos junto a los Ultisoles y Oxisoles. Se encuentran en las pendientes de la zona de meseta (Figura 3.10.c).

Los Entisoles son suelos cuya evolución incipiente no le ha permitido desarrollar marcados horizontes genéticos. Este fenómeno se debe a una serie de causas tales como:

- Las diferentes formas de erosión, mayormente hídrica en la provincia, remueven material superficial de un sitio y lo traslada de manera muy rápida.
- Con los diferentes procesos de acumulación se pueden adicionar materiales nuevos a la superficie del suelo.

- La saturación con agua, aún la inundación del suelo, por períodos largos, inhibe el desarrollo de horizonte.
- Un tiempo demasiado corto desde la exposición del material parental a la acción de los diferentes factores de formación del suelo.

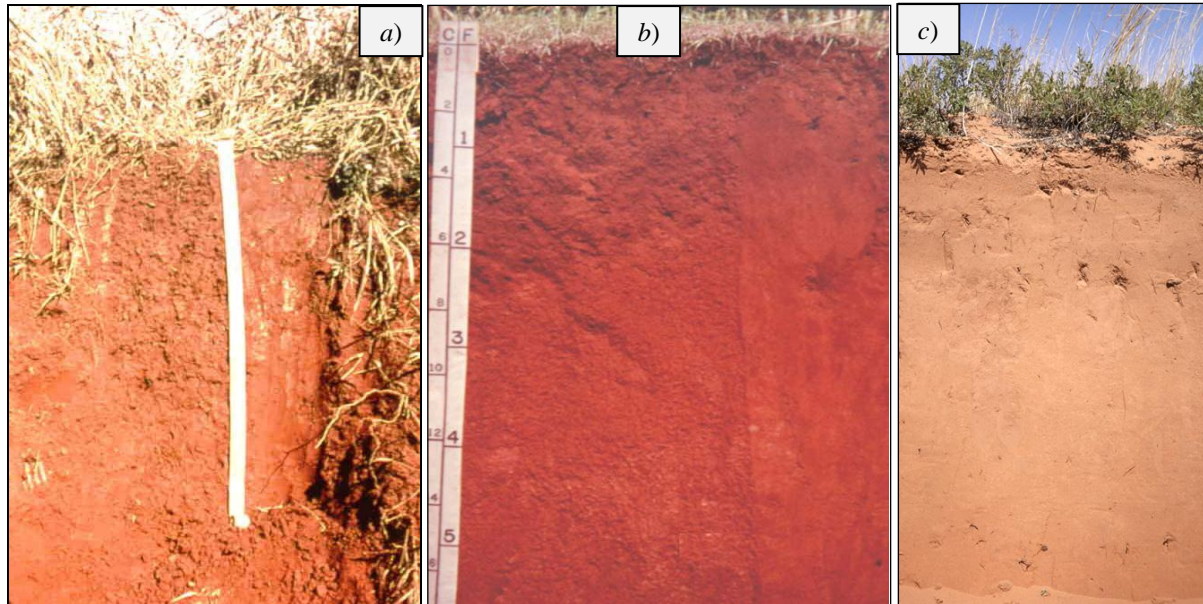


Figura 3.10. a. Ultisol. b. Oxisol. c. Entisol (Herrera, 2016).

### Alfisoles

Estos suelos se desarrollan en zonas de pendientes, formando complejos con los Ultisoles y Oxisoles. Además se encuentran en áreas de transición entre las mesetas (suelos colorados) y las vertientes (suelos pardos). A diferencia de los Ultisoles estos suelos presentan mayor saturación de base (Figura 3.11.a).

El proceso más importante en la génesis de estos suelos es la traslocación de las arcillas desde la superficie hasta su disposición en un horizonte arcillo-arenoso pardo rojizo oscuro. Para la generación de los Alfisoles es necesario el lavado de los carbonatos de la zona radicular.

### Molisoles

Son suelos dominantes en áreas erosionadas, se puede encontrar ocupando sectores de suelos pardos y sectores de suelos rojos, por lo que pueden ocupar sectores de pendiente, terraza o planicies aluviales (Figura 3.11.b).

El asalto se presenta en distintos estados de alteración y a diferentes profundidades. Es este el que provee nutrientes al suelo. Un tercer horizonte “C” presente en algunos perfiles de suelo también proviene de la descomposición del basalto.

La formación de los Molisoles está muy relacionada con la adquisición de materia orgánica y posterior descomposición subsuperficial de todos los residuos en presencia de cationes bivalentes, particularmente la descomposición de la materia orgánica ante estas condiciones produce el fenómeno de melanización, responsable del oscurecimiento del suelo.

### Inceptisoles

Son suelos evolucionados en zonas con drenaje imperfecto, sectores anegables por largos periodos de tiempo (Figura 3.11.c). Suelos franco-arcillosos y limosos en los se observan tres horizontes (A, B y C).

Este orden de suelo incluye determinados suelos de las regiones subhúmedas y húmedas que no han alcanzado a desarrollar caracteres distintivos de los otros ordenes, pero poseen evidencias de desarrollo mayores que las de los Entisoles. Se debe interpretar como suelos inmaduros que tienen débil expresión morfológica respecto de los suelos maduros. Muestran horizontes alterados que han sufrido pérdida de bases, hierro y aluminio pero conservan reservas de minerales meteorizables.

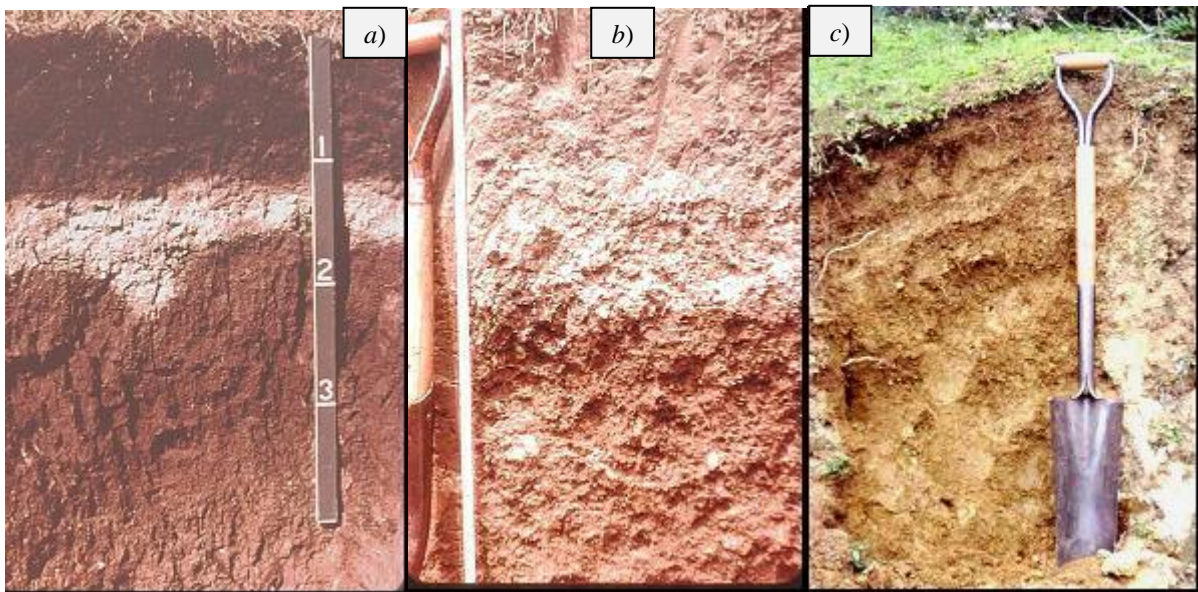


Figura 3.11.a. Molisol. b. Alfisol. c. Inceptisol (Herrera, 2016).

En la génesis de los Inceptisoles ocurren varias rutas dependientes de los procesos activos en un paisaje o área geográfica dada. En teoría todos los procesos pedogénéticos pueden estar activos en algún grado, pero ninguno predomina. Factores ambientales pueden afectar la meteorización (baja temperaturas, baja precipitación, resistencia del material parental), y lo que hace que el desarrollo del suelo sea retardado y aun inhibido (Zapata Hernandez, 2006).

Los Inceptisoles se pueden formar sobre depósitos aluviales. En estas condiciones, las inundaciones temporales pueden alterar la morfología del perfil al depositar superficialmente materiales y al mantener saturado el suelo favoreciendo condiciones temporales de reducción.

En áreas de depresión o fondos de valle, el proceso de gleización, en los Inceptisoles encontrados, produce condiciones reducciformes. En otras áreas, es posible el proceso de lavado, sin llegar a darse una condición de translocación de arcillas y la formación de un horizonte B se ve retardada, dado que el perfil del suelo no llegue a secarse lo suficiente.

Respecto a la caracterización edafológica de la región, la Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos (CARTA, 1964), realizó un informe edafológico de la Provincia de Misiones, basados en datos obtenidos por fotointerpretación con un adecuado control de los límites de cada complejo, mediante la inspección con muestreo en campo, y una secuencia de ensayos efectuados en laboratorio.

Se identificaron once complejos de suelos en la provincia, entendiendo por complejo de suelo, una unidad cartográfica utilizada para relevamientos detallados, comprendiendo dos ó más unidades taxonómicas reconocidas por el Soil Survey Manual. Las mismas pueden ser similares o muy diferentes, pero se encuentran juntas e íntimamente asociadas geográficamente, que no pueden ser separadas dentro de la escala utilizada.

La provincia de Misiones está cubierta, de manera general, por suelos lateríticos de color rojo, cuyo mineral predominante es la caolinita, lo cual resulta típico en regiones con climas subtropicales húmedos.

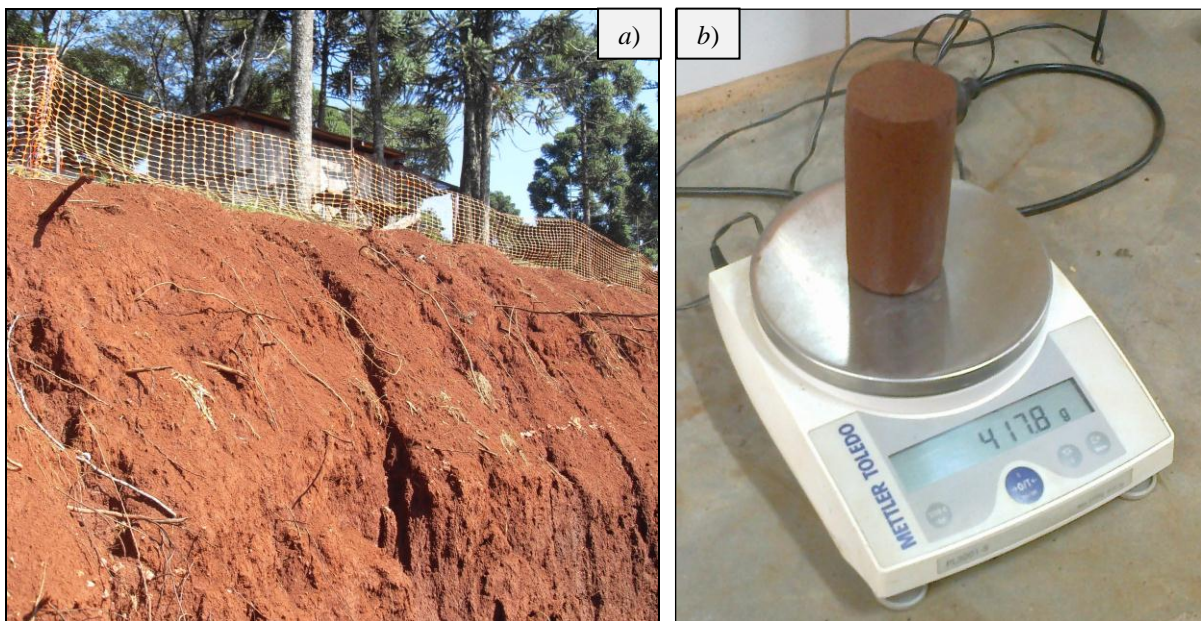
Según la clasificación edafológica realizado por CARTA (1964), la zona en estudio presenta en su gran mayoría suelos del Complejo 9: Tierra colorada. Sin embargo existen pequeñas zonas de interés para este estudio con presencia de suelos del Complejo 6: Suelos pedregosos y del Complejo 3: Aluviones de los arroyos principales.

### **Complejo 9: Tierra Colorada**

El suelo que caracteriza a este complejo es el de mayor importancia agrícola en Misiones. Por sus condiciones de fertilidad, debe hacerse una diferencia entre la tierra colorada de la zona de campo y la de monte, como es la de Oberá. Si bien, genéticamente, son suelos de ambas zonas perteneces al mismo subgrupo, el suelo de monte tiene rendimiento de producción de hasta un 150% más que el de campo.

Las arcillas de Complejo 9 son los suelos más fácilmente trabajables de la provincia. En casi su totalidad se presentan en zonas de pendiente que son moderadas para la región, de entre el 15 y 25%. En zonas de mayor pendiente la profundidad de los mismos disminuye debido a la erosión.

Se presentan como suelos profundos, en todos los casos superiores a un metro, aptos para especies de gran desarrollo radicular. Su estructura es favorable pese al elevado contenido de arcilla. La mayor parte de su arcilla es de tipo caolinítico (Figuras 3.12.a y b), existiendo además un elevado tenor de sesquióxidos, los cuales permiten la formación de agregados estructurales generalmente estables.



*Figura 3.12.a. Corte de suelo colorado para obra civil. b. Probeta de suelo colorado para ensayo triaxial.*

A si mismo pueden dividirse en dos horizontes. Un horizonte A, caracterizado por presencia de sustancia orgánica sola o mezclada con partículas minerales, el cual presenta una estructura predominantemente grumosa o poliédrica subangular. Y un segundo horizonte subsuperficial B, caracterizado por una alteración con presencia de arcillas residuales, óxidos de hierro y aluminio o por acumulación de óxidos de hierro y aluminio, humus o arcilla provenientes de horizontes superiores. Los cuales mayormente presentan una estructura prismática.

El drenaje es bueno para los horizontes superiores, siendo algo más lento en los horizontes subsuperficiales de acumulación de arcilla.

El principal problema de estos suelos es la erosión grave, que los amenaza una vez cultivados. El laboreo excesivo resulta netamente desfavorable, debido a que destruye la

---

estructura natural del suelo, facilitando la erosión, pues se aceleran los procesos de destrucción de materia orgánica y se impide la reposición.

### **Complejo 6: Suelos pedregosos**

Los suelos de este complejo son de importancia en la provincia y representan el segundo lugar en cuanto a distribución areal después de los del Complejo 9. Son suelos más ricos en elementos nutritivos y mejor provistos en bases, por lo tanto, menos ácidos que la tierra colorada (Figura 3.13.a).

Es necesarios realizar una subclasificación en fases haciendo, hincapié en una serie de parámetros característicos.

#### Fase 6A

Poseen una topografía plana, raramente encontrada en el terreno provincial, aunque siempre con una leve inclinación. Con perfil desarrollado en torno al metro de profundidad, consecuentemente menos susceptible a la erosión que la Fase 6B. Con una pedregosidad no superior al grado 2 y rocosidad no superior al grado 1 (Norma de US - Soil Survey Manual).

La remoción de piedras es medianamente factible, permitiéndose la labranza con maquinaria liviana. Se utiliza para la plantación de tabaco, mandioca, maíz, pinus ellioti o eucaliptus, debido a que el té y la yerba mate presentan rendimientos inferiores respecto a los implantados en suelo colorado.

En estos suelos el coeficiente de marchitez es bajo, además su textura gruesa dificulta el ascenso capilar y la evapotranspiración. Es así que en los periodos de sequía continúan con un grado de humedad importante.

Su granulometría favorece la penetración del agua de lluvia, la cual profundiza rápidamente, asiendo a estos suelos menos susceptibles a la erosión que el suelo colorado.

#### Fase 6B

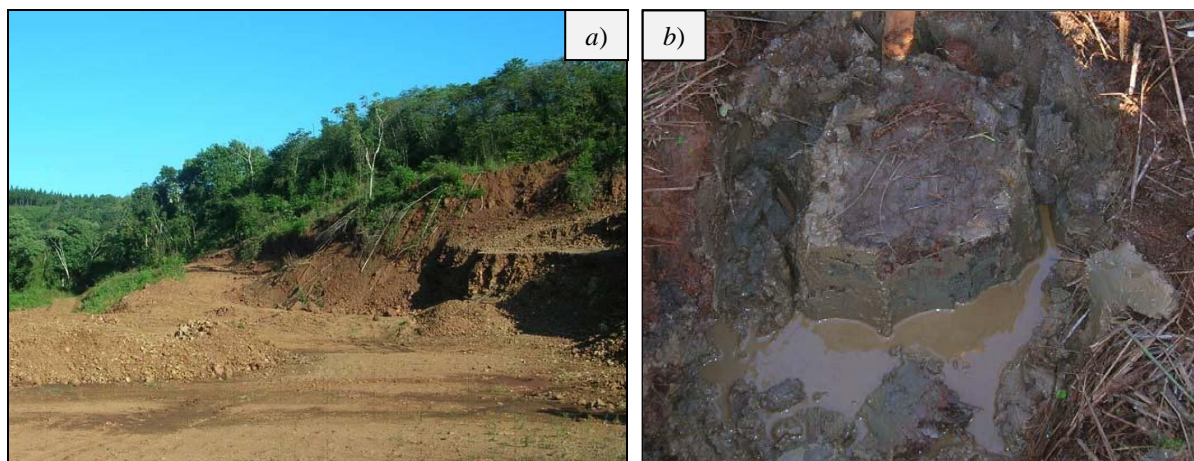
En esta fase los suelos se presentan en una topografía más accidentada, lo que deriva en una mayor susceptibilidad a la erosión con un perfil de suelo menos desarrollado. Suelos que alcanzan los grados máximos de pedregosidad y rocosidad (Norma de US - Soil Survey Manual).

El laboreo para cultivo de estos, provoca una rápida pérdida por erosión si no se toman las medidas correspondientes de prevención. Son suelos poco aptos para forestación, ya que no pueden ser utilizadas maquinarias para la labranza.

### Complejo 3: Aluviones de los arroyos principales

Este complejo a su vez debe diferenciarse en dos subgrupos de marcada diferencia en su gestación. Un primer grupo A de suelos procedentes de la alteración "in situ" de meláfiros bajo condiciones hidromórficas, es decir que se originan como resultado de inundaciones naturales o artificiales del suelo durante períodos cortos o prolongados, y un subgrupo B de suelos procedentes de depósitos aluvionales en su mayoría hidromórficos.

Dado que la ciudad de Oberá se encuentra sobre la cumbre de la Sierra Central de Misiones, donde se están las nacientes de los arroyos con pendientes significativas, los Suelos 3B son muy escasos. Aunque las condiciones climatológicas facilitan la generación de los Suelos 3A en las zonas bajas del relieve (Figura 3.13.b).



**Figura 3.13.a.** *Cantera de tosca, suelo del Complejo 6.*  
**b.** *Extracción de dama para ensayo suelo Complejo 3A (Reinert, 2007).*

Los suelos 3A representan el denominado localmente Ñau o Barro Ñau. Es una arcilla del tipo montmorrillonítica, de cromas muy oscuros y mucha plasticidad. Se presentan en el sur de la provincia, en las zonas de campo, y en la parte alta de los arroyos donde los mismos escurren encajonados y no aluvionan. Se considera que estos suelos siempre se forman a partir de la alteración in situ de los meláfiros o de material pedregoso de meláfiro disgregado provenientes de las colinas del Complejo 6. Nunca podrían formarse a partir de materiales del Complejo 9.

Estos ambientes son muy favorables para la transformación o reducción de óxido férrico en ferroso, lo que podría explicar la coloración propia de este tipo de suelo, el cual resulta

generalmente de color oscuro, ya sea gris, azulado amarillento, o verdoso, según el ambiente propio de formación (Reinert, 2007).

### Distribución de complejos de suelo en Oberá

La hoja del mapa edafológico desarrollado por CARTA (1964) que se utilizó fue la 2754-25-2 “Oberá” de escala 1:50000. Gracias a la misma se logró analizar la distribución de los complejos de suelo dentro de los límites del municipio y en la zona urbanizada hasta el año 2012 las cuales se presentan en la Figura 3.14. En dicha figura se presenta además la ubicación de la Cuenca Mbotaby, la cual ha sido utilizada como cuenca piloto en esta tesis y cuyas características hidrológicas serán detalladas más adelante en este capítulo. Seguidamente, la Tabla 3.7 presenta los porcentajes de ocupación de los distintos complejos de suelo.

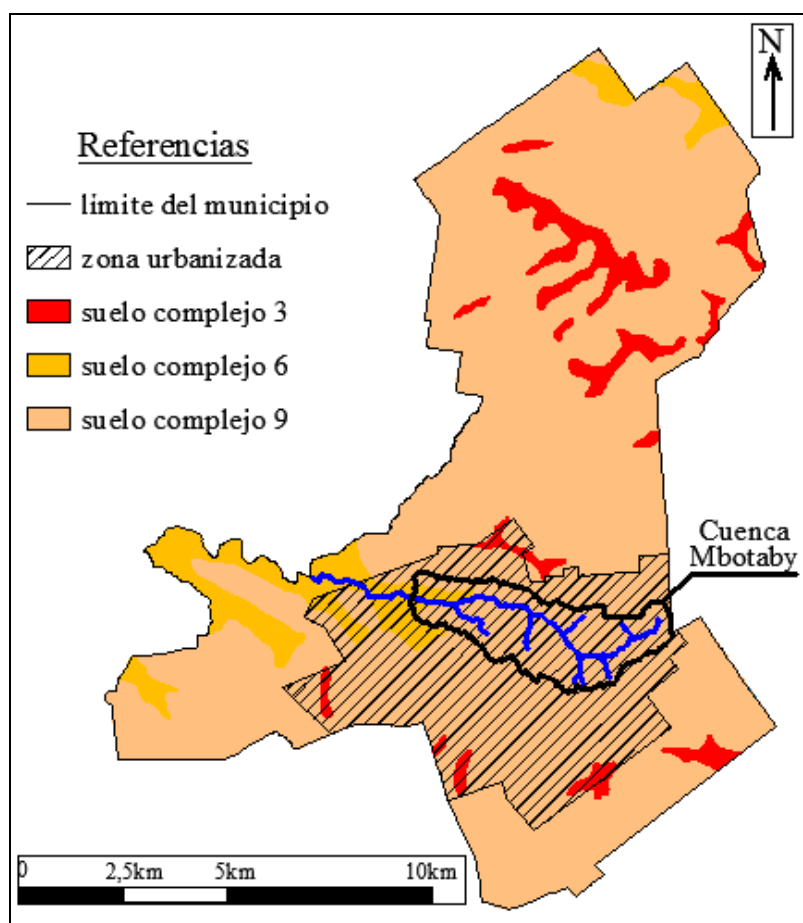


Figura 3.14. Distribución de los complejos de suelo dentro del municipio Oberá y la zona urbana (Adaptado de CARTA, 1964).

Tabla 3.7. Porcentajes de complejos de suelos dentro del municipio y la zona urbana.

Suelos	Municipio		Zona urbanizada	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]
Complejo 3	772	5.0	109	2.6
Complejo 6	930	6.0	263	6.3
Complejo 9	13752	89.0	3822	91.1
TOTAL	15453	100.0	4194	100.0

Observamos que aproximadamente el 90% del territorio municipal y urbano está constituido por suelos del Complejo 9, suelo colorado. Es de hacer notar que, aunque la Figura 3.14 separa marcadamente los distintos complejos de suelos, esta situación no es tal, ya que en determinadas regiones mapeadas con suelos del Complejo 9, existen pequeñas zonas con suelos del Complejo 3A, 6A o 6B y viceversa.

Dada la información presentada anteriormente, se está en condiciones de proponer un perfil estratigráfico representativo de la zona en estudio (Figuras 3.15), perfil que es corroborado por las dos perforaciones al Acuífero Guaraní realizadas por la CELO en la zona periurbana de Oberá, para abastecer de agua potables a parte de la población (CELO, 2013).

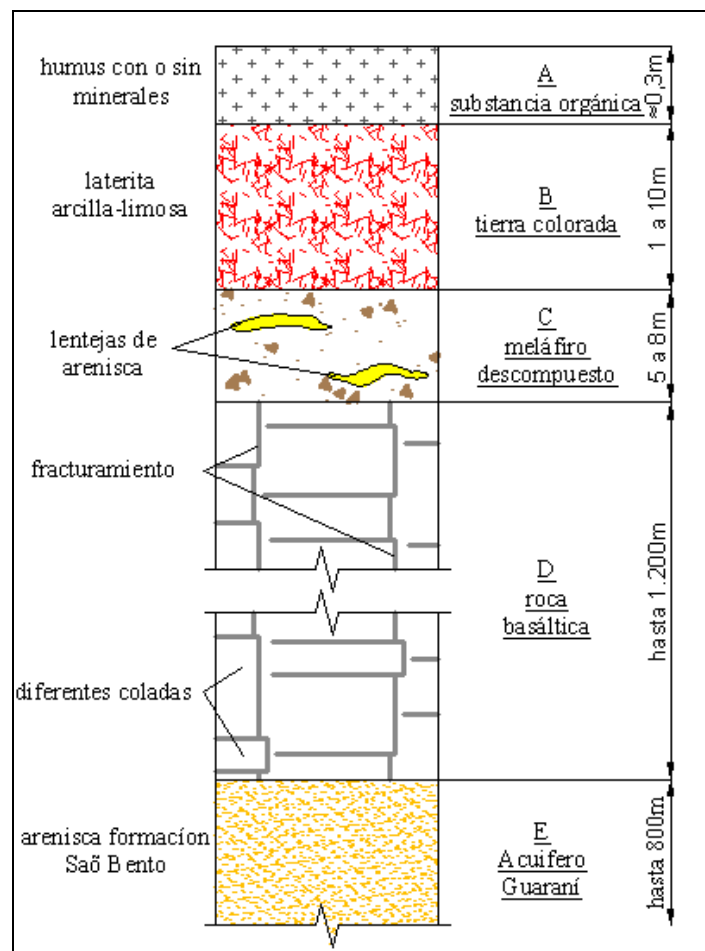


Figura 3.15. Perfil estratigráfico medio.

Se presenta así un primer estrato u horizonte A de suelo caracterizado por la presencia de sustancia orgánica sola o mezclada con partículas minerales, un horizonte B de suelo colorado laterítico de 1 a 10m de espesor, un horizonte C de meláfiro descompuesto o tosca de generalmente 5 a 8m de espesor, y un horizonte D de roca basáltica que puede extenderse hasta los 1200m a través de sucesivos derrames históricos de magma, antes de llegar al techo

---

del Acuífero Guaraní. Acuífero que está constituido por areniscas de la formación Saõ Bento con espesores que van desde los 50 a los 800m.

Como se hizo mención anteriormente, existen zonas puntuales donde el perfil representado en la Figura 3.15 no es representativo. En las proximidades de los arroyos se pueden encontrar tierras negras y terrenos arcillosos y/o arcillo-limosos, siendo el más común el denominado suelo ñaú, que corresponde a una arcilla gris del tipo suelo tropical residual. Intercalado con el meláfiro se pueden encontrar lentejas absolutamente irregulares de areniscas de muy alta permeabilidad. (Reinert, 2007). Además numerosos arroyos presentan sectores con un lecho constituido totalmente por el afloramiento de la roca basáltica y sectores con depósitos de cantos rodados de variados tamaños.

### **3.1.3. Orografía**

#### **3.1.3.1. Sistema orográfico**

Geográficamente, Misiones está situada fuera de la gran llanura chaco-pampeana que domina la Mesopotamia. La meseta central de la provincia es un ramal de sistema orográfico Serra Geral, con descendencia geológica y orográfica de la región montañosa del Brasil meridional (Hausen, 1919).

La provincia es una meseta rocosa, cuyo relieve es considerado una transición entre la orografía brasileña y las planicies argentinas. Hacia el Sur de la provincia el paisaje se torna paulatinamente llano, el terreno va descendiendo lentamente hasta volverse una zona de llanura.

La provincia presenta la característica de pertenecer a dos grandes sistemas de ríos, ya que la Sierra Central de Misiones es el parte aguas que divide las cuencas del Paraná y Uruguay.

Dado los niveles del terreno y las profundidades de los suelos residuales, la erosión ha creado formas topográficas muy accidentadas, donde los ríos y arroyos han cavado su cauce en el suelo, conformando lechos profundos. Particularmente, el lecho del río Paraná está muy marcado topográficamente y en determinadas zonas se presenta como un cañón.

La gran meseta se eleva en el centro del territorio provincial y sobre ella surcan arroyos que vuelcan sus aguas en saltos, cascadas, rápidos y correderas, en los ríos Paraná y Uruguay. El punto más alto de la provincia se halla en Bernardo de Irigoyen, con casi 800msnm, mientras

que la zona más baja se presenta en el Sur con 80msnm. En tanto que el departamento Oberá presenta altitudes comprendidas entre los 200 y 400msnm.

El relieve orográfico está conformado por 3 grandes sierras. La Sierra de Misiones, también llamada Central; Las sierras del Imán, al Sur de la provincia; y la Sierra de la Victoria, al Norte, la cual forma las cataratas del Iguazú (Figura 3.16).

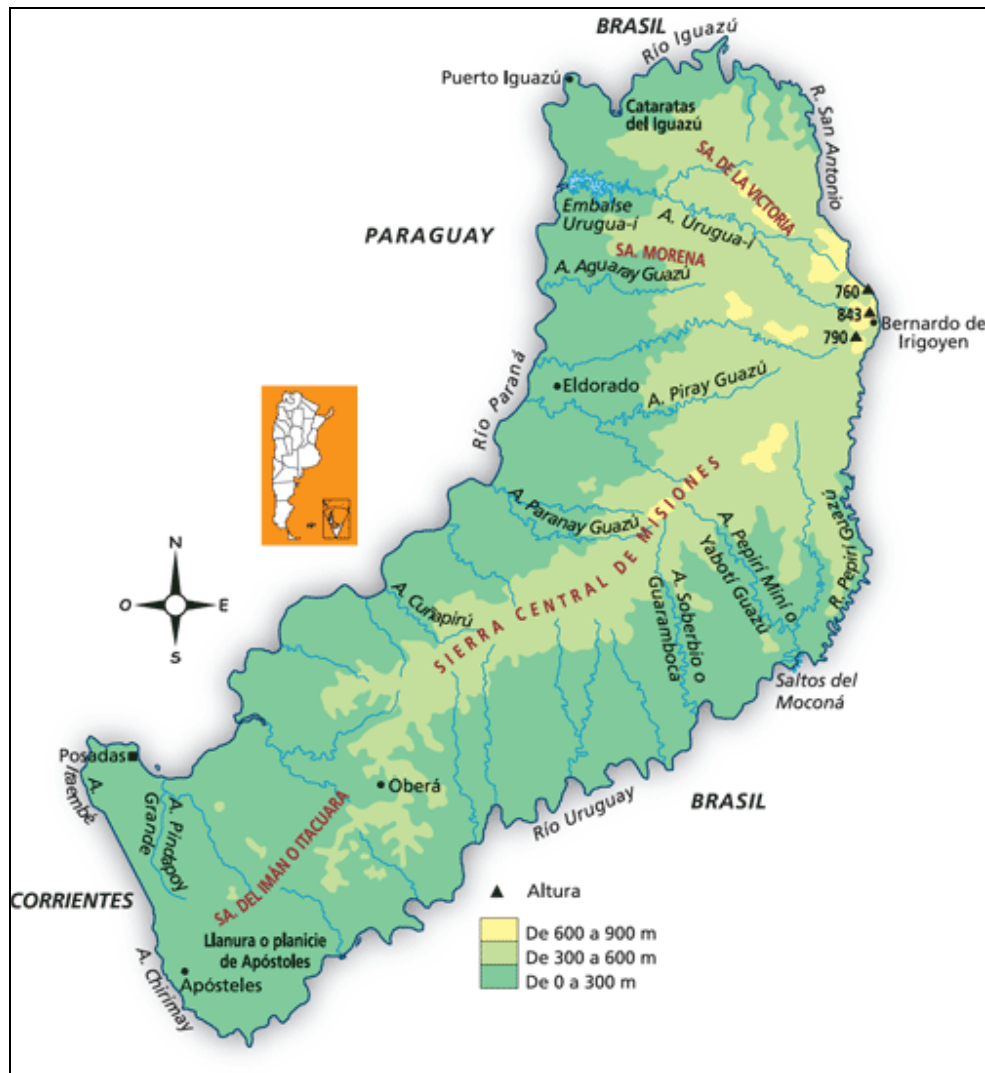


Figura 3.16. Mapa hipsométrico y sierras de Misiones (adaptado de MERNR, 2014).

Se puede reconocer los restos de una vieja planicie en las cumbres aplanadas de los cerros, como en la región central de Santa Ana y Bompland. Al Norte, en los alrededores de las cataratas del Iguazú, se caracteriza por una región llana, en la que se ha cavado el gran cañón del Río Iguazú, aguas debajo de las cataratas. Este plano corresponde a una parte de la planicie cretácea aún no transformada en cerros (Hausen, 1919).

### 3.1.3.2. Regiones naturales

Por la acción de las condiciones climáticas prevalecientes en la región, intensas precipitaciones y elevadas temperaturas, el sustrato basáltico se modeló en los sistemas geomorfológicos actuales. La génesis de los paisajes actuales de la provincia se presentan como una combinación de los factores pedogenéticos de los suelos, factores climáticos, la duración de los procesos de meteorización, naturaleza de la roca madre y el relieve accidentado (Lasserre y Rios, 1983).

Ligier et. al. (1990) realizaron una descripción de las regiones naturales de la Provincia de Misiones, basándose en las unidades morfológicas realizadas por Gross Braun (1979) y las características de la vegetación analizadas por Martínez Crovetto (1963). Los autores definieron nueve regiones naturales en base a las características geomorfológicas comunes de cada una de ellas, las cuales son:

- Meseta central preservada.
- Pediplano parcialmente disectado.
- Pediplano parcialmente disectado sin vegetación arbórea.
- Relieve montañoso fuertemente disectado.
- Relieve fuertemente ondulado a colinado.
- Etribaciones de la meseta preservada.
- Valles secundarios con depósitos aluviales.
- Zonas disectadas y encajonadas.
- Planicies suavemente onduladas y afloramientos rocosos.

Según la clasificación presentada por Ligier et. al. (1990) en la ciudad de Oberá podemos reconocer dos regiones naturales, una zona de meseta central preservada y otra con relieve fuertemente ondulado a colinado.

#### **Meseta central preservada**

Constituye el dorso central de la provincia. Se presenta como una planicie discontinua de relieve ondulado formado por lomas de longitud media y pendientes entre 5 y 9%.

La misma se extiende en dirección Suroeste-Noreste, aumentando su altitud en ese sentido, presentándose discontinuidades por fallas con escalonamiento, desde los 300msnm en Leandro N. Alem, 350msnm en Campo Viera (el cual pertenece al departamento Oberá), 600msnm en San Pedro y 800msnm en Irigoyen (frontera con Brasil).

Predominan los suelos arcillosos, rojos, profundos, de carácter ácido, pobres en bases, derivados del basalto y pertenecientes a los Ultisoles y Oxisoles.

Las especies nativas dominantes en este paisaje son la Grapia (*Apuleia leiocarpa*), Caña Fístola (*Peltophorum dubium*), Cedro (*Cedrela tubiflora*) y los helechos arborescentes de la familia de las Ciateaceas.

Con buenas condiciones para los cultivos perennes, como la yerba mate, tung y té, y producción forestales, principalmente con pinos. Condiciones que llevaron a la acentuada degradación, por acción antrópica, de la vegetación nativa de la selva subtropical paranaense.

La producción de cultivos anuales (mandioca, maíz, soja) deben contemplar la incorporación de fertilizantes y enmiendas para contrarrestar la baja fertilidad y elevada acidez, sobre todo de los Oxisoles.

La meseta central constituye la divisoria de aguas del Paraná y Uruguay, por lo que en este paisaje los arroyos recién comienzan a gestarse, presentándose mayormente como cursos intermitentes.

### **Relieve fuertemente ondulado a colinado:**

Llamada también zona Premontañosa, contiene lomas medias y cortas de gradiente medio, con pendientes de hasta el 20%, asociadas a sectores escarpados o inclinados.

Se extiende en una zona intermedia entre el Pediplano del Paraná y la Meseta central preservada. El relieve es fuertemente ondulado y domina sobre las áreas escarpadas inclinadas, modelados por la erosión hídrica y escarpas. En este sector se definen bien las cuencas de los arroyos y los valles secundarios con depósitos aluviales.

Los suelos dominantes son moderadamente profundos y pertenecen a los Alfisoles, con buena fertilidad natural, Ultisoles y en menor medida a los Oxisoles. Aquí, generalmente la materia orgánica en los suelos no alcanza los 2 metros de profundidad. Estos suelos se asocian siempre a otros someros y pedregosos de sectores escarpados o inclinados.

Dada la degradación de la vegetación autóctona por explotación de la selva nativa, se han desarrollado zonas de capueras (crecimiento descontrolado de malezas). Se utilizan para reforestación con pinos y eucaliptus y en menor medida para agricultura de subsistencia y cultivos perennes.

### Distribución de regiones en el municipio

Adaptado del trabajo de Ligier et. al. (1990) podemos definir dentro del municipio de Oberá y la zona urbanizada hasta 2012, la distribución areal de las diferentes regiones naturales. Dicha distribución se visualiza en la Figura 3.17 y cuyos porcentajes de ocupación se presentan en la Tabla 3.8.

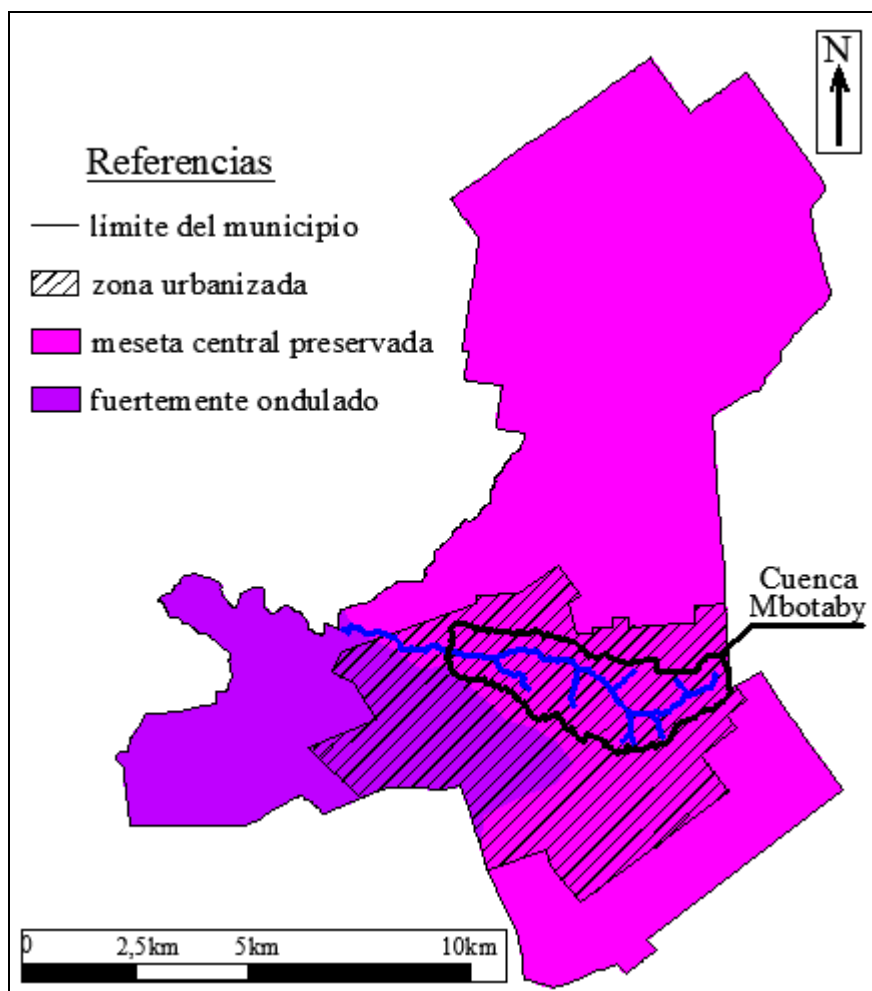


Figura 3.17. Distribución de las regiones naturales dentro del municipio Oberá y la zona urbana (Adaptado de Ligier et. al., 1990).

Tabla 3.8. Porcentajes de regiones naturales dentro del municipio y la zona urbana.

Regiones naturales	Municipio		Zona urbanizada	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]
Meseta central preservada	12279	79.5	2952	70.4
Fuertemente ondulado	3174	20.5	1242	29.6
TOTAL	15453	100.0	4194	100.0

En Tabla 3.8 se observa que casi el 80% del territorio del municipio presenta un relieve característico de la meseta central preservada, mientras que dentro de la zona urbanizada, representa cerca del 70%. El resto del territorio está caracterizado como fuertemente ondulado o colinado.

### 3.1.3.3. Mapa de pendientes

De la zona en estudio, se cuenta con un relevamiento planialtimétrico realizado por CARTA (1964). Más precisamente se utilizaron las hojas 2754-25-2C4 "Oberá", 2754-25-2D3 "Oberá", 2754-25-4A2 "Guaraní" y 2754-25-4B1 "Oberá (Colonias Guaraní-Y-Viejo)", las cuales están representadas a escala 1:10000 con una equidistancia 5m. Dicho relevamiento fue digitalizado y contrastado con superficies creadas a partir de Modelo Digital de Terreno (MDT) elaborado en base a cotas extraídas del proyecto The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, 2009), arrojando una excelente correlación entre ambas.

A partir del MDT fue posible confeccionar planos de pendiente de todo el municipio de Oberá. Utilizando un algoritmo de cálculo en Fortran, el cual calcula la pendiente de cada punto del MDT con sus 8 puntos vecinos, la pendiente asignada a cada punto es el máximo de los 8 gradientes. Posteriormente con el software *Surfer*, se logró la confección de planos de pendientes, cuya densidad de puntos es de aproximadamente 90 por 90m.

En la Figura 3.18 se visualizan las pendientes dentro del municipio Oberá discretizadas en rangos para una mejor interpretación.

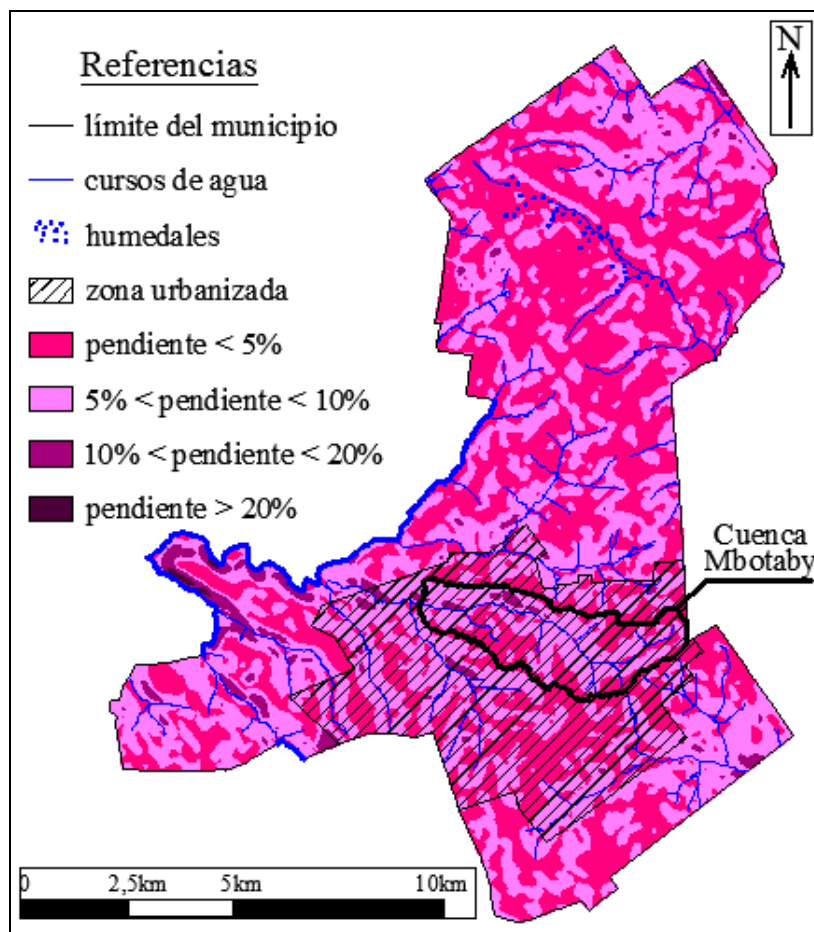


Figura 3.18. Mapa de pendientes del municipio Oberá.

En la tabla 3.9 se presentan los porcentajes de superficies con los distintos rangos de pendientes, tanto para el municipio como para la zona urbana.

*Tabla 3.9. Porcentajes de áreas y pendientes del municipio Oberá.*

Pendientes	Municipio		Zona urbanizada	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]
Menores al 5%	8144	52.7	2346	55.9
Entre 5 y 10%	5988	38.7	1742	41.5
Entre 10 y 20%	1247	8.1	106	2.5
Mayores a 20%	74	0.5	0	0.0
TOTAL	15453	100.0	4194	100.0

En la Tabla 3.9 se visualiza como casi el 50% del municipio posee pendientes mayores al 5%, con pendiente máxima de 34%.

### 3.1.4. Hidrografía

#### 3.1.4.1. Hidrografía de Misiones y Oberá

La provincia de Misiones está caracterizada por los numerosos cauces internos que posee y los grandes ríos que la rodean, los cuales constituyen en gran medida los límites físicos de municipios, departamentos y la provincia misma (Figura 3.19).

Dentro de la provincia se pueden delimitar tres grandes cuencas, donde cuantiosos cursos descargas sus aguas a los ríos y arroyos periféricos de la provincia. La mayor extensión es representada por la cuenca del Río Paraná, al Oeste de la provincia; en segunda medida la cuenca del Río Uruguay, al Sur; y la cuenca del Río Iguazú al Norte.

Dado las grandes precipitaciones de la región y que el relieve de la provincia es dominado por las colinas, con pendientes muy variables e irregulares dentro de cortas distancias, se forma una importante red de drenaje, constituida por más de 800 curso de agua. De estos cauces, aproximadamente, 270 desembocan en el Río Paraná, 400 en el Uruguay y unos 120 suman los tributarios del Iguazú (Catellanos, 1975, citado por Fontana, 2014).

Los ríos que rodean a la provincia nacen lejos de lo límites la misma y pertenecen a los grandes ríos de zonas subtropicales, con cuencas de gran extensión, importantes volúmenes de precipitación y grandes zonas de vegetación implantada y autóctona, lo que provee a estos ríos de una marcada estacionalidad, con hidrogramas anuales caracterizados por dos picos, uno en otoño y otro en primavera (Fontana, 2001).

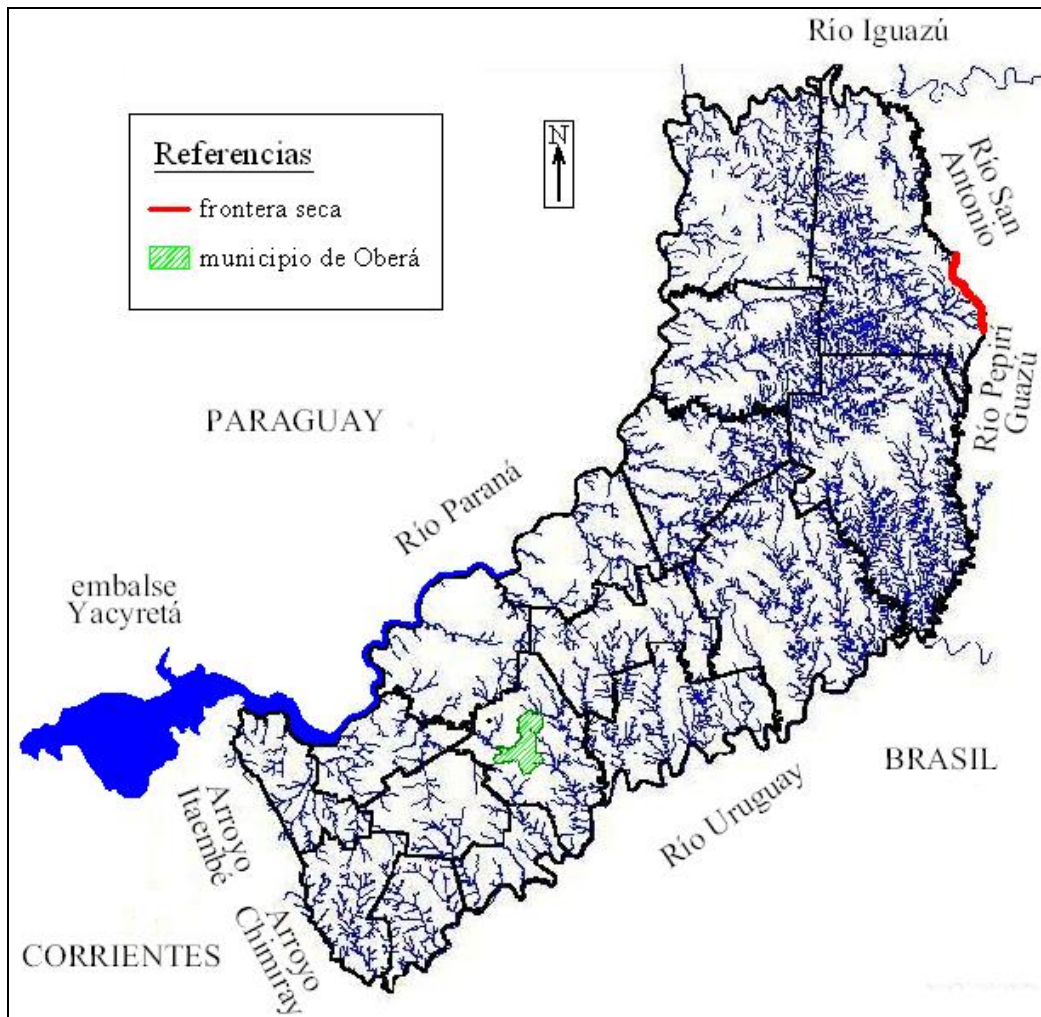
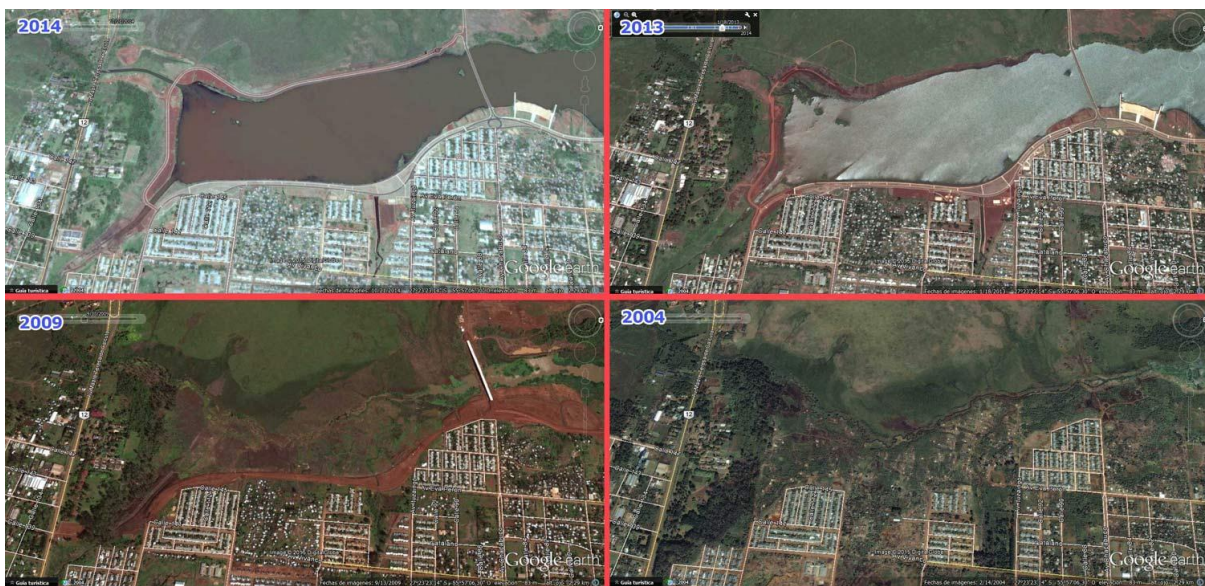


Figura 3.19. Hidrografía de la provincia de Misiones (Adaptado de MERNR, 2014).

Es de hacer notar que, en la actualidad, los niveles de las aguas del Río Paraná y de gran parte de sus afluentes, dentro de la provincia de Misiones, Corrientes y la república del Paraguay, están condicionados por la operación del embalse de la central hidroeléctrica Yacyreta. Dicha represa comenzó con el llenado de su embalse durante el año 1994, alcanzándose la cota máxima de proyecto, de 83msnm, en el eje Posadas-Encarnación, el 1 de enero de 2011, nueve metros por encima del nivel normal del río antes de la represa.

El embalse de Yacyreta derivó en la construcción de una gran cantidad de obras de protección costera, como así también en la readecuación de los puentes sobre gran parte de los arroyos tributarios del Paraná. En la Figura 3.20 se presenta una cronología del aumento en el tirante de agua y las obras de saneamiento ejecutadas en la cuenca del Arroyo Martínez, en la región urbana de la ciudad de Posadas, Misiones.



*Figura 3.20. Tratamiento costero Arroyo Martínez (EBY, 2018).*

Por otro lado, el torrente de los cursos internos de la provincia está fuertemente influenciado por el régimen de precipitaciones local, donde suelen desarrollarse intensas precipitaciones, con cortos tiempos de duración, en áreas pequeñas.

Si bien no existen grandes zonas de humedales dentro de la provincia, las profundas arcillas del centro de la provincia, producen un constante flujo base, hasta en los cursos más pequeños.

La red de avenamiento es dendrítica, densa, fuertemente condicionada por los numerosos lineamientos estructurales del sector. Las cuencas hidrográficas dentro de la provincia tienen aspecto de paleo torrentes complejos, de gran extensión y sus antiguos canales de descarga pueden establecer sitios aptos para el emplazamiento de obras de embalse de tipo de gravedad (Popolizio, 1996).

Históricamente los cursos de agua dentro de la provincia representaban el equilibrio entre los caudales máximos de los torrentes y los perfiles transversales del cauce, con las orillas fijadas por la densa vegetación arbórea de la selva misionera.

Los arroyos característicos de la región muestran típicos perfiles transversales próximos a un trapecio, con fondo de roca basáltica viva localmente profundizada y taludes de depósitos aluviales.

Generalmente se presentan perfiles del tipo doble, donde las grandes crecidas inundan las orillas cubiertas por la vegetación. Las características del perfil del cauce y la vegetación ribereña, disminuyen considerablemente la velocidad del flujo, efectuando una marcada

regulación de la rapidez de la crecida, presentándose caudales más estables de lo esperado para determinadas precipitaciones intensas.

Con el remplazo de la selva misionera, por cultivos perenes o coníferas para la industria forestal, se están registrando intensas erosiones de las orillas, tanto en los grandes ríos como en los arroyos internos de la provincia, donde es de esperarse la transformación del perfil doble en simple. Situación que optimiza el comportamiento hidráulico del cauce, reduciendo la permanencia de los caudales bases y desarrollando crecidas de mayor relevancia.

Además, los caudales sólidos son incrementados, generando el lavado de las cuencas y zonas de importante acumulación de contaminantes en los depósitos aluviales de los arroyos, contaminantes contenidos en las partículas de suelo erosionado.

Los movimientos colectivos de los suelos son del tipo reptación (lentos) y se generalizan en las laderas de los cursos de agua y en menor medida interfluvios, en las lomadas de los partes aguas de las subcuencas (Popolizio, 1996).

Para finalizar, es de hacer mención de la gran cantidad de saltos y cascadas con las que cuenta la red hidrográfica de la provincia. Los cuales, además de representar un importante atractivo turístico, se presentan como un recurso prodigioso para la disponibilidad, de manera económica, de abastecimiento de agua y de aprovechamiento hidroeléctricos, como la represa sobre el arroyo Urugua-í y las micro-centrales en los arroyos Tigre y Saltito. Tales aspectos refuerzan la necesidad de comenzar a estudiar y monitorear sistemáticamente los arroyos internos de la provincia, con fines a la conservación de los cursos de agua y sus cuencas hidrográficas.

Al igual que toda la provincia, el municipio de Oberá cuenta con numerosos cursos de aguas que forman gran cantidad de subcuencas y una red de drenaje natural densa. Situada sobre la cresta de la Sierra Central de Misiones, posee arroyos que corren de Sureste a Noreste aportando a la cuenca del Paraná y de Noroeste a Sureste hacia el Río Uruguay.

Oberá se encuentra rodeada de arroyos y saltos, de gran potencial para la explotación turística, ganadera, agrícola e hidroeléctrica. Entre los arroyos que nacen en su área de influencia figuran el Tuichá, Mbotaby y Bonito tributarios del Yabebiry; el Guayabera, Guaraypo y Carrillo Viejo tributarios del Ramón; el Tigre y Liso tributarios del Yaza; y las nacientes del arroyo Samambaya.

Los arroyos Ramón (sobre el que se localiza la toma de agua cruda para abastecer de agua potable a Oberá), Yaza y Samambaya son tributarios del Río Uruguay, mientras que el arroyo

Yabebiry, sobre el que se descargan los efluentes de la planta de tratamiento de líquidos cloacales, es afluente del río Paraná.

Siguiendo con el movimiento internacional de estudiar y explotar el Acuífero Guaraní la CELO, en conjunto con el gobierno provincial, realizó una perforación sobre el mismo con la premisa de, por un lado, aumentar la capacidad de instalación del sistema que sirve agua potable a Oberá y para la construcción de un parque de aguas termales.

La perforación, que culminó en el año 2005, resultó en 24m en suelo colorado, 132m de basalto fracturado, 944m de roca firme y 150m de arenisca propia del acuífero. Dentro de las principales características del acuífero en la zona podemos citar:

- Profundidad techo de acuífero: 1100m.
- Nivel Estático: 270m por debajo de boca de pozo.
- Temperatura del agua: 47 a 48°C.
- Caudal de explotación 100m<sup>3</sup>/h.

Cabe destacar que antes de la construcción de la red de agua potable, era sencillo realizar excavaciones de entre 8 y 20m, para encontrar las primeras napas subterráneas y abastecerse de agua potable durante todo el año, sin embargo en los últimos tiempos se evidencia un marcado descenso de los niveles en los pozos de agua aún existentes, muchos de ellos alcanzan a secarse durante los periodos de sequía, evidenciando una disminución de los almacenamientos subterráneos de agua.

### **Cuencas hídricas en Oberá**

Cuatro son los arroyos cuyas cuencas poseen áreas de aporte dentro de los límites del municipio. Al Oeste el arroyo Yabebiry, tributario del Río Paraná, al Norte el arroyo Yazá, al Este el arroyo Ramón y al Sur una pequeña área que aporta a la cuenca del arroyo Samambaya, estos tres últimos tributarios del Río Uruguay.

Las cuencas dentro del municipio Oberá se presentan en la Figura 3.21. En la misma puede observarse que solamente los arroyos Yabebiry y Ramón poseen áreas de aporte dentro de la zona urbana actual de la ciudad. Seguidamente, en la Tabla 3.10 se presenta la influencia de las distintas cuencas dentro del municipio Oberá y la zona urbana.

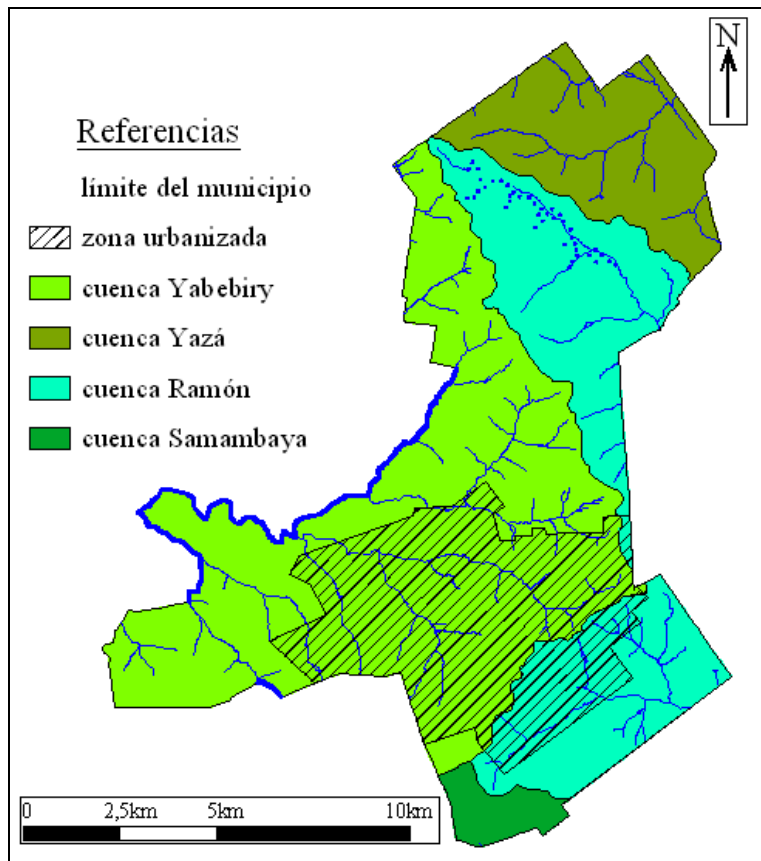


Figura 3.21. Cuencas hídricas dentro del municipio Oberá.

Tabla 3.10. Áreas de aporte de las cuencas dentro del municipio y la zona urbana.

Cuencas	Municipio		Zona urbanizada	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]
Cuenca Yabebiry	8401	54.4	3362	80.2
Cuenca Yazá	2180	14.1	0	0
Cuenca Ramón	4468	28.9	831	19.8
Cuenca Samambaya	395	2.6	0	0.0
TOTAL	15443	100.0	4194	100.0

De la Tabla 3.10 podemos deducir que aproximadamente el 80% de zona urbana descarga sus excedentes hídricos superficiales a la cuenca del Paraná, mientras que el 20% restante lo hace al Uruguay.

### Aforos líquidos en la zona de estudio

Litwin y Franco (1987) realizaron una recopilación de los datos disponible de aforos de los principales tributarios de Río Paraná en el tramo comprendido entre el Río Iguazú y el eje Posadas-Encarnación. Entre los datos analizados por los autores, se encuentra una serie de caudales medios diarios del Arroyo Yabebiry, a la altura de la ciudad de Mártires, a unos 25km de Oberá.

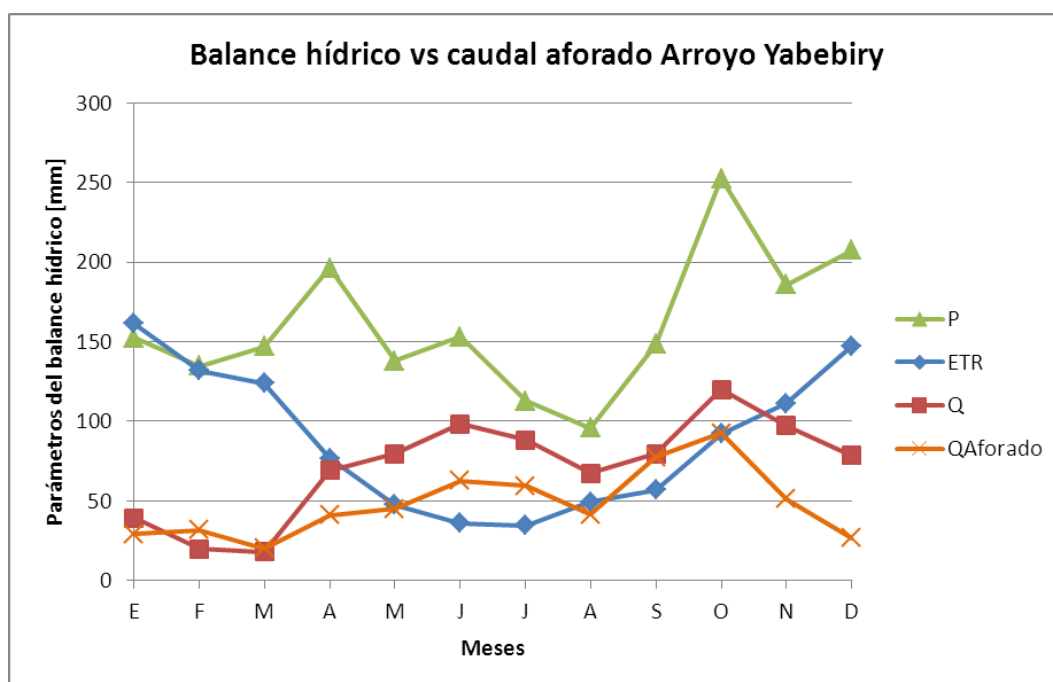
Con una serie discontinua, pero con un total de 19 años completos (1952 a 1964, 1966 a 1968, 1973, 1976 y 1977), la cuenca analizada de 62880ha presenta un módulo de  $11.37m^3/s$ , lo que representa unos  $0.181l/(s\ ha)$  y cuya distribución anual de caudales medios se presenta en la Tabla 3.11.

La cuenca analizada presenta un módulo pluviométrico anual, para la serie analizada, de 1909mm, donde se evidencia en la serie de caudales un régimen con dos máximos, uno en el mes de octubre y otro menor en el mes de junio, en concordancia con el balance hídrico desarrollado en el apartado 3.1.1.6. Los meses de octubre y junio son los meses de mayores precipitaciones y menores temperaturas respectivamente (Litwin y Franco, 1987).

**Tabla 3.11.** Caudales medios mensuales aforados en el Arroyo Yabebiry en Mártires (Litwin y Franco, 1987).

Unidades	Mes											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
[m <sup>3</sup> /s]	6.87	6.08	4.75	9.94	10.58	15.22	13.95	9.73	18.81	21.74	12.39	6.26
[l/s ha]	0.109	0.097	0.075	0.158	0.168	0.242	0.222	0.155	0.299	0.346	0.197	0.100
[% del módulo]	60%	53%	42%	88%	93%	134%	123%	86%	166%	191%	109%	55%

Si al caudal aforado lo dividimos por el área de la cuenca y lo integramos en el tiempo (mes a mes), podemos expresarlo en milímetros y compararlo con los valores del balance hídrico para la zona de estudio desarrollado anteriormente en este capítulo. Dicha comparación se presenta en la Figura 3.22.



**Figura 3.22.** Comparación de caudales por balance hídrico y aforados en la cuenca del arroyo Yabebiry.

En la Figura 3.22 podemos observar como la distribución de caudales mensuales, por el balance hídrico y los aforados en la serie señalada, coinciden en la ubicación de los puntos

máximos y mínimos, aunque se exhibe una considerable diferencia en determinados meses como noviembre y diciembre, con un 91% y 195% más en el balance hídrico que en los aforos de los meses respectivos.

Litwin y Franco (1987), realizaron además un análisis estadístico de los caudales y determinaron los caudales medios máximos diarios para distintas recurrencias. Los valores hallados mediante una distribución Gumbel, basada en la serie de 19 años citada anteriormente, se exhiben en la Tabla 3.12.

*Tabla 3.12. Caudales máximos para distintas recurrencias en el arroyo Yabebiry (Litwin y Franco, 1978).*

Unidades	[m <sup>3</sup> /s]							[l/s ha]						
Recurrencia [años]	2	5	10	20	50	100	200	2	5	10	20	50	100	200
Caudal	168	228	269	308	357	395	432	2.672	3.626	4.278	4.898	5.677	6.282	6.870

La gran diferencia entre el caudal modulo y los máximos diarios asignados a cada recurrencia, pueden ser explicados desde la perspectiva de la pronta respuesta de las redes hidrográficas del centro de la provincia, cuyas grandes pendientes y altas densidades de drenaje, realizan una veloz evacuación de los excedentes hídricos superficiales (Rodríguez, 2014).

Es de hacer mención que la serie de caudales analizada se remonta hasta la década del 70`. Hoy día, con los cambios de usos del suelo en las chacras, la reducción de las superficies de monte nativo y el avance de las áreas urbanas, es de esperarse un flujo base considerablemente menor y caudales picos varias veces mayores a los aforados anteriormente (Rodríguez, 2014).

### 3.1.4.2. Erosión hídrica

#### Erosión en cauces

Según Hausen (1919) las formas de relieve de Misiones están prescritas por las condiciones de las mesetas constituidas por capas de derrames volcánicos. Presentan una erosión lineal en segmentos de capas horizontales de significativa dureza. Las formas de relieve se aproximan al tipo de meseta, donde los ríos y arroyos toman la forma de gargantas o cañones.

Para Woodworth (1912), citado por Hausen (1919), la formación volcánica Serra Geral está cortada por una planicie de destrucción de edad cretácea. Dicho plano fue elevado oblicuamente junto con la elevación de la cresta de la sierra al Este de Misiones en territorio brasilero, generándose una inclinación hacia el Oeste. Esta elevación da comienzo a un ciclo

de erosión, aun poco desarrollado, como lo indica la abundancia de saltos de erosión retrogradante en los cursos de agua.

Particularmente el Río Paraná y sus afluentes como el Arroyo Yabebiry, no presentan un valle fluvial en el sentido tradicional del concepto (Hausen, 1919). La corriente ocupa todo el lecho del valle y las laderas precipitan directamente al agua, lo que le da la forma de cañadón. No obstante, existen en determinadas zonas escalones o terrazas formadas en roca firme, a distintos niveles entre la vieja planicie y los lechos de los cauces.

La importante erosión lineal del Paraná Superior, desde el borde austral de la meseta a la altura del eje Posadas-Encarnación hasta los antiguos saltos del Guayra, hoy inundados por el embalse de la central hidroeléctrica Itaipu, es la causa de que todos sus afluentes formen saltos con erosión retrogradante en la meseta que los contiene.

### **Erosión a nivel de cuenca**

Hasta aquí se ha podido observar que la erosión hídrica en ríos y arroyos de la provincia de Misiones han sido escasamente estudiados y actualizados. Sin embargo, en lo que concierne a la erosión a nivel de cuencas rurales, los estudios desarrollados se presentan numerosos y actuales.

Si bien dichos trabajos apuntan más a la conservación con fines productivos de los suelos de Misiones, los mismos realizan una interesante descripción cuantitativa y cualitativa de la potencial generación de sedimentos para los distintos escenarios presentados en la provincia.

Ya en 1964, el Informe Edafológico realizado por CARTA describe que la mayoría de los suelos de la provincia tienen una muy alta susceptibilidad a la erosión y están sujetos con la explotación a una pérdida de fertilidad. Por ello, dicho informe sugiere, será conveniente aplicar una serie de medidas de conservación del suelo durante su explotación.

El fenómeno interesa particularmente a la tierra colorada, suelos del Complejo 9 que abarcan casi el 90% del municipio de Oberá. Estos suelos, como ya se hizo mención, tienen un primer horizonte "A" con buena fertilidad, pero su espesor de 20 a 30cm, puede desaparecer con rapidez si no se encuentra protegido, dejando al descubierto el horizonte "B" de escasa fertilidad (CARTA, 1964).

El fenómeno intenso de la erosión en Misiones se debe a la combinación de las características del clima, el suelo y las practicas productivas. Las precipitaciones son abundantes y muchas veces se presentan como aguaceros violentos de corta duración. Dicha intensidad de

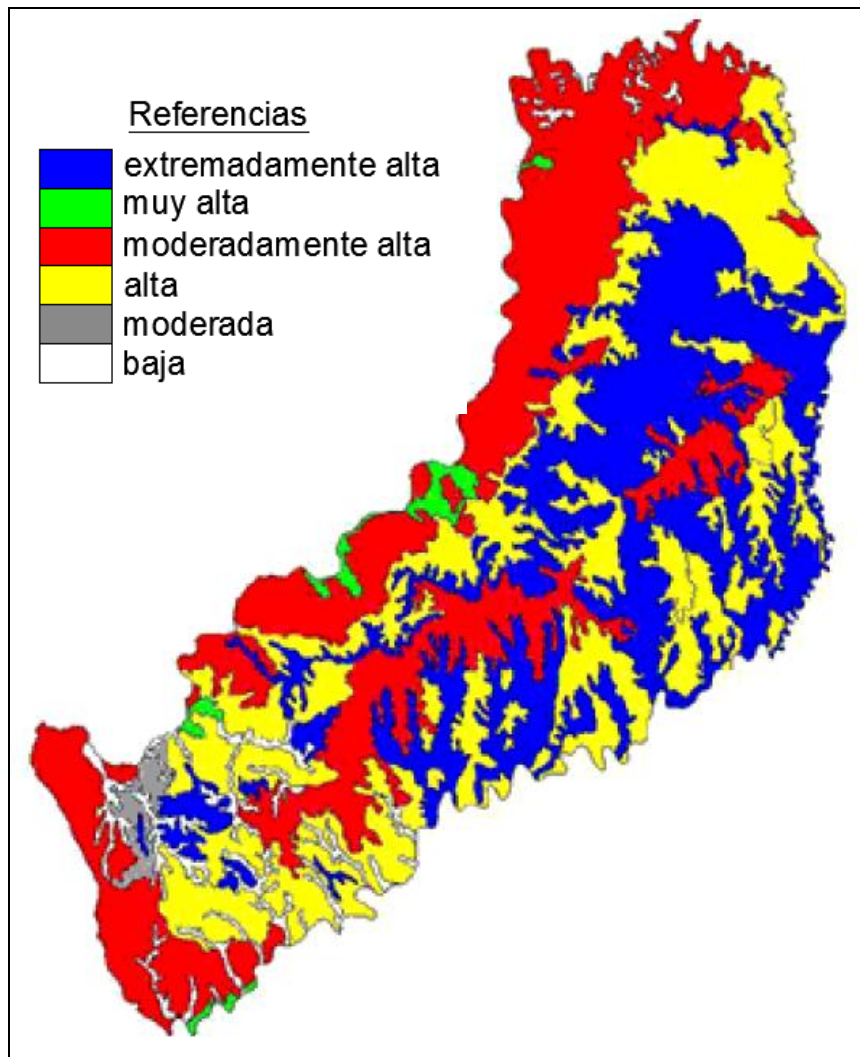
precipitación genera escasos volúmenes de infiltración y grandes volúmenes de escurrimiento superficial que, por las condiciones del terreno, producen importantes velocidades que arrastran las partículas de suelo, sobre todo en las superficies desprotegidas por malas prácticas de cultivo.

Utilizando los mapas edafológicos disponibles para la provincia y la implementación de la USLE, Ligier et al. (2004) realizaron un trabajo cuyo objetivo fue elaborar una mapa de riesgo de erosión hídrica potencial.

Los riesgos de erosión se expresaron en un mapa temático (Figura 3.23) y se agruparon las pérdidas de suelo obtenidas en 6 clases de riesgo potencial de erosión hídrica, expresadas como erosión máxima teórica potencial en toneladas por hectárea y año o centímetros de capa arable.

Dicha clasificación resultó:

- Clase Extremadamente Alta: Pérdidas superiores a 1400T/(ha año) ó de más de 10cm. de capa arable. Se incluyen aquí los suelos de la Región Montañosa, Esta Clase ocupa el 29.1% del territorio provincial (cerca de 860000ha.).
- Clase Muy Alta: Pérdidas de 900 a 1000T/(ha año) ó de 6.4 a 10cm. de capa arable. Esta Clase corresponde a la Región Premontañosa y Montañosa, principalmente y representa el 10.6% del total provincial (unas 312000ha.).
- Clase Alta: Pérdidas de 400 a 900T/(ha año) ó de 2.9 a 6.4cm. de capa arable. Ocupa la Región Premontañosa y Estribaciones de la Meseta Preservada, cubriendo el 22.6% de las tierras de la provincia (666000ha.).
- Clase Moderadamente Alta: Pérdidas de 100 a 400T/(ha año) ó de 0.7 a 2.9cm. de capa arable. Corresponde a las Regiones características de la tierra colorada: Meseta Central Preservada; Pediplano Parcialmente Disectado y Zona de Campos. Ocupa el 33% de la superficie provincial (973000ha.).
- Clase Moderada: Pérdidas de 40 a 100T/(ha año) ó de 0.3 a 0.7cm. de capa arable. Corresponde casi con exclusividad a la Región de Planicies Suavemente Onduladas con Afloramientos Rocosos (dominio de Urunday). Ocupa el 1.2% provincial (35000ha.).
- Clase Baja: Pérdidas de suelo menores de 40T/(ha año) ó de menos de 0.3cm. de capa arable. Corresponde a los suelos de los Valles Secundarios con Depósitos Aluviales; sólo ocupa el 3.5% del territorio provincial (cerca de 104000ha.).



*Figura 3.23. Mapa de riesgo de erosión máxima para la provincia de Misiones (Adaptado de Ligier et. al., 2004).*

En el trabajo de Ligier et. al. (2004) se alcanzan una serie de conclusiones de relevancia para la descripción cualitativa y cuantitativa del fenómeno de erosión hídrica en Misiones y sus municipios tales como:

- La erosionabilidad predominante de los suelos de Misiones es baja. Esto implica que la condición de la capa arable, independientemente de la topografía y lluvia, no es la causa determinante de las pérdidas potenciales calculadas.
- La topografía, a través del largo y gradiente de las pendientes, y la erosividad de las lluvias, son los mayores responsables de las altas pérdidas de suelos estimadas.
- El factor topográfico se relaciona íntimamente con las Regiones Naturales de la provincia y con las pérdidas de suelos estimadas.
- Los suelos representativos del Complejo 9, tierra colorada, presentan un rango de pérdida potencial que va de 135 a 400T/(ha año).

- Los resultados obtenidos son aplicables en políticas de planificación a nivel regional y explican la fragilidad de los distintos ecosistemas, como también su probable respuesta, en término de erosión, ante las distintas alternativas de uso.
- Los suelos del Complejo 9 presentan contrastes importantes de erosión según el uso. Para un cultivo de Yerba Mate la sistematización de las plantaciones y la protección del suelo con cubiertas verdes, implican una pérdida de suelo de 41T/(ha año). Sin sistematizar y sin cobertura estas pérdidas de suelo para un yerbal suben a 115T/(ha año). Los mismos presenta los mayores incrementos en la erosionabilidad por degradación simulada. Estos cambios indican la necesidad de mantener las condiciones estructurales próximas a las naturales y manejar la cobertura de la vegetación tanto espontánea como cultivada, por su implicancia sobre los contenidos de materia orgánica.
- La investigación tendiente a disminuir el deterioro por erosión hídrica, debe poner énfasis en el ajuste de la relación entre los factores: cobertura, pérdidas de suelo y productividad de los cultivos.

### **Erosión en el municipio Oberá**

Todos los suelos de Misiones pueden considerarse potencialmente entre erosionables o muy erosionables. De los suelos dentro del municipio de Oberá, los suelos pedregosos del Complejo 6 y la "tierra colorada" del Complejo 9 son considerados potencialmente muy erosionables. Además, de que el peligro de la erosión se acentúa con la morfología del terreno y la acción antrópica.

Todos los tipos de suelos situados sobre colinas con pendientes mayores al 15% tienen un potencial de erosión muy alta. Aquellos sobre pendientes menores pueden presentar erosión en presencia de malas prácticas agraria, tanto que pueden observarse fenómenos de erosión violenta en superficies casi planas (CARTA, 1964).

Los suelos 6B, situados en declives importantes, deben ser dejados poblados de bosques. Pueden ser utilizados para cultivar o reforestar, pero en estrechas franjas, con pendientes menores y siempre con un desmonte sistemático de las franjas.

Dentro del municipio de Oberá, también existen pequeñas zonas con suelos del Complejo 3, hidromorfos, los cuales no presentan un inmediato peligro de erosión dado que la mayoría de ellos están sujetos a inmersión y depositados en zonas bajas difíciles de desaguar.

En la Figura 3.24 se observa la localización, dentro del municipio, de las distintas clases de riesgos de erosión hídrica según la clasificación realizada por Ligier et. al (2004) y cuyos

porcentajes de cobertura de los distintos riesgos de erosión del municipio y las zona urbanizada se expresan en la Tabla 3.13.

Según el trabajo presentado por Ligier et al. (2004) dentro del municipio de Oberá se detectaron dos clases con potenciales de erosión hídrica distintos (Figura 3.24):

- Clase moderadamente alta: Con pérdidas de 100 a 400T/(ha año) ó de 0.7 a 2.9cm de capa arable. En Oberá corresponde a las regiones mayormente cubiertas con tierra colorada de la Meseta Central Preservada.
- Clase alta: Con pérdidas de 400 a 900T/(ha año) ó de 2.9 a 6.4cm de capa arable. En el municipio ocupa la región Colinada con mayoría de suelos del Complejo 9.

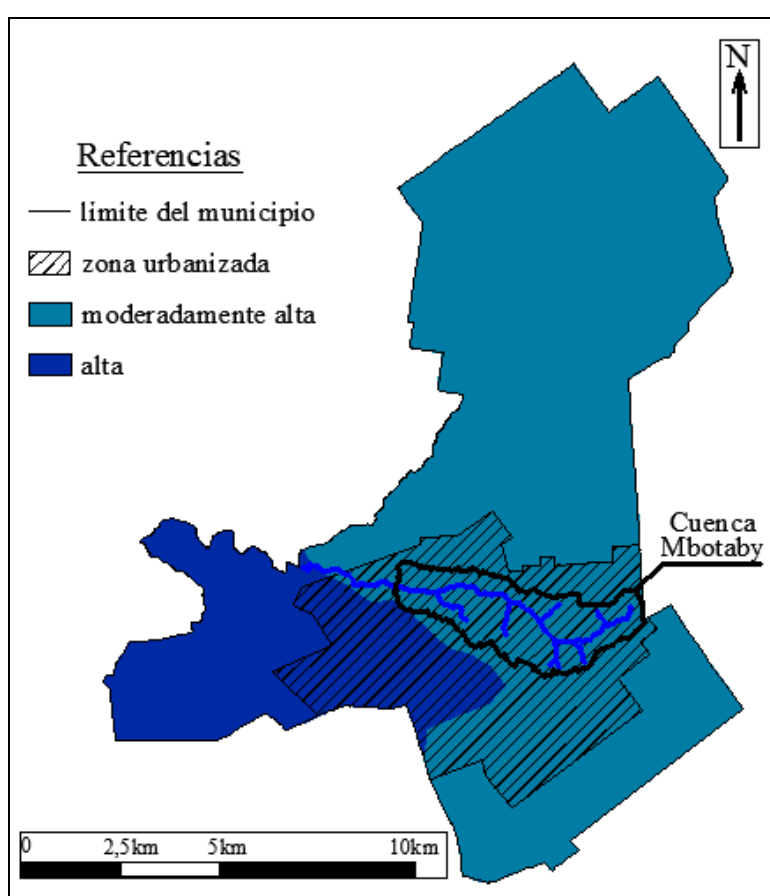


Figura 3.24. Erosión hídrica potencial dentro del municipio Oberá y la zona urbana (Adaptado de Ligier et. al., 2004).

Los porcentajes de cobertura de los distintos riesgos de erosión del municipio y las zonas urbanizadas se expresan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Porcentajes zonas de erosión hídrica potencial dentro del municipio y la zona urbana.

Erosión hídrica potencial	Municipio		Zona urbanizada	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]
moderadamente alta	12279	79.5	2952	70.4
alta	3174	20.5	1242	29.6
TOTAL	15453	100.0	4194	100.0

En la Figura 3.23 y Tabla 3.13 observamos que, dado la gran extensión de suelos del Complejo 9 dentro del municipio, cercano al 90%, las clases de riesgo coinciden con las regiones naturales detectadas. Donde la Meseta central preservada representa los suelos con moderadamente alto potencial de erosión y la región colinada, la clase alta.

### 3.2. Evolución demográfica de Misiones y Oberá

En lo que respecta al crecimiento poblacional de la zona de estudio, en la Tabla 3.14 se muestra la evolución histórica de las poblaciones urbanas y rurales de la provincia de Misiones, el departamento y municipio de Oberá. Puede observarse un marcado crecimiento de la población total así como una tendencia a la concentración urbana tanto en la provincia como en el departamento y el municipio.

**Tabla 3.14.** Evolución histórica de la población en Misiones y Oberá (INDEC, 2014).

Censo	Provincia de Misiones			Departamento de Oberá			Municipio de Oberá		
	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural
1960	361440	31.84%	68.16%	51452	-	-	-	-	-
1970	442659	37.50%	62.50%	57911	-	-	22671	74.74%	25.26%
1980	588977	50.44%	49.56%	73673	41.12%	58.88%	36234	77.15%	22.85%
1991	788915	63.50%	36.50%	83501	59.74%	40.26%	46023	87.64%	12.36%
2001	965522	70.60%	29.40%	95484	62.48%	37.52%	55548	92.99%	7.01%
2010	1101493	73.77%	26.24%	107501	69.40%	30.60%	66112	96.74%	3.26%

Vemos en la Tabla 3.14 como, según el censo del año 2010, el municipio de Oberá cuenta con una población total de 66112hab, de los cuales casi el 97% es urbana, representado una tasa de crecimiento poblacional urbano dentro del municipio de 2.16% anual en los últimos 10 años. Extrapolando esta tendencia de crecimiento, podemos estimar la población urbana al año 2017 en 74276hab, lo que representa una densidad urbana media de 17.7hab/ha.

Existen estudios que han logrado referenciar cronológicamente los cambios en la ocupación y usos del suelo, la evolución de las superficies impermeables y los modificaciones de las características fisiográficas de una micro-cuenca urbana en la ciudad de Oberá (Rodríguez, 2014).

El relevamiento detallado de la cuenca Beltrame, con fines a la confección y calibración de un modelo de respuesta hidrológica, permitió discretizar los distintos usos y ocupaciones del suelo para el año 2012. Además, la reconstrucción de escenarios pasados, mediante información cartográfica existente y relatos históricos de los lugareños, permitió evaluar el aumento de las superficies impermeables a medida que la urbanización avanzaba sobre la selva original.

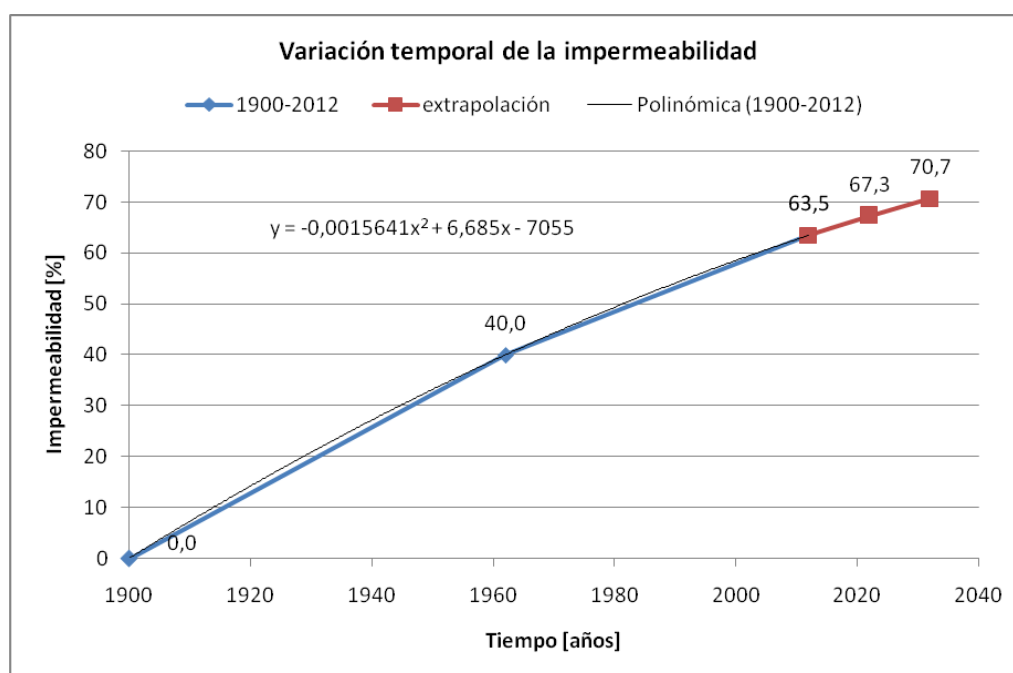
La Tabla 3.15 presenta la variación temporal de las características fisiográficas de la cuenca que han sido modificadas y el aumento sostenido de las superficies impermeables. En la misma vemos que luego de 110 años, la cuenca Beltrame ha pasado de una área natural con selva paranaense sin superficies impermeables, a una residencial media con 63.5% de superficies consideradas impermeables.

**Tabla 3.15.** Resumen de las características fisiográficas de los escenarios analizados en la cuenca Beltrame (Rodríguez, 2014).

Característica fisiográfica		Escenarios		
		1900	1962	2012
Área	[ha]	7.75	9.77	10.38
Superficies impermeable	[%]	0	0.69	61.84
Superficies impermeable DC	[%]	0	0.69	40.38
Superficies impermeables + suelos desnudos	[%]	0	40.04	63.50
Pendiente media de la cuenca	[%]	6.59	5.73	5.71
Pendiente media del cauce	[%]	6.10	4.90(*)	3.70(*)
Pendiente máxima del cauce	[%]	10.80	11.58(*)	20.00(*)

(\*) Datos del sistema principal de desagüe pluvial.

La visualización cronológica de los datos obtenidos para los distintos escenarios, ha permitido evaluar el avance de la impermeabilización en la cuenca Beltrame, cuya tendencia se visualiza en la Figura 3.25.



**Figura 3.25.** Variación temporal de la impermeabilidad en la cuenca Beltrame (Rodríguez, 2014).

Del análisis de datos presentados vemos que, de 1900 a 1962, la variación de la impermeabilidad ha sido a razón de 6.47% cada diez años, y de 1962 a 2012, también se

mantuvo permanente el crecimiento: 4.68% cada diez años. Si bien esta última tasa es menor, no obstante se ha mantenido a ritmo sostenido dicho crecimiento, con una tasa media entre 1900 y 2012 de 5.77%.

Estos tres valores de impermeabilidad referenciados en el tiempo, han permitido crear una tendencia a corto plazo que posibilita inferir, mediante una ecuación polinómica de segundo grado, los posibles valores de impermeabilidad en la cuenca en 10 y 20 años.

De esta manera se obtuvo que, de continuarse las tendencias actuales de crecimiento poblacional y desarrollo urbano de la zona, para el año 2022, las superficies impermeables alcanzarían 67.3% de la superficie total, mientras que para 2032 la misma llegaría a 70.7%, lo que indica una tasa media de aumento de la impermeabilidad de 3.6% por década durante los próximos 20 años.

### **3.3. La cuenca en estudio**

#### **3.3.1. Cuenca del arroyo Mbotaby**

La cuenca en estudio pertenece al área de aporte del arroyo Mbotaby (arroyo de tábanos, en dialecto guaraní). El brazo más largo de este arroyo nace al Este de la ciudad, en la divisoria de aguas de las cuencas Paraná y Uruguay.

El arroyo Mbotaby recoge el 24% de los excedentes hídricos superficiales del área urbana de la ciudad de Oberá. Recorre el ejido urbano hacia el Oeste hasta, finalmente unirse al arroyo Tuichá (del guaraní, arroyo principal). La confluencia de estos últimos da lugar al nacimiento del arroyo Yabebiry (arroyo de las rayas) el cual desemboca en el Río Paraná, en una zona remansada por la implantación de la represa Yacyreta, ubicada unos 130km aguas abajo de la desembocadura del arroyo. Hasta el punto de control definido, la cuenca posee 976.7ha de superficie.

En la Figura 3.26 se ilustra el estado de avance de la urbanización al año 2010 en la cuenca Mbotaby, junto con los cursos de agua, los cuales nacen dentro del casco urbano y atraviesan la ciudad hasta el punto de control seleccionado, por lo que los excedentes superficiales que trasladan son generados exclusivamente en áreas urbanas y pequeñas zonas naturales antropizadas.



Figura 3.26. Cuenca del arroyo Mbotaby (Adaptado de Google Earth®, 2013).

En la Figura 3.26 puede observarse una particularidad de la cuenca en estudio, ya que el parte aguas de la misma coincide, a lo largo de 2.5 km con la divisoria de aguas del río Paraná al Oeste y del río Uruguay al Este.

Del análisis de la Figura 3.26 se deriva que, al año 2010, el grado de impermeabilización de la cuenca se valoriza en 24% del área total.

### 3.3.2. Características fisiográficas

En la Figura 3.27 presenta las curvas de niveles de la cuenca Mbotaby, resultado de digitalización de las hojas CARTA (1964). En la misma puede observarse como las alturas varían entre 230 y 380msnm, así mismo dicha gráfica permite estimar la pendiente media del cauce principal en 2%.

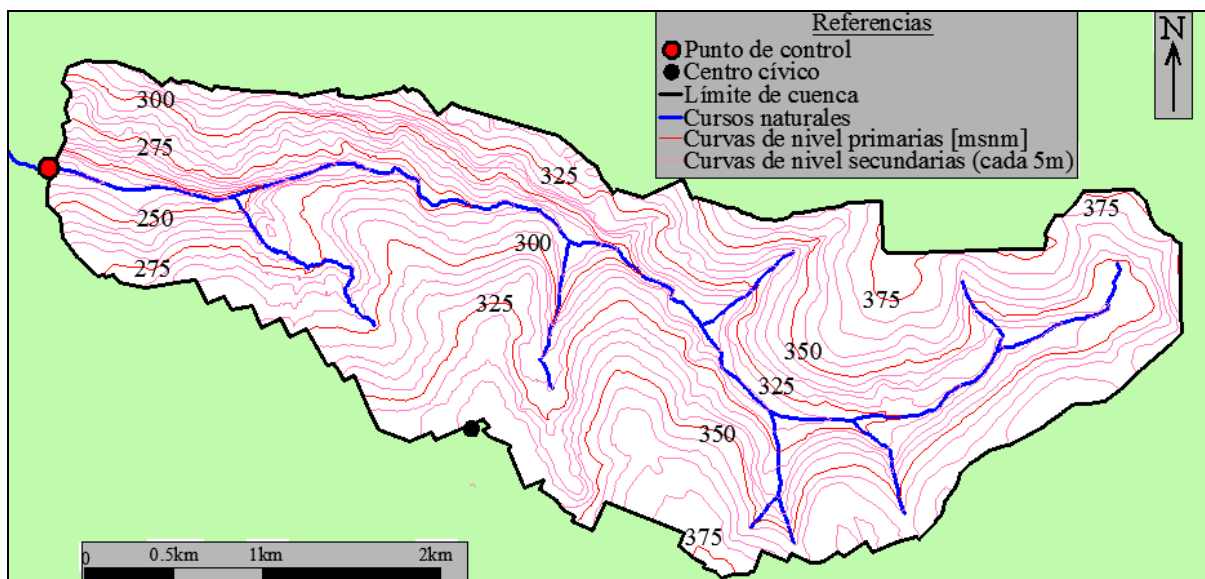


Figura 3.27. Curvas de nivel en la cuenca Mbotaby (Adaptado de CARTA, 1964).

La pendiente media de la cuenca se determinó a través del MDT, arrojando un valor de 5.5%, igual a la del municipio Oberá.

En la Figura 3.28 se presenta los complejos de suelo existentes dentro de la cuenca. Los suelos del Complejo 6 se extienden por una superficies de 54.1ha (5.5%), en tanto que el resto de la superficie está cubierta por suelos del Complejo 9 (94.5%).

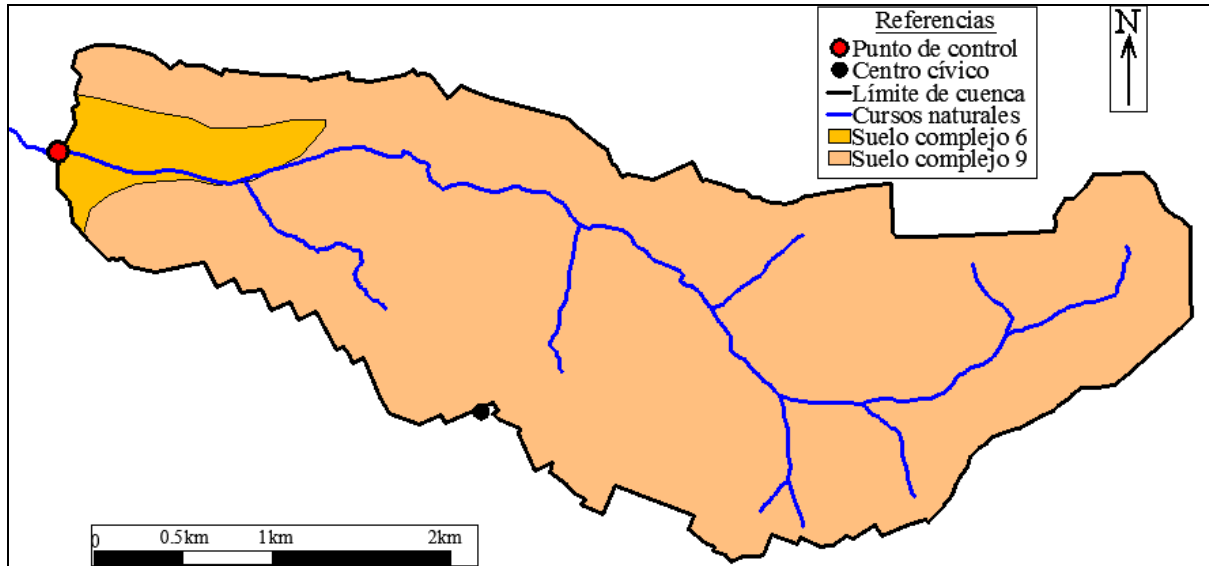


Figura 3.28. Complejos de suelo en la cuenca Mbotaby (Adaptado de CARTA, 1964).

Respecto a las demás caracterizaciones hidrogeológicas presentadas precedentemente en este capítulo, encontramos que la totalidad de la cuenca presenta una región natural de “Meseta Central Preservada” y un potencial de erosión “Moderadamente Alto” (Figuras 3.17 y 3.24 respectivamente).

### 3.3.3. Usos y ocupación del suelo

Para la discretización de los usos del suelo se utilizaron simultáneamente cuatro procedimientos a saber:

- Revisión de la Carta orgánica de la ciudad: Oberá cuenta con una carta orgánica donde se detallan las distintas zonificaciones y sus respectivos límites de usos y ocupación de suelo. La misma cuenta con planos que ilustran las zonificaciones permitidas en la ciudad, las cuales coinciden, en gran medida, con la realidad actual.
- Evaluación por imagen satelital: Para ello se utilizó la imagen con fecha de mayo de 2010 disponible en la web (Google Earth®, 2013). La misma refleja el grado de ocupación de las diferentes zonas y las áreas verdes aún existentes dentro de casco urbano.

- Comparación con investigaciones precedentes: existen investigaciones sobre la calibración de modelos hidrológicos en ambientes urbanos de la ciudad de Oberá (Rodríguez 2014), donde se ha discretizado minuciosamente los usos del suelo en una micro-cuenca piloto en una zona residencial de densidad media de la ciudad. En dicho trabajo los autores relevaron una cuenca de 10.3ha discriminado los distintos usos del suelo lote a lote, con el agregado de determinar las superficies impermeables directa e indirectamente conectadas.
- Relevamiento in-situ de puntos particulares: una vez evaluados los tres puntos anteriores, se procedió a recorrer la cuenca para corroborar la información disponible y realizar un relevamiento más detallado de determinadas zonas de interés particular.

En base a los procedimientos citados, se llevó a cabo la zonificación de la ocupación y usos del suelo, los cuales se presentan en la Figura 3.29. Posteriormente en la Figura 3.30 se detallan los porcentajes de influencia de cada zona respecto del total de la cuenca. En la misma se observa como el mayor porcentaje de suelo está ocupado por loteos nuevos y zonas de intrusiones, los cuales presenta muy baja impermeabilidad.

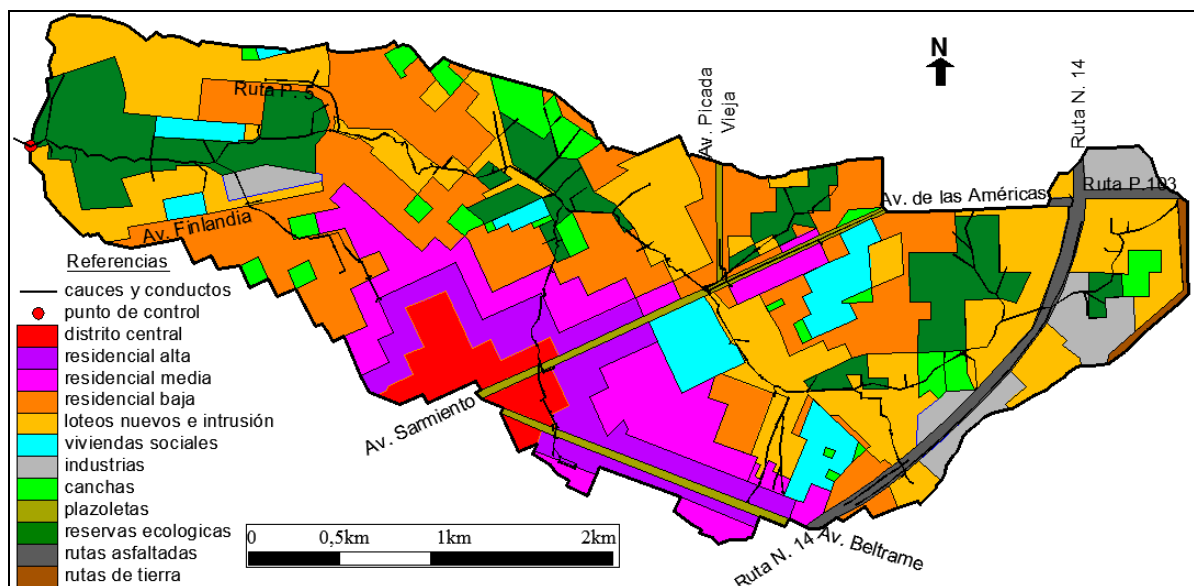


Figura 3.29. Zonificaciones en la cuenca Mbotaby al año 2013.

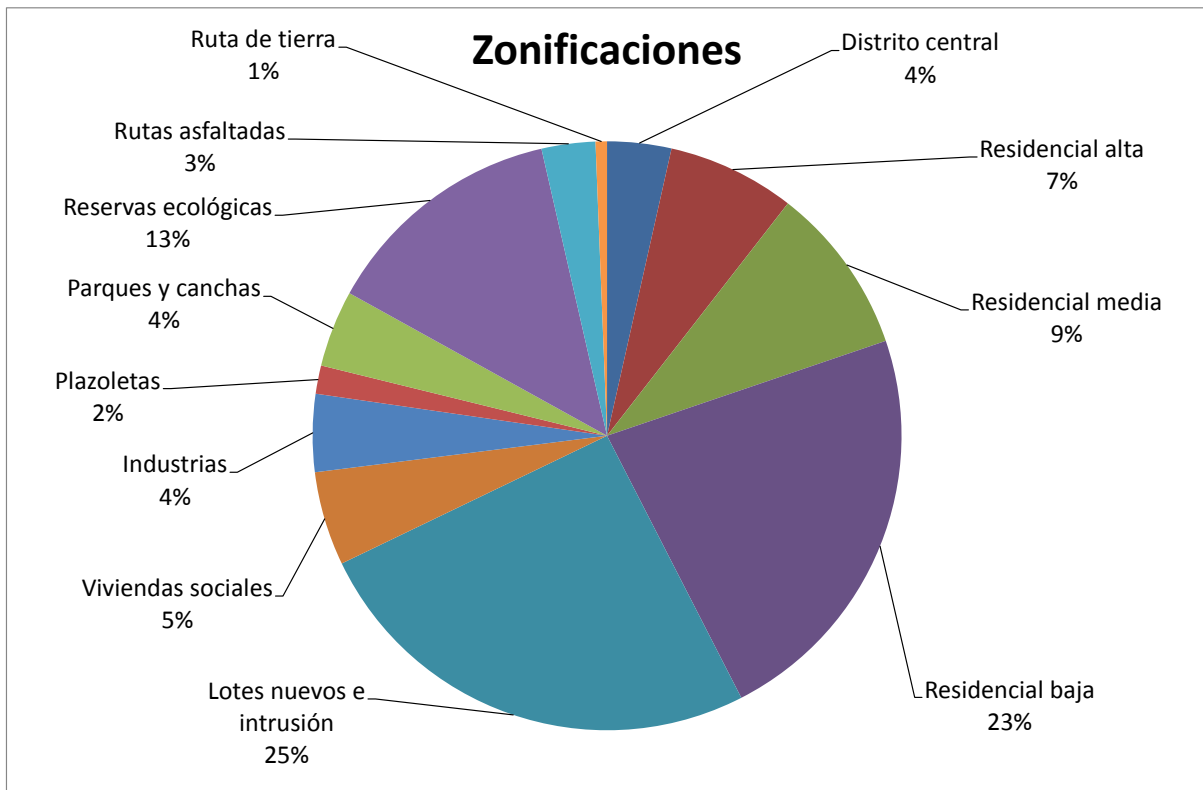


Figura 3.30. Porcentaje de incidencia de cada zonificación en la cuenca Mbotaby al año 2013.

Como pauta final del uso y ocupaciones del suelo dentro de la cuenca, en la Figura 3.31 se muestra un mapa con las calles, representadas en la figura por las cunetas que poseen a cada lado. En la misma se presentan las zonas que poseen, al año 2013, calles con calzadas de pavimento flexible y pavimento tipo empedrado brasilero, calles caracterizadas por poseer cordones cunetas de hormigón.

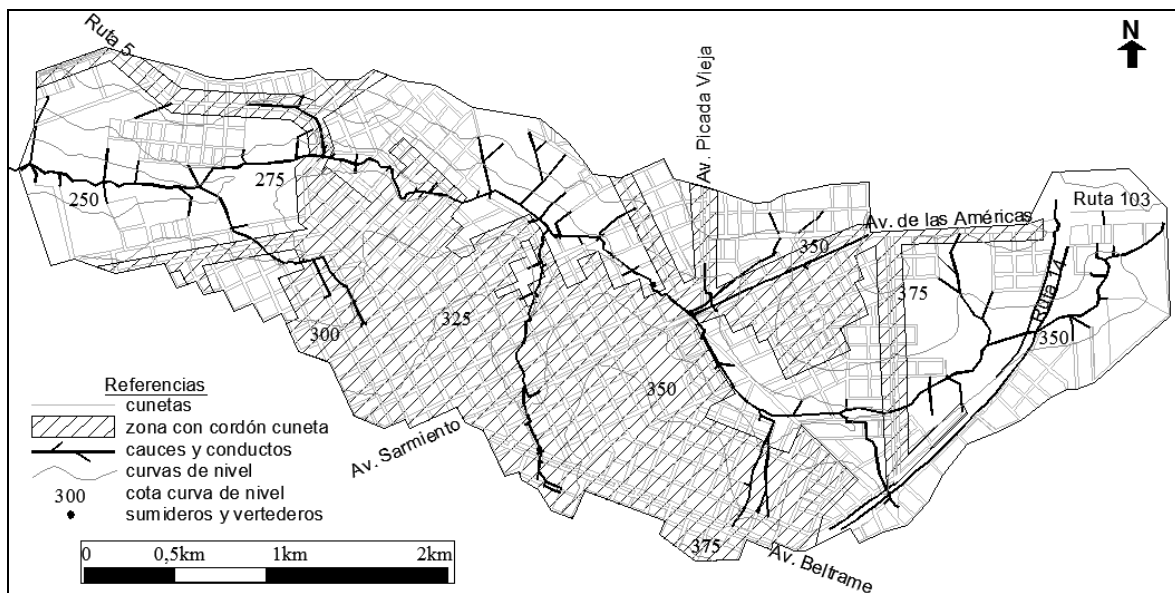


Figura 3.31. Zonas con cordón cuneta de hormigón dentro de la cuenca Mbotaby al año 2013.

En las calles con cordón cuneta, las veredas están bien delimitadas y poseen una pendiente (aproximadamente 2%) que fue alterada respecto a la original del terreno. Las calles con cordón cuneta alcanzan el 60% del total dentro de la cuenca Mbotaby.

Fuera de estas zonas, las calles son de tierra y las cunetas son excavadas en el mismo suelo. Las cunetas de tierra son de la más variada forma y dimensiones, debido a que son los excedentes superficiales las que las moldean mediante los procesos de erosión. En calles sin cordón cunetas, las veredas no están correctamente constituidas y conservan la pendiente del terreno natural, generalmente mayores a las de veredas de proyecto, por lo que necesitan alcanzar tirantes de aguas mayores antes de verse desbordadas y permitir el ingreso de los excedentes hacia los lotes.

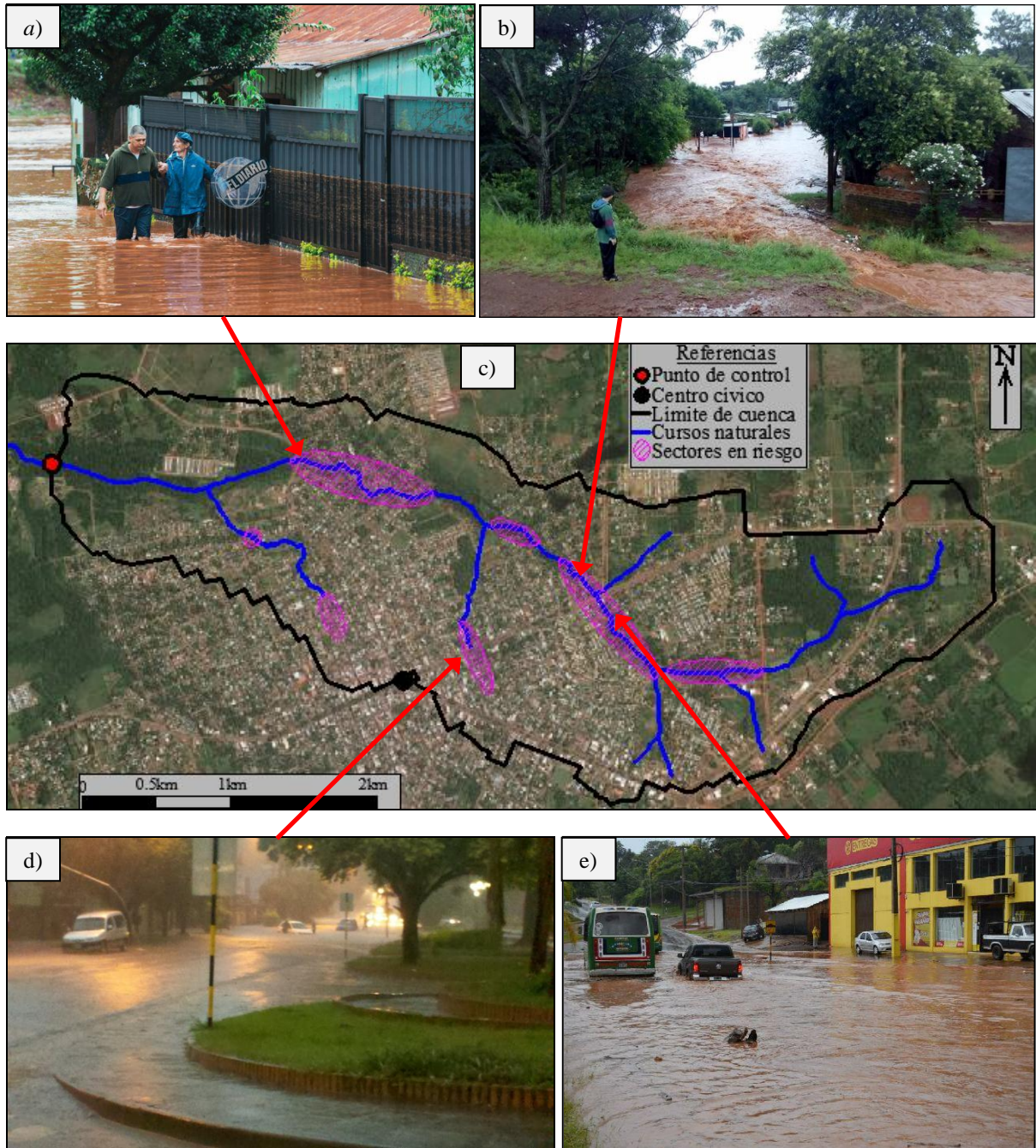
### **3.3.4. Sectores en riesgo hídrico**

Durante el desarrollo de los trabajos de tesis se llevaron a cabo diversas tareas de campo a fin de realizar el relevamiento necesario para la implementación del modelo hidrosedimentológico y al análisis de los registros periódicos de eventos pluviográficos severos. Como resultado de los mismos se ha podido identificar las zonas de mayor riesgo de inundación y afectación por procesos de erosión las cuales se presentan en la Figura 3.32.c.

En dichas zonas, tanto los registros periódicos como los vecinos entrevistados, coinciden en que son cada vez más frecuentes las afectaciones por inundación, con niveles de desborde cada vez mayores y procesos erosivos más severos.

Las tipologías de afectación encontradas son típicas de áreas urbanizadas de alta pendiente escasamente planificada. Entre las más reiteradas se encuentran (i) la inundación de viviendas, ya sean intrusas o no, por desborde de los cauces naturales (Figuras 3.32.a y b); (ii) el arrastre de vehículos y objetos voluminosos por las calles de alta pendiente, hasta las zonas más bajas (Figuras 3.32.d y e).

En la Figura 3.32.c puede observarse como, tanto en el brazo principal como en el secundario mayor, toda la zona con viviendas en cercanías del cauce presenta riesgo de inundación. Mientas que el afluente situado al Este presenta riesgo en su nacimiento (Calle Salta) y al atravesar la Av. Finlandia, principal vía de acceso a la zona.



**Figura 3.32** a. Av. José Ingenieros (Primera edición web, 2015). b. Calle Mar del Plata (Misiones Líder, 2012). c. Zonas de mayor riesgo detectadas (Adaptado de Google Earth®, 2013). d. Av. Sarmiento (OberaOnline, 2015). e. Av. De Las Américas (Misiones Líder, 2012).



## CÁPITULO 4

# IMPLEMENTACIÓN DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA Y DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

En el presente capítulo se presenta la implementación, calibración y validación del modelo hidrológico-hidráulico y de los modelos de producción de sedimentos, aplicados en el desarrollo del trabajo.

Se detalla la conceptualización e implementación del modelo hidrológico-hidráulico en el entorno del SWMM 5.0vE de la cuenca en estudio. Posteriormente se exhiben los eventos y metodología utilizada para la calibración-validación de los parámetros intervinientes en los procesos hidrológicos-hidráulicos que se desarrollan en la cuenca, con el fin de asegurar que las respuestas arrojadas por el modelo sean próximas a las reales.

La implementación de modelos de producción de sedimentos consistió en la determinación de sedimentos generados por erosión hídrica a nivel de cuenca, utilizando tres modelos de producción correspondientes a escalas temporales diferentes. Además, producto de mediciones de producción de sedimentos en el punto de control de la cuenca, fue posible contrastar los valores arrojados por los distintos modelos y alcanzar la calibración de los mismos, ajustando los parámetros de producción de sedimentos que los gobiernan.

Primeramente, se efectuó la estimación de la producción anual de sedimentos utilizando la ecuación de la USLE. En segundo lugar, se realizó mediante la MUSLE, una evaluación del total de sedimentos generados en la cuenca por evento. Finalmente se utilizó el módulo de calidad de agua del SWMM para reproducir los polutogramas de TSD para cada tormenta registrada.

### **4.1. Indicadores de bondad de ajuste de variables**

Los primeros parámetros a ser comparados para la evaluación del desempeño de modelos hidrosedimentológicos son los volúmenes totales de escurrimiento directo, en el caso de modelos de transformación lluvia-caudal, y de sedimentos erogados, en el caso de modelos de producción de sedimentos.

Otro parámetro de gran significancia para evaluar el ajuste de los modelos hidrológicos-hidráulicos, es el valor del caudal máximo, debido a que es el parámetro principal de diseño de la mayoría de las obras hidráulicas.

Sin embargo, el análisis por separado de cada uno de estos parámetros puede proporcionar una interpretación incorrecta del ajuste, o no, del modelo a los fenómenos físicos reales. Por tal motivo es recomendable, además de evaluar los parámetros citados anteriormente, verificar el ajuste de un modelo mediante parámetros que relaciones la totalidad de las mediciones realizadas con los resultados del modelo, a fin de tener una evaluación de relación entre la respuesta integral del sistema observado y aquel entregado por el modelo.

Para establecer el grado de ajuste de diversos modelos de toda clase de fenómenos físicos es usualmente utilizado el coeficiente de correlación  $R$ , el cual establece el grado de asociación lineal entre la variable observada  $Y^{obs}$  y la variable resultante del modelo  $Y^{sim}$ . Se define a partir de los  $n$  pares de observaciones, mediante la Ecuación 4.1.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})(Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})^2}} \quad (4.1)$$

Su cuadrado  $R^2$ , denominado coeficiente de determinación, puede interpretarse como el porcentaje de variabilidad de  $y$  debido a la curva de regresión.

Generalmente, los parámetros del modelo adoptados resultan de aquella combinación cuyas modelaciones presentaron un mayor valor de  $R^2$  para todos los eventos analizados. Valores de  $R^2$  mayores 0.5 son reconocidos como aceptables, mientras que valores superiores a 0.75 representan un muy buen ajuste.

Moriasi et. al. (2007), recomienda para la evaluación del grado de ajuste de modelos hidrosedimentológicos, además del  $R^2$ , tres parámetros de ajuste, los cuales se detallan a continuación. El autor expone también, rangos de valores que deben alcanzar dichos parámetros para obtener un desempeño satisfactorio del modelo, los cuales pueden visualizarse en la Tabla 4.1.

### **Eficiencia de Nash-Sutcliffe**

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una variable estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) en comparación con la variación de datos

de medición (información) (Nash y Sutcliffe, 1970). El NSE indica qué tan bien la trama observada se ajusta a una recta frente a los datos simulados. Un ajuste perfecto se obtiene con un NSE igual a 1 según la Ecuación 4.2.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2} \quad (4.2)$$

### Sesgo porcentual

El sesgo porcentual (PBIAS) mide la tendencia media de los datos simulados para ser mayor o menor que sus contrapartes observados (Gupta et al., 1999) y se determina según la Ecuación 4.3. El valor óptimo de PBIAS es cero, mientras que valores de baja magnitud indican una simulación modelo precisa. Los valores positivos indican que los valores del modelo están subestimados, y los valores negativos indican una sobreestimación del modelo (Gupta et al., 1999).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \quad (4.3)$$

### Relación de desviación estándar entre el error cuadrático medio (RMSE) y las observaciones

El RMSE es un índice estadístico de error de uso habitual (Chu y Shirmohammadi, 2004; Singh et al, 2004; Vasquez-Amábile y Engel, 2005). Es comúnmente aceptado que cuanto más bajo es el RMSE, mejor será el rendimiento del modelo.

Singh et al. (2004) han publicado una guía para calificar lo que se considera una baja RMSE basado en la desviación estándar de las observaciones. Con base en las recomendaciones de los autores, una evaluación estadística del modelo, llamado el RMSE-observaciones relación de desviación estándar (RSR), fue desarrollado el cual presenta una relación de desviación estándar entre el error cuadrático medio y las observaciones.

El RSR estandariza el RMSE usando la desviación estándar de las observaciones, y combina el índice de error con la información adicional recomendado por Legates y McCabe (1999). El RSR se calcula como la relación entre la desviación estándar y RMSE de los datos medidos, según la Ecuación 4.4.

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2}} \tag{4.4}$$

**Tabla 4.1.** Valores recomendados de parámetros de ajuste (Adaptado de Moriasi et al., 2007).

Desempeño	RSR	NSE	PBIAS	
			[%] en valor absoluto	
	[adm]	[adm]	flujo concentrado	sedimentos
Muy bueno	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < 10$	$PBIAS < 15$
Bueno	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$10 \leq PBIAS < 15$	$15 \leq PBIAS < 30$
Satisfactorio	$0,60 < RSR \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$15 \leq PBIAS < 25$	$30 \leq PBIAS < 55$
Insatisfactorio	$RSR > 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq 25$	$PBIAS \geq 55$

Si bien los valores presentados en la tabla anterior fueron propuestos para el análisis de datos mensuales, representan una guía para la evaluación del desempeño de modelos utilizando datos diarios y subdiarios.

## 4.2. Implementación del modelo hidrológico-hidráulico

### 4.2.1. Introducción

La modelación hidrológica-hidráulica para reproducir la dinámica de los procesos de generación y propagación de escurrimiento superficial se llevó a cabo con el software Storm Water Management Model (SWMM) en su versión 5.0vE, dado que el mismo presenta una mejor descripción de la hidrodinámica del escurrimiento, frente a otros modelos disponibles, a través del variado grupo de componentes que integran los sistemas menor y mayor del drenaje pluvial urbano de la cuenca en estudio.

Si bien existen modelos disponibles con mayor potencial para la descripción de los proceso de transformación lluvia-caudal, las rutinas del SWMM poseen un grado de detalle aceptable para evaluar la respuesta hidrológica de las distintas subcuenca en zonas como las de estudio con escasa información antecedente.

Por otra parte, el modelo posee significativa potencialidad para describir, de manera simplificada, la producción y propagación de sedimentos (como los desarrollados en este trabajo) y todo tipo de contaminantes (para posibles investigaciones futuras).

El SWMM ha sido utilizado satisfactoriamente en gran cantidad de estudios de similares características (Mendez, 2012; Ramos Vernieri, 2013), permitiendo establecer las

características de flujo necesarios para alcanzar los objetivos de este trabajo y pudiéndose presentar los resultados de manera gráfica y sencilla.

## 4.2.2. Implementación del SWMM

### 4.2.2.1. Constitución y discretización de elementos componentes del sistema

Con la intención de constituir y poner en funcionamiento operativo un modelo detallado, que permita calcular los tirantes de agua y velocidades desarrolladas en cada esquina, cordón cuneta, conductos y arroyos dentro de la cuenca, se llevó a cabo la constitución topológica con, al menos, 4 nodos en cada bocacalle (Figura 4.1). Se desarrolló este nivel de detalle para poder establecer tanto los caudales que circulan a cada lado de las calles como así también los niveles de agua en cada una de las cuatro esquinas de las bocacalles.

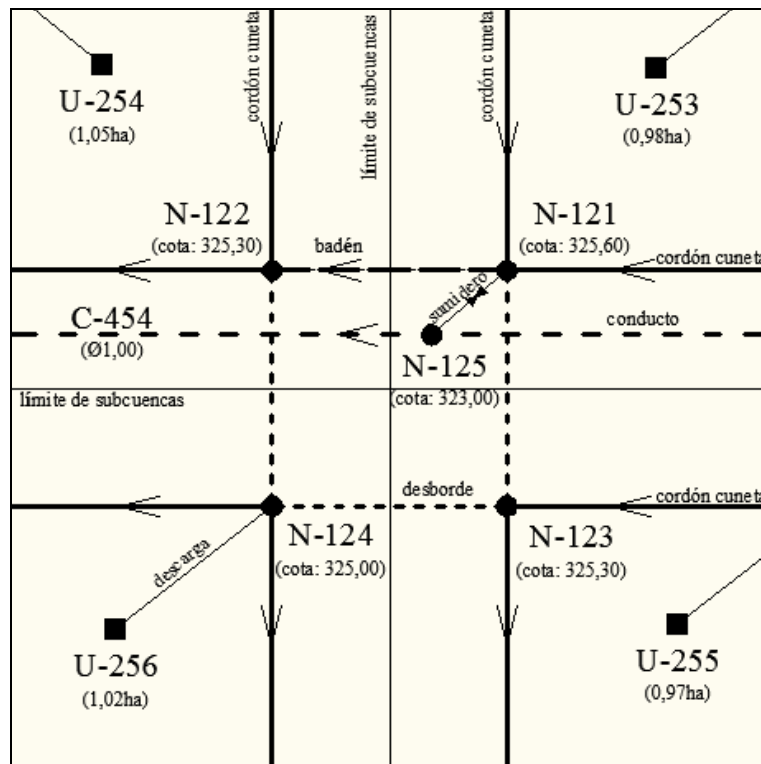


Figura 4.1. Esquema del modelo en bocacalle.

En general, cada manzana está representada por una subcuenca tributaria que descarga en el nodo más alto de su perímetro. En los casos necesarios de ser representados por otra condición, se subdividieron las manzanas en dos o más subcuencas tributarias. La pendiente de todas las subcuencas se unificó en un valor de 5.5%, la cual resulta como la pendiente promedio de la cuenca determinada a través del MDT mediante una grilla de 90 x 90m.

Los nodos están conectados entre sí de diferentes formas. El conducto entre dos esquinas de una misma manzana está caracterizado por una media calle, con su respectiva vereda, cordón

cuneta y media calzada, cada uno de estos con su rugosidad característica en función del material que lo compone y las obstrucciones esperables.

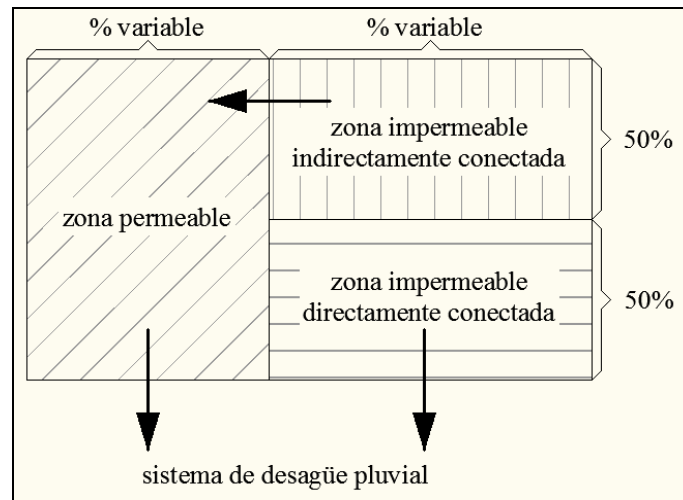
En las cuatro esquinas de cada boca calle, los excedentes superficiales pueden ser conducidos hacia otro nodo por un cordón cuneta, travesar la calle, ya sea por un badén o por desborde hacia las otras esquinas de la boca calle, donde el umbral de desborde está determinado por el galibo de la calle, o bien pueden ser conducidos hacia un conducto cerrado por vertido o mediante una boca de tormenta o sumidero.

Si bien el software permite evaluar el funcionamiento de los sumideros a través de diferentes coeficientes de descarga y características recomendadas por el mismo, cada boca de tormenta fue cargada con su respectiva curva de descarga, determinada a través de ecuaciones desarrolladas en la bibliografía especializada, en función a sus verdaderas dimensiones y características (Riccardi, 2004).

#### **4.2.2.2. Tratamiento de áreas directa e indirectamente conectadas**

El SWMM admite caracterizar de diferentes maneras el flujo entre las áreas permeables e impermeables dentro de un lote. Se puede optar para que los excedentes superficiales de las zonas permeables e impermeables descarguen los excedentes hacia el sistema de desagües pluviales independientemente uno de otro, o que los mismos interactúen entre si antes de descargar sus excedentes al sistema de desagües pluviales. El software permite descargar, total o parcialmente, los excedentes del área permeable a la impermeable o viceversa.

En la ciudad de Oberá, dada las características hidráulicas propias de la topografía escarpada y el suelo con cobertura vegetal, muchas viviendas descargan el flujo de los pisos impermeables y los techos a los patios con césped de las casas. Los techos en gran número, no cuentan con canaletas, descargando directamente sobre los pisos y áreas verdes de los lotes. En función de este mecanismo interno de drenaje de los lotes, se estructuró cada unidad de aporte de la siguiente manera: (i) un determinado porcentaje del área impermeable total se consideró directamente conectado (AIDC) al sistema de desagües pluviales (Tabla 4.7), (ii) la superficie impermeable restante o no conectada (AINC) se consideró con descarga en las zonas permeables de los lotes y (iii) los excedentes de las zonas permeables (AP), una vez descontadas las pérdidas, son conducidos al sistema. La Figura 4.2 muestra un ejemplo donde el 50% de la superficie impermeable está directamente conectada.



**Figura 4.2.** Ejemplo de esquema de interacción entre las zonas permeables e impermeables en las subcuencas.

#### 4.2.2.3. Bocas de tormenta y vertederos

Para la evaluación del flujo captado por las bocas de tormentas horizontales se utilizó el diagrama de gastos específicos en función del tirante de agua, adaptado del desarrollado por UDFCD (1984) (Figura 4.3). Para las bocas de tormenta verticales se utilizaron las Ecuaciones 4.5.a y b presentadas por Bertoni et al. (1995).

En tanto que para las bocas de tormenta combinadas, con aberturas verticales y horizontales, los valores teóricos fueron afectados por un coeficiente de reducción del 65% (UDFCD, 1984).

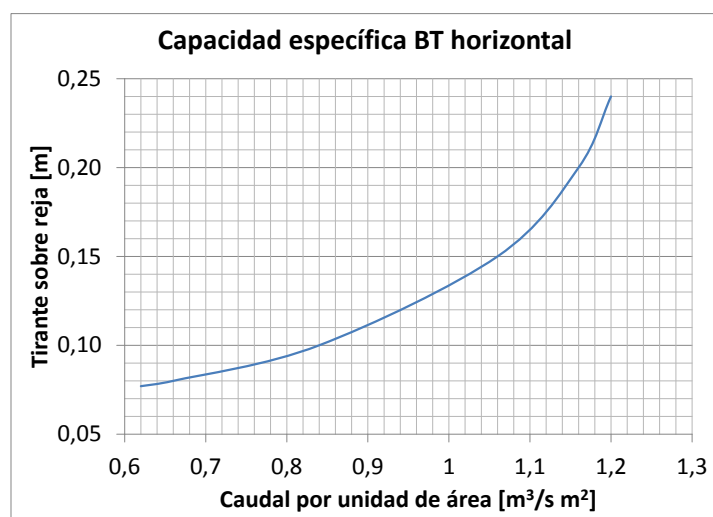
Todas las bocas de tormenta fueron consideradas como no obstruidas.

$$Q = 1.656L \cdot y_0^{1.5} \rightarrow y_0 \leq 1.5h \quad (4.5.a)$$

$$Q = 0.67L \cdot h \left[ 2g \left( y_0 - \frac{h}{2} \right) \right] \rightarrow y_0 > 1.5h \quad (4.5.b)$$

Donde:

- $Q$ : caudal [ $m^3/s$ ].
- $L$ : longitud [m].
- $y_0$ : tirante de agua [m].
- $h$ : abertura [m] de la boca de tormenta.



**Figura 4.3.** Capacidad específica de una boca de tormenta horizontal (adaptado de UDFCD, 1984).

Los vertederos detectados en el sistema, fueron incorporados en el modelo como canales de hormigón de 0.15m de longitud (espesor del cordón cuneta), con sus respectivos desniveles de entrada y salida. Se decidió confeccionarlos de esta manera debido a que se comportaban correctamente durante el flujo normal, desde las calles hacia los cursos de agua, y durante el desbordamiento de los arroyos, donde el flujo se produce desde estos hacia las cunetas de calles.

#### 4.2.2.4. Conceptualización de calles, zanjas de tierra y cauces naturales

Debido a la diversidad de tipología de calles, zanjas de tierra y cauces naturales, se optó por trabajar con un número reducido de tipología de canalizaciones, las cuales representan un promedio de las medidas relevadas en distintos puntos de la cuenca.

En general los cauces naturales presentan una altura de 1.50m, altura que fue unificada para todos los cauces, salvo en zonas particulares donde se detectaron alturas muy disimiles, los cuales fueron incorporados en el modelo. En tanto que para la pendiente transversal de los valles de inundación se adoptó un valor de 5.5%, igual a la pendiente media de la cuenca.

Las calles, ya sea con calzada de tierra, empedrado o pavimento flexible, fueron representadas por dos conductos, cada uno de ellos constituyendo media calle, con sus respectivas veredas, cordones cunetas y calzadas, con sus concernientes rugosidades asignadas (Tabla 4.9). A su vez, fueron discretizadas las calles que poseen un ancho de 15m, con 3m de vereda, y aquellas de 20m de ancho con 5m de vereda.

La pendiente de cada conducto es calculada por el modelo, en función a las cotas de los nodos iniciales y finales. Dichas cotas fueron cargadas el modelo uno a uno extrapoladas de

las curvas de nivel disponibles. La cota los nodos coincide con el nivel cero de los conductos que interactúan con el mismo, salvo que se requiera la designación de desniveles de entrada y/o salida en casos particulares.

En las Figuras 4.4 a 4.12 se presentan el detalle de las canalizaciones utilizadas para la conceptualización del modelo en calle, zanjas de tierra y cauces naturales.

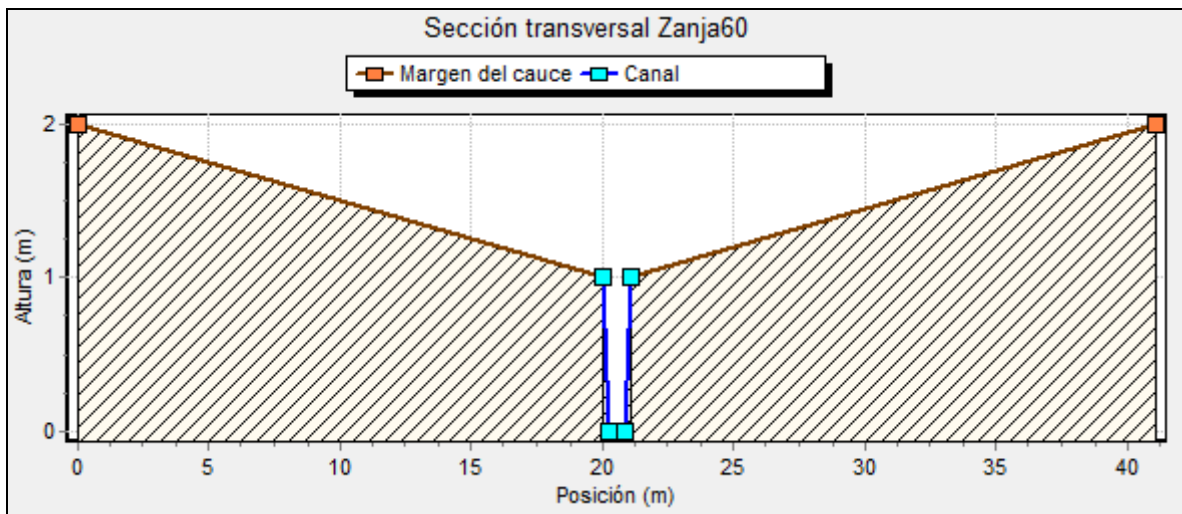


Figura 4.4. Sección transversal de zanjas excavadas en tierra de 60cm de ancho de solera.

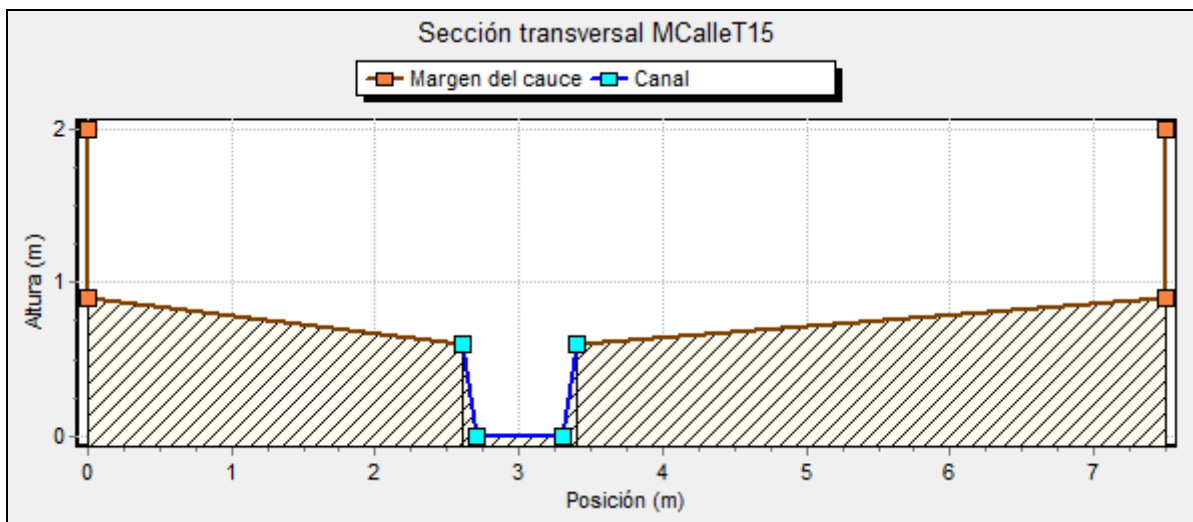


Figura 4.5. Sección transversal de media calle con calza de cunetas de tierra.

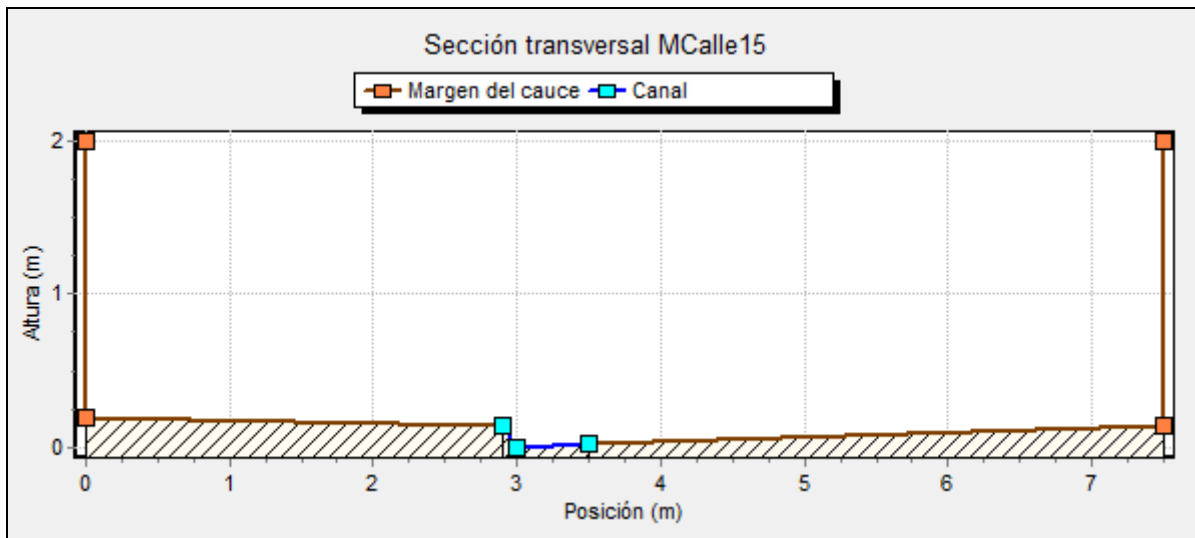


Figura 4.6. Sección transversal de media calle de 15m de ancho, con cunetas de hormigón y calzadas de empedrado o pavimento flexible.

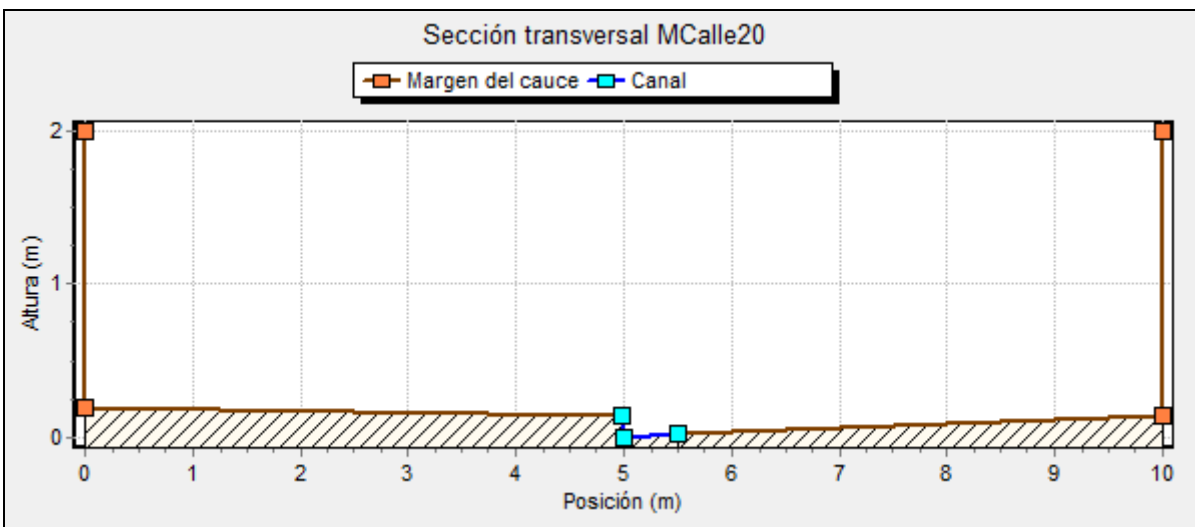


Figura 4.7. Sección transversal de media calle de 20m de ancho, con cunetas de hormigón y calzadas de empedrado o pavimento flexible.

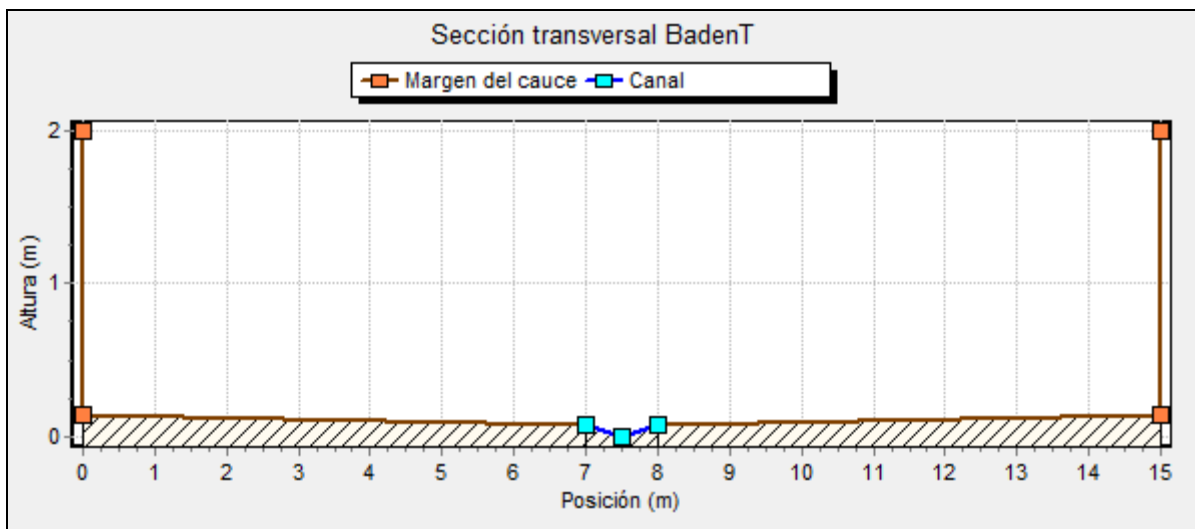


Figura 4.8. Sección transversal de badenes de tierra en calzada.

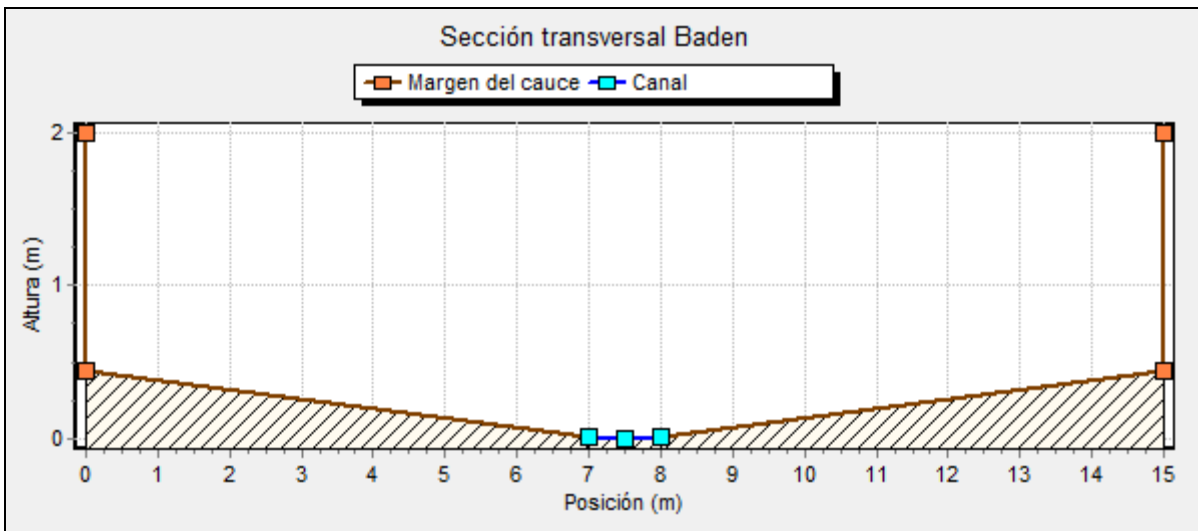


Figura 4.9. Sección transversal de badenes de hormigón en calzadas de empedrado o pavimento flexible.

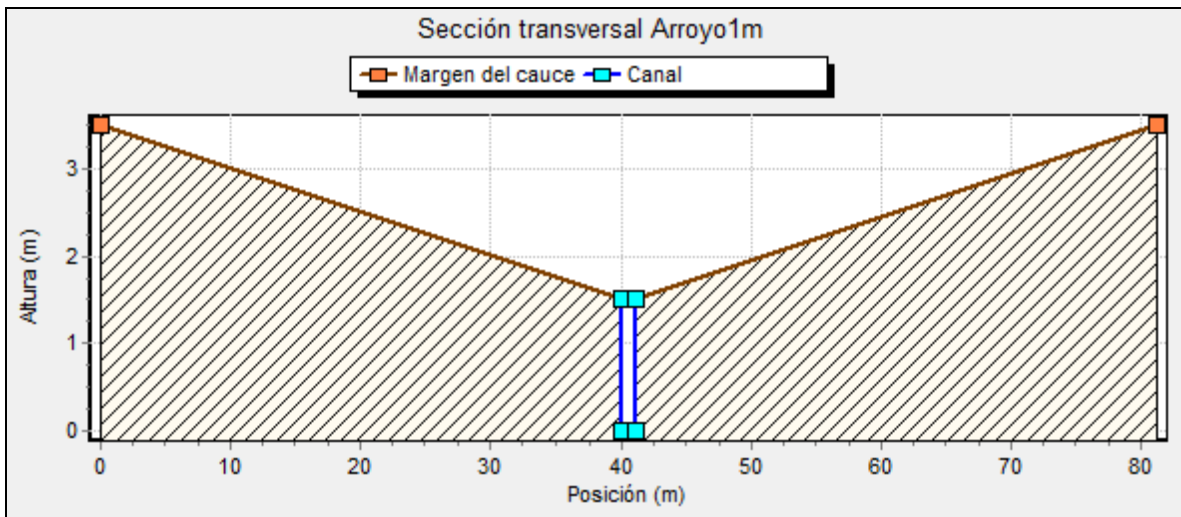


Figura 4.10. Sección transversal de arroyo menor, con 1m de ancho de solera.

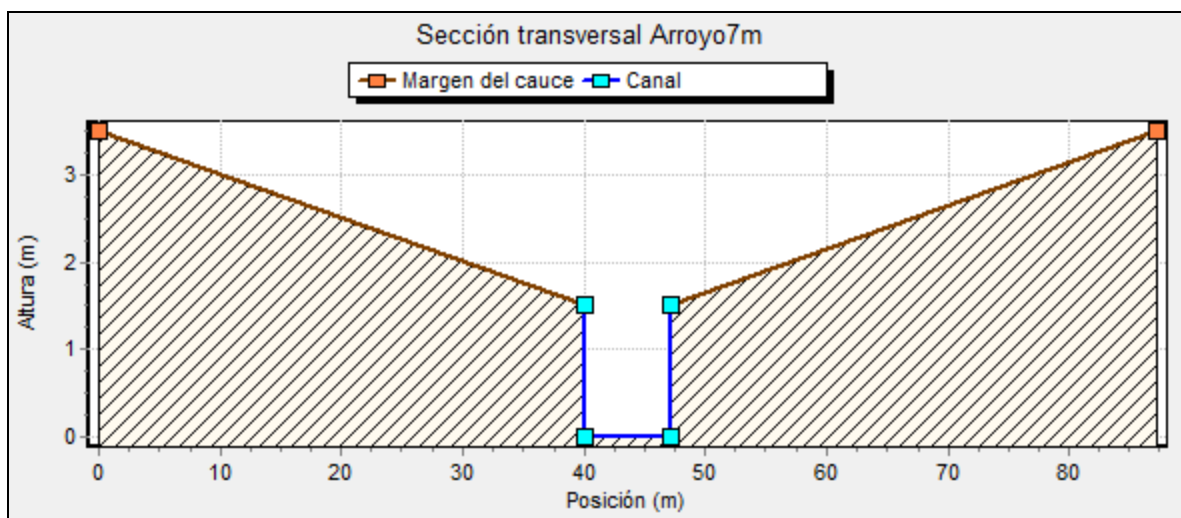
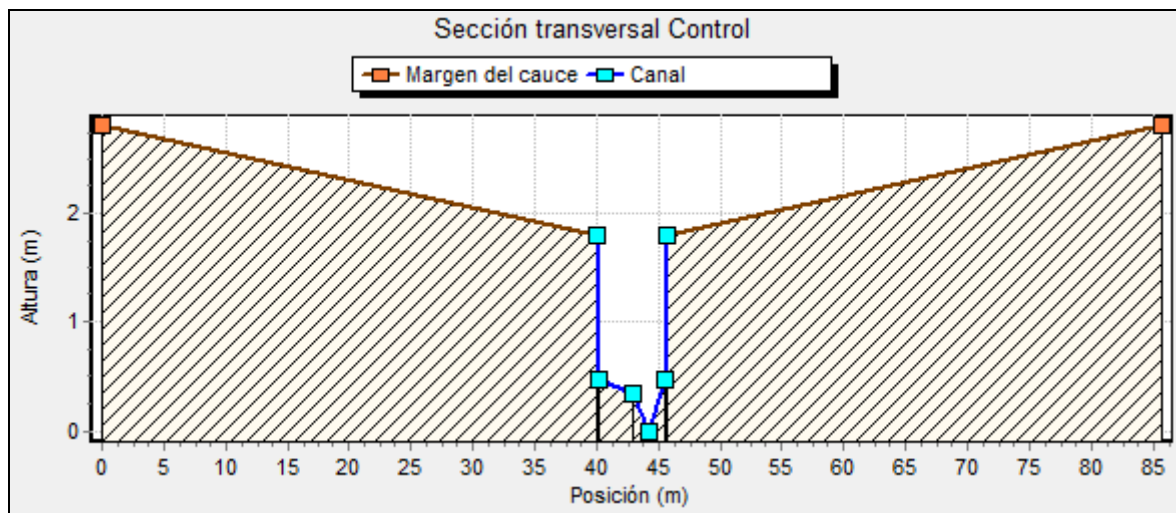


Figura 4.11. Sección transversal de arroyo mayor, con 7m de ancho de solera.



**Figura 4.12.** Sección transversal del punto de control.

Cabe aquí realizar una serie de aclaraciones:

- Si bien las secciones de calles con calzadas de empedrado y pavimento flexible poseen la misma geometría, las mismas presentan rugosidades diferentes sobre las calzadas (Tabla 4.9).
- Para bajos tirantes de agua los 2 conductos de cada calle (media calle) funcionan independientemente uno de otro, sin embargo, una vez superado el nivel del galibo central los mismo interactúan en cada boca calle.
- En las secciones de zanjas, arroyos y badenes se asignó una pendiente transversal del valle de inundación de 5.5%, igual a la pendiente media de la cuenca.
- Si bien en las figuras 4.9 y 4.10 se presentan las secciones de los arroyos con 1 y 7m de solera respectivamente, las secciones de los arroyos fueron tipificadas en 7 tipologías con 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7m de ancho de solera, todos con una altura de cauce de 1.5m y una pendiente transversal del valle de inundación de 5.5%.
- La sección en el punto de control es producto de un relevamiento planialtimétrico.
- Las alturas máximas de las distintas secciones fueron seleccionadas de modo que nunca se alcance el máximo en la modelización.

#### 4.2.2.5. Flujo base

El flujo base utilizado resultó del promedio de los niveles registrados en el punto de control durante las campañas sin precipitaciones. Con un nivel de 0.56m y una velocidad media de 0.98m/s, representa un caudal de 1.288m<sup>3</sup>/s.

Para lograr representar el caudal base, tanto el punto de control, como en los cursos de agua permanentes dentro de la cuenca, se dispusieron en el modelo hidrológico un total de 56 nodos de aporte de caudal externo. Tales nodos están repartidos a largo de los cursos de agua, aportando 23 litros de agua por segundo cada uno. El punto de control de la cuenca recibe el aporte de todos estos nodos internos, alcanzando los  $1.288\text{m}^3/\text{s}$ .

Dado que el traslado de las aguas del flujo base por la redes de drenaje no es instantánea y está gobernado por los parámetros físicos de los cursos de agua modelados, es necesario que el modelo corra durante un periodo de tiempo previo a la ocurrencia de las precipitaciones, de manera que al comenzar la lluvia los cursos de agua estén ya con sus respectivos niveles de flujo base.

Para ello, y a modo de facilitar la lectura de los resultados arrojados por el modelo, se dispuso que todas las tormentas analizadas comiencen a las 12h del día cero, dejando así un periodo de tiempo previo suficiente para la estabilización de los niveles de flujo base en toda la cuenca.

#### **4.2.2.6. Condición de borde saliente de la cuenca**

Como condición de borde para la calibración y validación del modelo, se utilizó la curva de niveles en función del tiempo  $h(t)$  a la salida de la cuenca. Para ello se comparó la curva  $h(t)$  observada en el punto control con aquella arrojada por el modelo para cada evento analizado.

A su vez, producto de campañas de batimetría con relevamientos extendidos de la sección de control, en conjunto con mediciones de velocidades superficiales, se logró establecer la curva que relaciona los distintos tirantes en el punto de control con los caudales asociados, obteniéndose así la curva  $Q(h)$  que permitió inferir los volúmenes totales erogados para cada tormenta registrada y compararlos con los determinados por el modelo.

La metodología seguida para determinar la  $Q(h)$  fue:

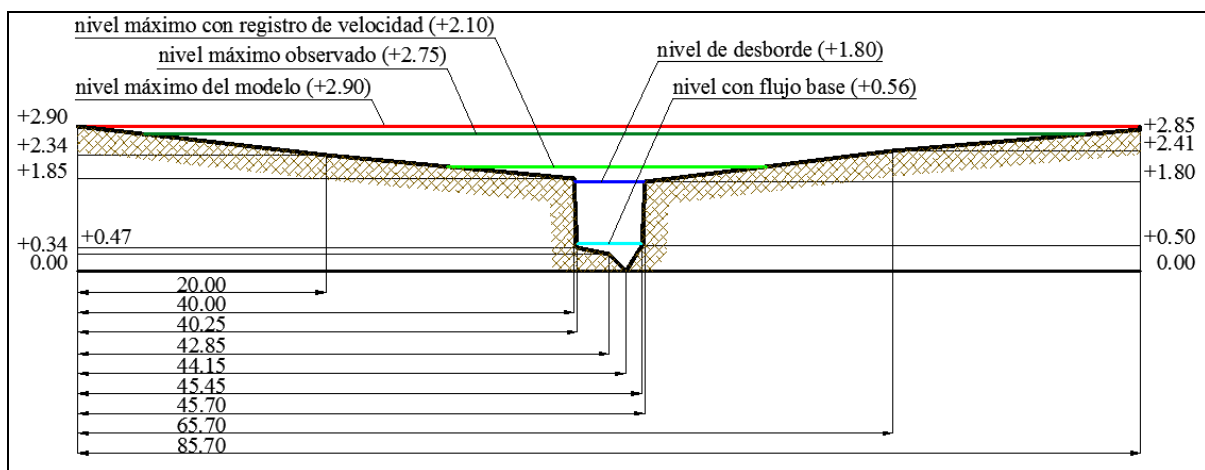
1. Mediante la utilización de flotadores se registró el tiempo necesario para que los mismos recorran una distancia fija de 7.15m, para distintos niveles de agua en el arroyo.
2. La velocidad superficial fue estimada a partir de la relación  $\Delta l/\Delta t$  considerando una distancia recorrida por el flotador de 7.15m. Los flotadores fueron arrojados de manera tal que su recorrido coincida con el *thalweg* (trayectoria a lo largo del cauce

que uno de los puntos de mayor profundidad), por lo que la velocidad determinada corresponde a la máxima velocidad superficial  $V_{max}^s$ .

3. La velocidad media integrada en una vertical  $V_m$  se estimó a partir de la relación  $V_m = 0.857 \times V_{max}^s$  (Basile et. al., 2011).
4. El caudal inferido resulto de la multiplicación de  $V_m$  por el área mojada en el cauce, establecida mediante el relevamiento planialtimétrico para cada nivel de agua registrado.
5. Finalmente la curva  $Q(h)$  fue ajustada a los caudales registrados, mediante una ecuación potencial (Ecuación 4.6), la cual resulto con una  $R^2$  de 0.99.

$$Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 6.4001h[m]^{2.3499} \tag{4.6}$$

Debido a las condiciones de riesgo que presenta el punto de control con el arroyo desbordado, no fue posible realizar mediciones de velocidades en todo el dominio de niveles registrados. El nivel máximo registrado en la totalidad de los eventos es de 2.75m, mientras que el nivel máximo en el que se pudo realizar mediciones de velocidad certeras es de 2.10m, recordando que el nivel de desborde del curso en el punto de control es de 1.80m. La Figura 4.13 presenta el perfil transversal de la sección de control y los niveles citados anteriormente.



**Figura 4.13.** Perfil transversal de la sección de control y niveles máximos con registro.

En la Tabla 4.2 se observan los resultados de las campañas de mediciones superficiales de velocidad y batimetría, mientras que en la Figura 4.14 se presenta el ploteo de los caudales inferidos y la curva  $Q(h)$  obtenida.

**Tabla 4.2.** Curva de relación altura-caudal en la salida de la cuenca.

Observaciones	nivel	sección	tiempo	velocidad superficial	velocidad media	caudal	curva Q (h)
	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[s]	[m/s]	[m/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
<i>cauce sin desbordar</i>	0.55	1.26	6.39	1.12	0.96	1.21	1.57
	0.55	1.26	6.35	1.13	0.97	1.22	1.57
	0.56	1.31	6.32	1.13	0.97	1.27	1.64
	0.60	1.52	4.95	1.44	1.24	1.89	1.93
	0.61	1.58	4.91	1.46	1.25	1.97	2.00
	0.62	1.63	4.87	1.47	1.26	2.05	2.08
	0.69	1.94	4.86	1.47	1.26	2.45	2.68
	0.70	2.05	4.28	1.67	1.43	2.94	2.77
	0.70	2.05	4.10	1.75	1.50	3.07	2.77
	0.80	2.58	4.09	1.75	1.50	3.87	3.79
	0.82	2.63	3.81	1.88	1.61	4.24	4.01
	0.83	2.69	3.80	1.88	1.61	4.33	4.13
	0.89	3.01	3.60	1.99	1.70	5.12	4.87
	0.91	3.17	3.29	2.18	1.87	5.91	5.13
	0.92	3.22	3.16	2.26	1.94	6.25	5.26
	0.99	3.54	3.57	2.00	1.71	6.08	6.25
	1.00	3.65	3.11	2.30	1.97	7.20	6.40
	1.03	3.81	2.81	2.55	2.18	8.32	6.86
	1.10	4.19	2.75	2.60	2.23	9.36	8.01
	1.13	4.30	2.69	2.66	2.28	9.79	8.53
	1.14	4.35	2.66	2.69	2.31	10.05	8.71
	1.19	4.63	2.70	2.65	2.27	10.50	9.63
	1.19	4.63	2.89	2.47	2.12	9.81	9.63
	1.22	4.85	2.67	2.67	2.29	11.11	10.21
	1.36	5.62	2.66	2.68	2.30	12.92	13.18
	1.39	5.73	2.54	2.82	2.41	13.83	13.88
	1.40	5.84	2.16	3.53	3.03	17.66	14.11
	1.58	6.84	2.22	3.22	2.76	18.86	18.75
1.61	7.01	2.15	3.32	2.85	19.97	19.60	
1.63	7.07	2.17	3.30	2.83	19.96	20.17	
1.75	7.80	2.12	3.38	2.90	22.60	23.84	
<i>cauce desbordado</i>	1.80	8.08	2.20	3.26	2.79	22.56	25.47
	1.81	8.16	2.10	3.41	2.92	23.85	25.81
	1.89	8.71	2.07	3.45	2.96	25.79	28.57
	1.90	8.87	2.06	3.47	2.97	26.37	28.92
	1.90	8.87	2.08	3.44	2.95	26.14	28.92
	2.00	10.34	2.10	3.41	2.92	30.21	32.63
	2.00	10.34	2.05	3.48	2.99	30.87	32.63
	2.01	10.56	2.04	3.50	3.00	31.67	33.01
	2.08	12.10	2.29	3.13	2.68	32.44	35.78
	2.09	12.32	2.10	3.40	2.92	35.95	36.18
	2.10	12.54	2.18	3.28	2.81	35.25	36.59

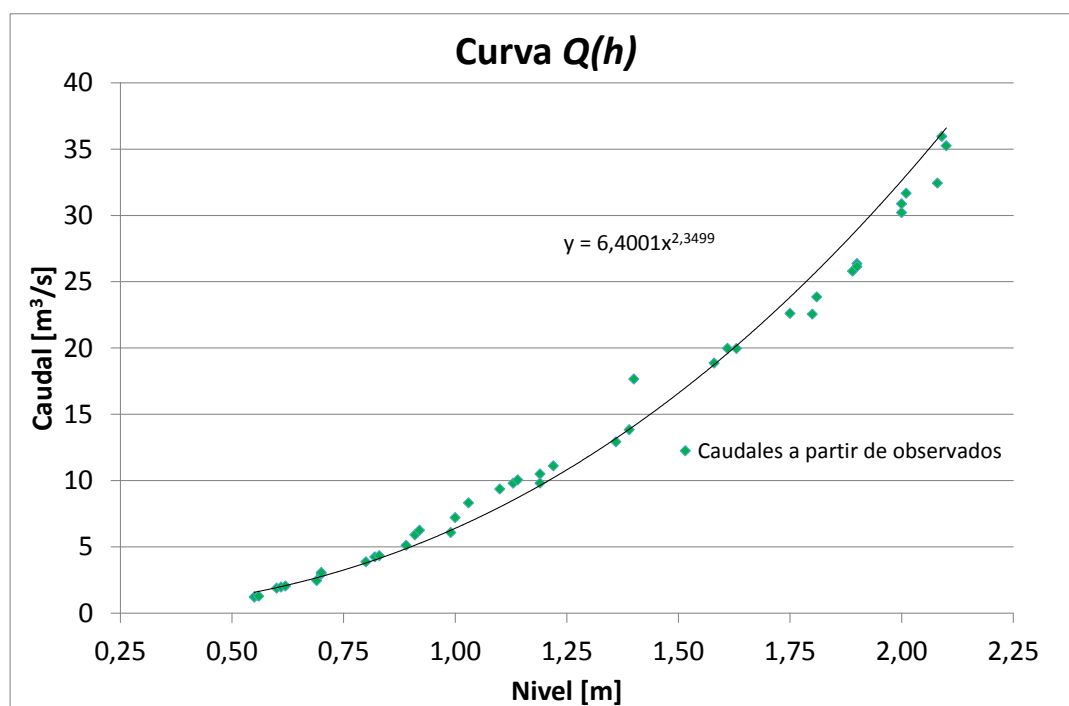


Figura 4.14. Curva de relación altura-caudal en la salida de la cuenca.

Las campañas anteriormente descritas permitieron además calibrar las rugosidades del cauce y el valle de inundación del arroyo donde se ubica la sección de control, los cuales fueron adoptados para todos los otros cursos naturales de agua (Tabla 4.9).

#### 4.2.2.7. El ambiente de modelación resultante

El ambiente de modelación, producto de las tareas de relevamiento y análisis de datos disponibles hasta el año 2013, resultó de una extensión superficial de 976.7ha, correspondiendo un 10.9% a áreas impermeables directamente conectadas, 13.0% a áreas impermeables no conectadas y 76.1% a áreas permeables.

En resumen el modelo quedó constituido por 972 subcuencas tributarias, 2967 nodos y 3742 elementos conductores de los excedentes hídricos (calles, cunetas, sumideros, zanjas, canales, conductos y arroyos).

En la Figura 4.15 se presenta una imagen del esquema de conceptualización del modelo en el SWMM, donde puede apreciarse las subcuencas, nodos y conductos modelizados. Una visualización más en detalle puede apreciarse en los planos de anexo.



Figura 4.15. Esquema de conceptualización del modelo.

### 4.2.3. Calibración y validación del modelo

#### 4.2.3.1. Metodología

La calibración consistió en un procedimiento en el cual se ajustaron los parámetros de resistencia al escurrimiento, a los efectos de lograr la mejor aproximación entre los niveles observados y los simulados por el modelo en la sección de control. Además, sirvió para corroborar los estados de humedad antecedente, ajustar los valores de CN y de volúmenes de almacenamiento superficial, tanto en área permeables como impermeables, al comparar volúmenes de escurrimiento directo a partir de las lluvias totales versus escurrimiento directo, establecido al transformar limnigramas observados en hidrogramas inferidos (mediante curva  $Q(h)$  ajustada en sección de control) y luego integrar los hidrogramas. Adicionalmente, la comparación de volúmenes fue utilizada para mejorar algunas suposiciones adoptadas a priori en lo que respecta a los porcentajes de áreas impermeables totales y directamente conectadas de las distintas zonificaciones.

El proceso de calibración-validación del modelo fue discretizado en tres pasos metodológicos diferentes: (i) una primera etapa de calibración inicial, (ii) una segunda etapa de calibración-validación y (iii) una etapa final de validación de un evento extremo. Cada uno de estos pasos serán detallados más adelante en presente capítulo.

Para establecer el grado de ajuste de limnigramas de las distintas modelaciones, además de las relaciones entre los caudales máximos y volúmenes de escurrimiento directo modelado y observado, se utilizó el coeficiente de determinación múltiple  $R^2$ . Los parámetros del modelo

adoptados resultan de aquella combinación cuyas modelaciones presentaron un mayor valor de  $R^2$  para el total de eventos utilizados en la calibración para cada humedad antecedente.

Además, para evaluar el grado de ajuste se determinaron para cada evento el NSE, PBIAS y RSR, indicadores de bondad de ajuste recomendados por Moriasi et al. (2007).

#### 4.2.3.2. Registros hidrometeorológicos

Los datos de precipitación fueron obtenidos por la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM, 2016), situada en el campus universitario dentro del casco céntrico de la ciudad, cercana al baricentro de la cuenca en estudio. Dicha estación cuenta con un pluviógrafo digital a canjilones, capaz de discretizar las precipitaciones en intervalos de hasta 1 minuto y 0.2mm.

Para la determinación del caudal erogado registrado se utilizó el limnigrama observado y la curva  $Q(h)$  definida para el punto de control de la cuenca (Figuras 4.16.a y b).



*Figura 4.16.a. Sección de control utilizada para la calibración  
b. Regla limnimétrica instalada para el registro de niveles.*

Los limnigramas comparados fueron obtenidos por observación directa de las reglas limnimétricas instalada en el punto de control de la cuenca.

#### 4.2.3.3. Calibración inicial

El proceso de calibración inicial consistió en la contrastación de los niveles registrados y aquellos arrojados por el modelo en una serie de tormentas, las cuales se encontraban disponibles al inicio de los trabajos de tesis.

Para ello se utilizaron los registros de cuatro eventos pluviográficos, observados entre agosto y octubre de 2013, los cuales se detallan en la Tabla 4.3.

Los parámetros a calibrar durante esta primera etapa fueron los distintos coeficientes de resistencia empleados en las superficies de escurrimiento y elementos de conducción, mientras que los valores de CN y almacenamiento superficial fueron supuestos en función a la bibliografía especializada, y las investigaciones precedentes.

*Tabla 4.3. Tormentas utilizadas para la calibración inicial del modelo.*

<i>Evento N°</i>	<i>Fecha</i>	<i>Humedad antecedente</i>	<i>Precipitación total</i>	<i>Duración</i>	<i>Intensidad media</i>	<i>Intensidad máxima en 5 min</i>
	<i>[dd-mmm-aa]</i>		<i>[mm]</i>	<i>[d:hh:mm]</i>	<i>[mm/h]</i>	<i>[mm/h]</i>
<i>1-1</i>	<i>16-ago-13</i>	<i>II (media)</i>	<i>66.6</i>	<i>0:04:05</i>	<i>16.3</i>	<i>264</i>
<i>1-2</i>	<i>23 al 26-ago-13</i>	<i>II (medial)</i>	<i>258.6</i>	<i>3:18:00</i>	<i>2.9</i>	<i>70</i>
<i>1-3</i>	<i>21-sep-13</i>	<i>II (media)</i>	<i>25.6</i>	<i>0:05:15</i>	<i>4.9</i>	<i>38</i>
<i>1-4</i>	<i>21-oct-13</i>	<i>II (media)</i>	<i>122.2</i>	<i>0:04:00</i>	<i>30.5</i>	<i>194</i>

Estos registros utilizados inicialmente, a diferencia de los evaluados con posterioridad, poseían las siguientes características:

- Los limnigramas comparados fueron obtenidos con lecturas cada 5 o 15 minutos.
- Los hietogramas modelados presentan intervalos de tiempo de 15 minutos.
- Solamente uno de los cuatro eventos posee un registro completo del limnigrama de respuesta de la cuenca.
- Todos los eventos poseen una humedad antecedente II (media), según la metodología propuesta por Chow et al. (1994).
- En estos cuatro eventos no se realizaron tomas de muestra de agua para evaluar el Total de Sólidos Disueltos (TDS) asociado a cada registro de nivel de agua.

En las Figuras 4.17 a 4.20 se exhiben los hietogramas y curvas masa registrados para cada evento, además de una comparación del limnigrama registrado y el resultante de la modelación en la salida de la cuenca. Posteriormente en la Tabla 4.3 se presentan un resumen de las modelación y los indicadores de bondad de ajuste de todos los eventos.

Cabe mencionar aquí que, al momento de realizar la calibración inicial no se contaba con la  $Q(h)$  en el punto de control de la cuenca, por lo que se consideró que, a igual niveles entre lo observado y el modelo, corresponde igual caudal. Caudal que era obtenido en función de la  $Q(h)$  resultante del modelo.

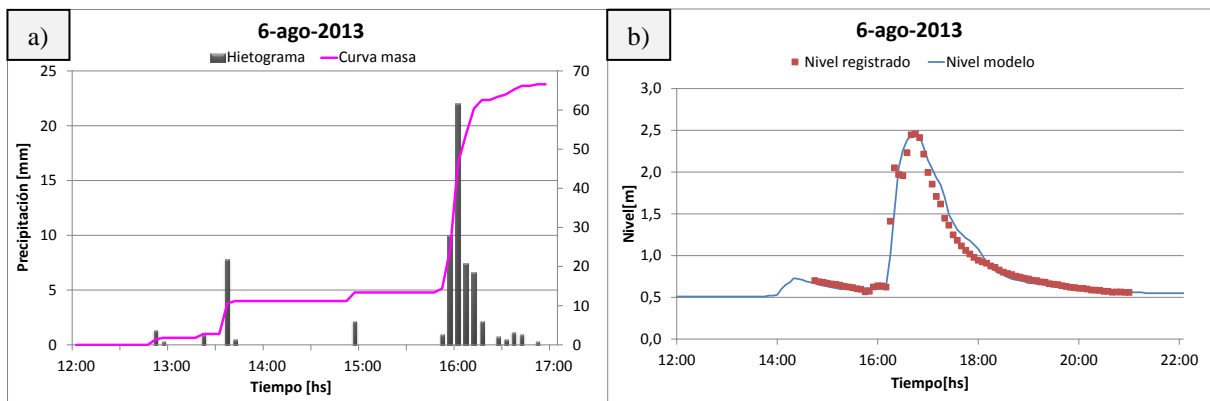


Figura 4.17.a. Hietograma y curva masa 6-ago-2013. b. Linnigramas registrado y modelado 6-ago-2013.

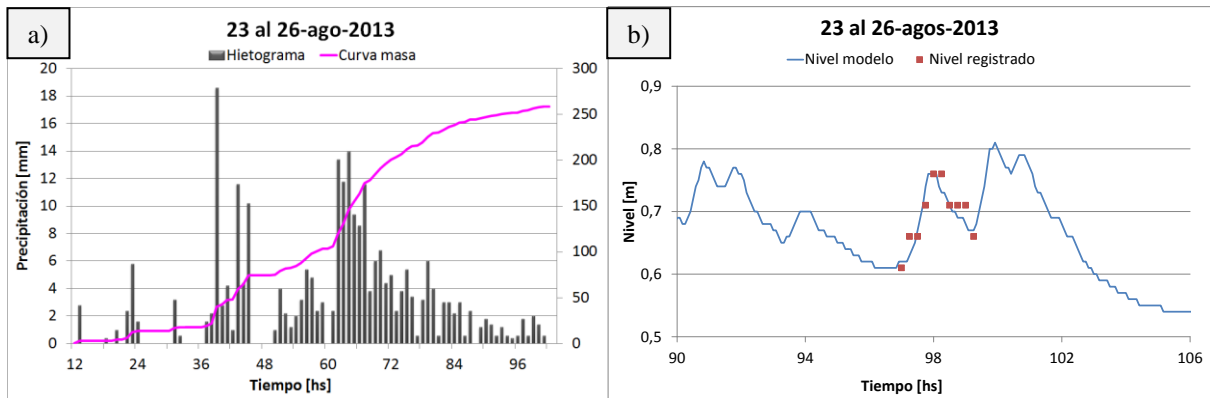


Figura 4.18.a. Hietograma y curva masa 23 al 26-ago-2013.  
b. Linnigramas registrado y modelado 23 al 26-ago-2013.

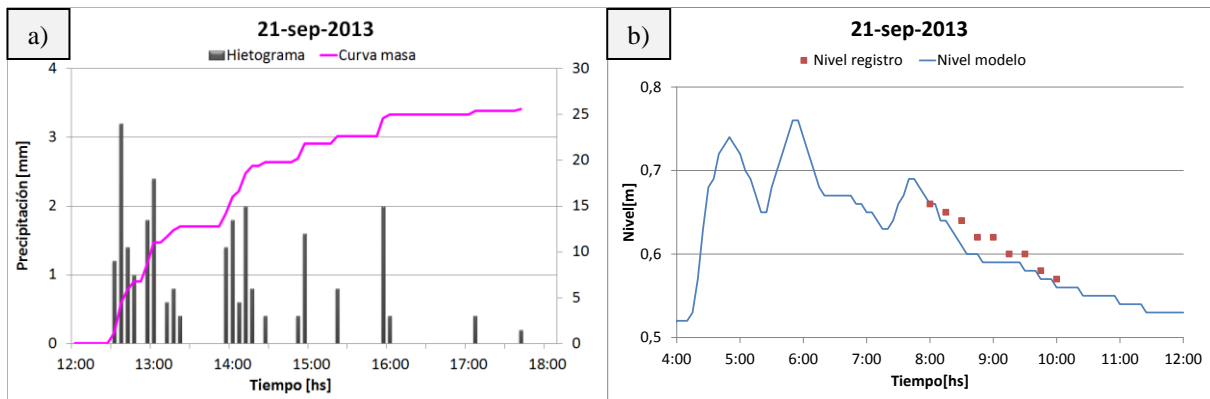


Figura 4.19.a. Hietograma y curva masa 21-sep-2013. b. Linnigramas registrado y modelado 21-sep-2013.

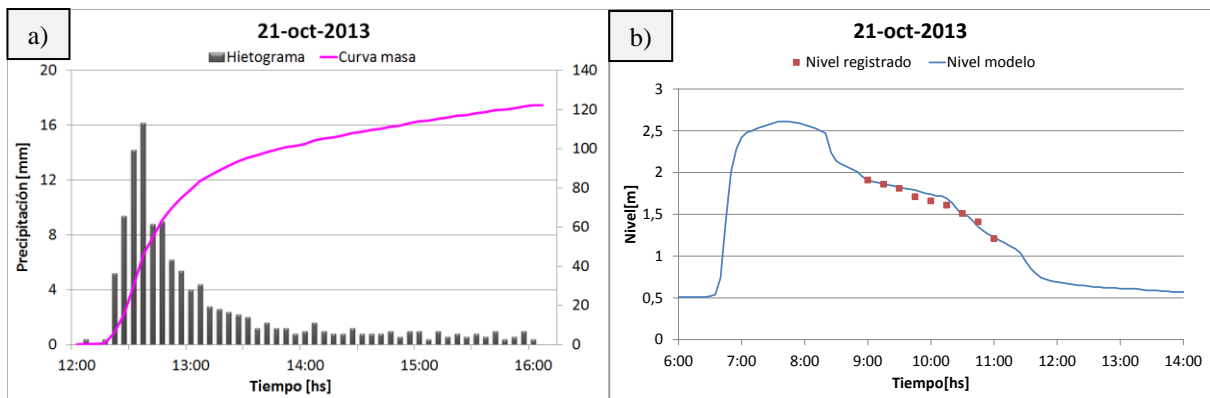


Figura 4.20.a. Hietograma y curva masa 21-oct-2013. b. Linnigramas registrado y modelado 21-oct-2013.

**Tabla 4.3.** Resumen de las corridas para los 4 eventos de la calibración inicial.

Parámetros		06-oct-13	23 al 26-ago-13	21-sep-13	21-oct-13	
Tormenta	Humedad antecedente	[adm]	II	II	II	
	Precipitación total	[mm]	66.6	258.6	25.6	122.2
	Duración	[hs]	4	90	5	4
	Intensidad media	[mm/h]	16.3	2.9	4.9	30.5
Escorrentamiento superficial	Esc. Dir. Modelado <sup>(*)</sup>	[m <sup>3</sup> ]	216925	24297	15716	174596
	Esc. Dir. observado	[m <sup>3</sup> ]	213781	24355	16214	175193
	Diferencia	[%]	1.5	-0.2	-3.1	-0.3
	Nivel máximo modelo <sup>(**)</sup>	[m]	2.47	0.76	s/r	s/r
	Nivel máximo observado	[m]	2.46	0.76	s/r	s/r
	Diferencia	[%]	0.5	0.0	-	-
	R <sup>2</sup>	[adm]	0.96	0.80	0.90	0.96
	NSE	[adm]	0.95	0.79	0.61	0.94
	PBIAS	[%]	-1.47	0.72	2.53	-1.29
RSR	[adm]	0.21	0.46	0.63	0.24	

(\*) Volumen de escurrimiento generado por el modelo durante el periodo con registros.

(\*\*) Nivel máximo generado por el modelo durante el periodo con registros.

En total fueron evaluados 104 pares de valores (niveles observados-niveles modelados), resultando un valor máximo de R<sup>2</sup> de 0.97.

En la Tabla 4.3 se visualiza que la diferencia entre el volumen total observado y el modelado, al menos durante los periodos de registro, varía entre -3.1 y 1.5%, con una media de valores absolutos de 1.3%. En tanto que los valores de niveles máximos presentan un buen ajuste, igual que los indicadores de bondad de ajuste.

#### 4.2.3.4. Calibración-validación

Durante este paso metodológico, tres modelos diferentes fueron calibrados-validados, uno para cada humedad antecedente según a la metodología propuesta por Chow et al. (1994).

Para cada modelo se utilizaron los eventos con humedades antecedentes equivalentes, ajustándose los valores de CN y almacenamiento superficial, de modo que el volumen total escurrido tienda a igual al volumen neto precipitado en todos los eventos de una misma humedad antecedente. En cambio, otros parámetros tales como la rugosidad de las superficies, los valores de área impermeable y otros, son constantes para los todos los modelos.

Cabe realizar aquí una distinción semántica: (i) los valores de CN y almacenamiento superficial resultantes de este segundo análisis fueron ajustados del proceso hidrológico; (ii) en tanto que las rugosidades y coeficientes de descarga de las bocas de tormenta fueron ajustados del proceso hidrodinámico.

Para la calibración-validación de los modelos se utilizaron los registros de un total de 10 eventos pluviográficos, los cuales se detallan en la Tabla 4.4.

Los registros utilizados en esta instancia, a diferencia de los evaluados con anterioridad, poseen las siguientes características:

- Los limnigramas comparados fueron obtenidos con lecturas cada 1 hora.
- Los hietogramas registrados presentan intervalos de tiempo de 5 minutos.
- Todos los eventos posee registro de las ramas ascendentes y descendentes del limnigrama.
- Los eventos poseen distintas humedades antecedentes según la metodología propuesta por Chow et al. (1994).
- En todos los eventos se realizaron tomas de muestra de agua para evaluar TSD asociado a cada registro de nivel de agua.

**Tabla 4.4.** Tormentas utilizadas para la calibración del modelo.

Evento N°	Fecha	Humedad antecedente	Precipitación total	Duración	Intensidad media	Intensidad máxima en 5 min
	[dd-mmm-aa]		[mm]	[h]	[mm/h]	[mm/h]
2-1	19-nov-13	II (media)	44.4	6	7.4	43.2
2-2	11-ene-14	II (media)	31.6	7	4.5	24
2-3	20-feb-14	II (media)	77.4	11	7	48
2-4	09-abr-14	I (seco)	41.4	9	4.6	28.8
2-5	04-may-14	II (media)	38.6	10	3.9	38.4
2-6	19-jul-14	II (media)	58	12	4.8	40.8
2-7	06-oct-14	II (media)	53.8	14	3.8	33.6
2-8	31-oct-14	III (húmedo)	41.8	11	3.8	33.6
2-9	30-nov-14	I (seco)	127	23	5.5	69.6
2-10	01-ene-15	III (húmedo)	160	12	13.3	86.4

Para el modelo de humedad antecedente tipo I (seco) se utilizaron dos eventos (19-abr-14 y 30-no-14), con un total de 26 registros se alcanzó, para la comparación de niveles,  $R^2$  de 0.68 y una diferencia promedio, en valores absolutos, entre los volúmenes de escurrimiento observados y modelado de 6.1%.

En tanto que para el modelo de humedad antecedente tipo II (media) se utilizaron seis eventos (19-nov-13, 11-ene-14, 20-feb-14, 4-may-14, 19-jul-14 y 6-oct-14), con un total de 75 registros se alcanzó  $R^2$  de 0.83 y una diferencia promedio, en valores absolutos, entre los volúmenes de escurrimiento observados y modelado de 9.2%.

Mientras que para el modelo de humedad antecedente tipo III (húmedo) se utilizaron dos eventos (31-oct-14 y 1-ene-15), con un total de 24 registros se alcanzó  $R^2$  de 0.81 y una diferencia promedio, en valores absolutos, entre los volúmenes de escurrimiento observados y modelado de 17.6%.

A continuación se presentan las Figuras 4.21 a 4.30 donde se exhiben los hietogramas y curvas masa registrados para cada evento, como así también una comparación del limnigrama registrado y el resultante de la modelación en la salida de la cuenca. Posteriormente en la Tabla 4.5 se presentan un resumen de las modelación y los indicadores de bondad de ajuste de todos los eventos.

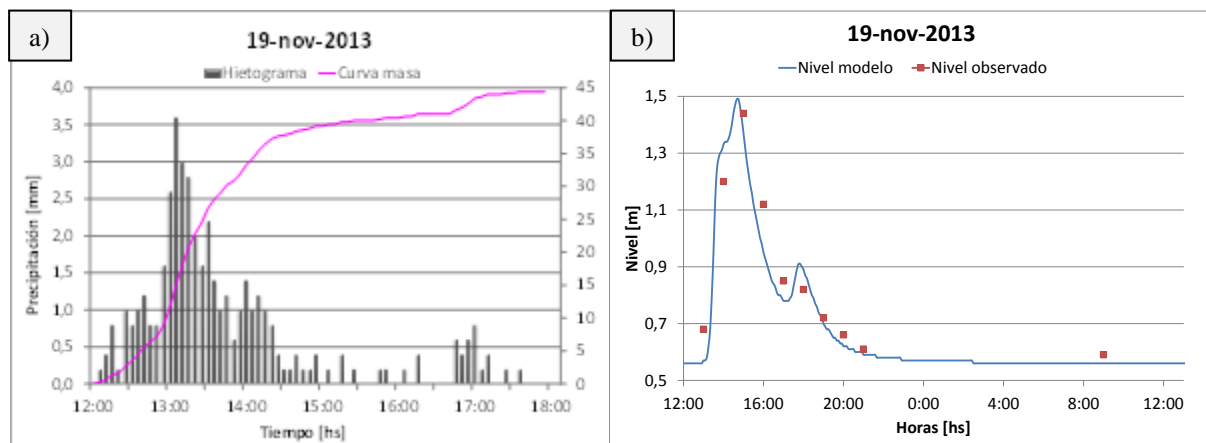


Figura 4.21.a. Hietograma y curva masa 19-nov-2013. b. Limnigramas registrado y modelado 19-nov-2013.

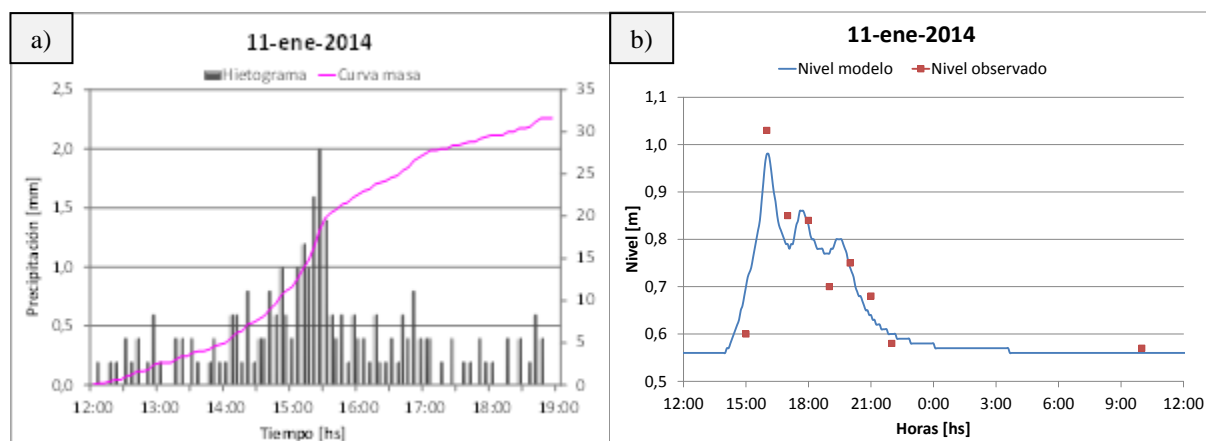


Figura 4.22.a. Hietograma y curva masa 11-ene-2014. b. Limnigramas registrado y modelado 11-ene-2014.

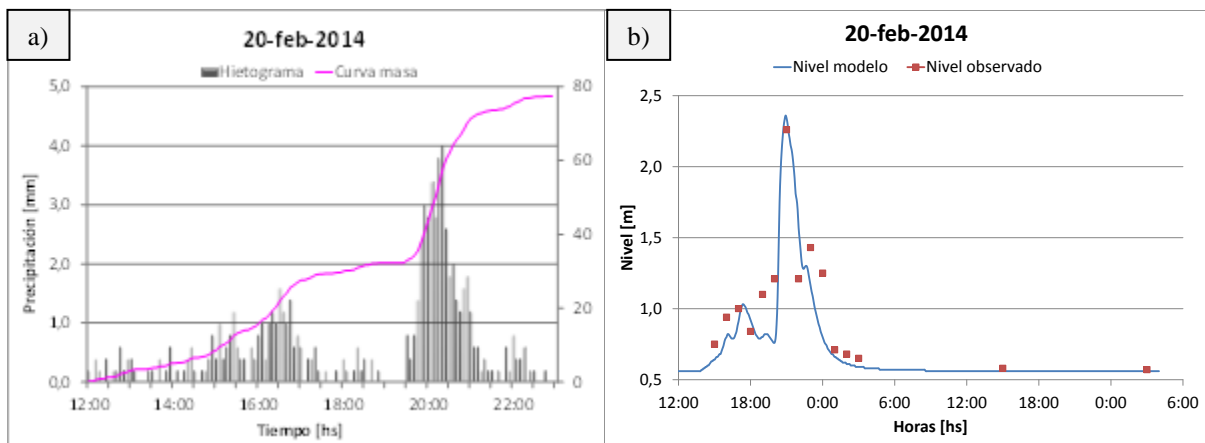


Figura 4.23.a. Hietograma y curva masa 20-feb-2014. b. Limnigramas registrado y modelado 20-feb-2014.

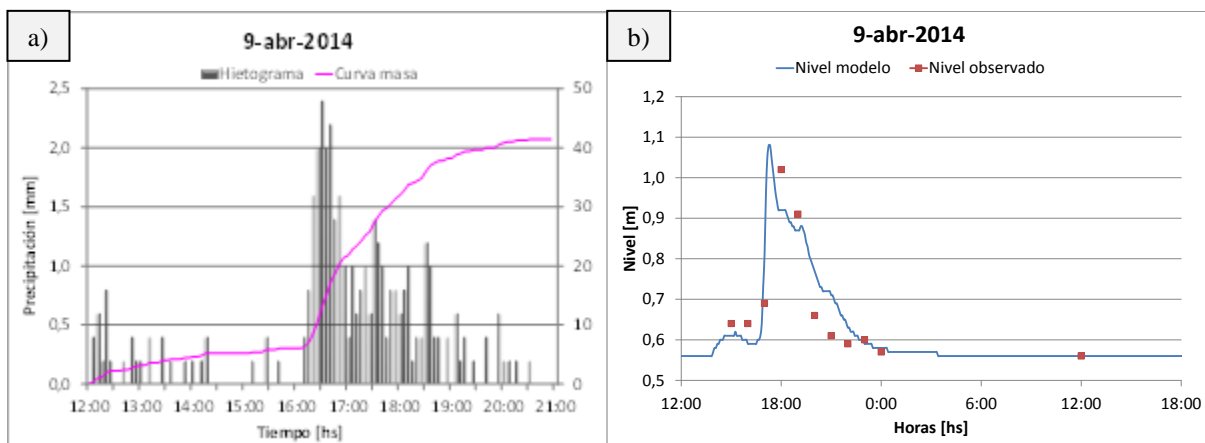


Figura 4.24.a. Hietograma y curva masa 9-abr-2014. b. Limnigramas registrado y modelado 9-abr-2014.

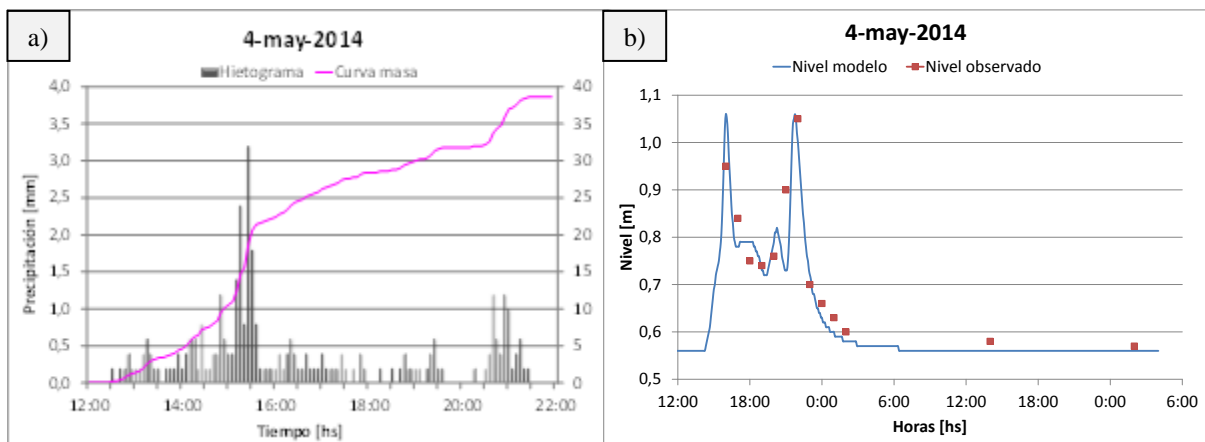


Figura 4.25.a. Hietograma y curva masa 4-may-2014. b. Limnigramas registrado y modelado 4-may-2014.

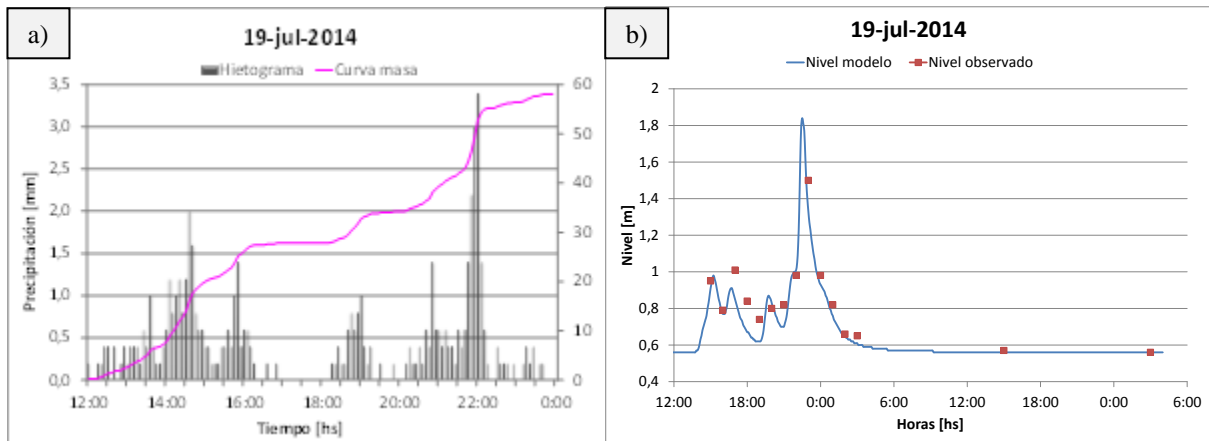


Figura 4.26.a. Hietograma y curva masa 19-jul-2014. b. Limnigramas registrado y modelado 19-jul-2014.

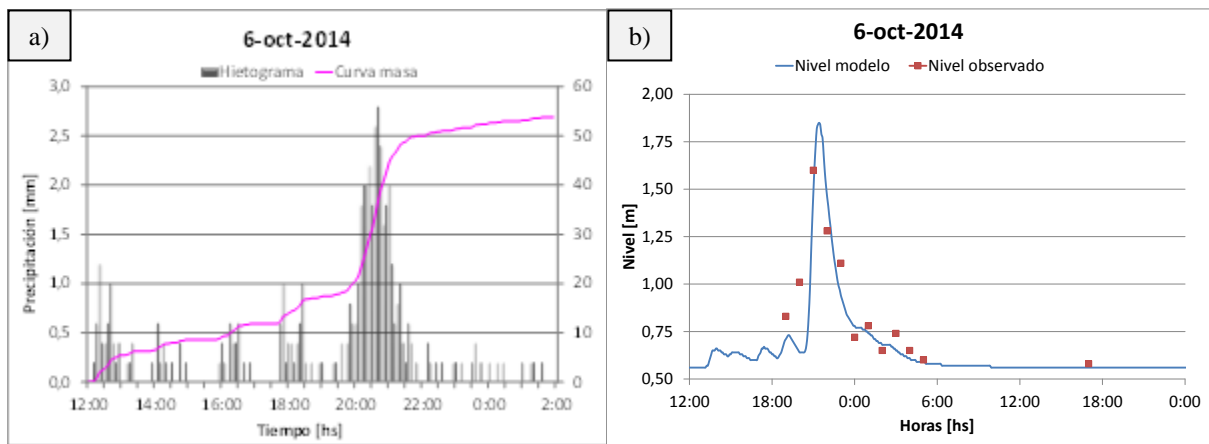


Figura 4.27.a. Hietograma y curva masa 6-oct-2014. b. Limnigramas registrado y modelado 6-oct-2014.

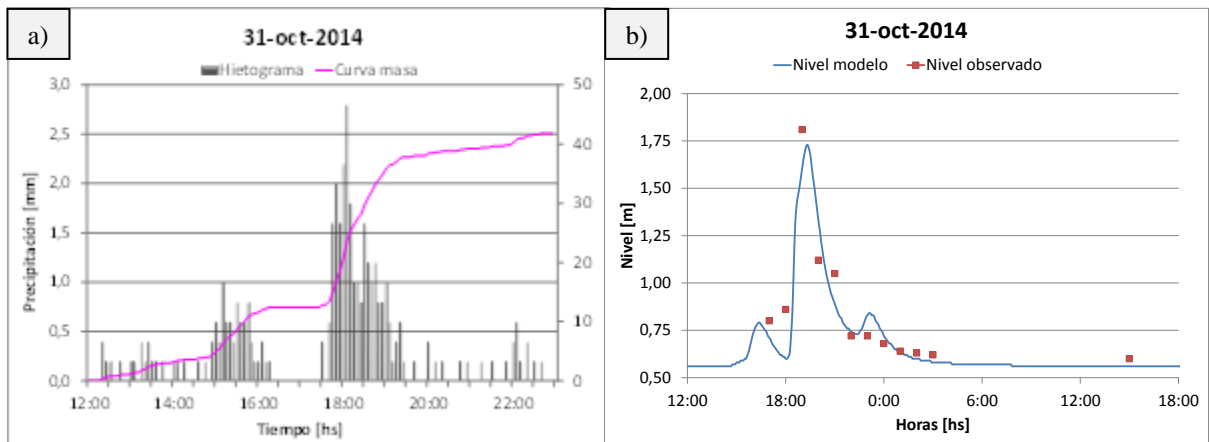


Figura 4.28.a. Hietograma y curva masa 31-oct-2014. b. Limnigramas registrado y modelado 31-oct-2014.

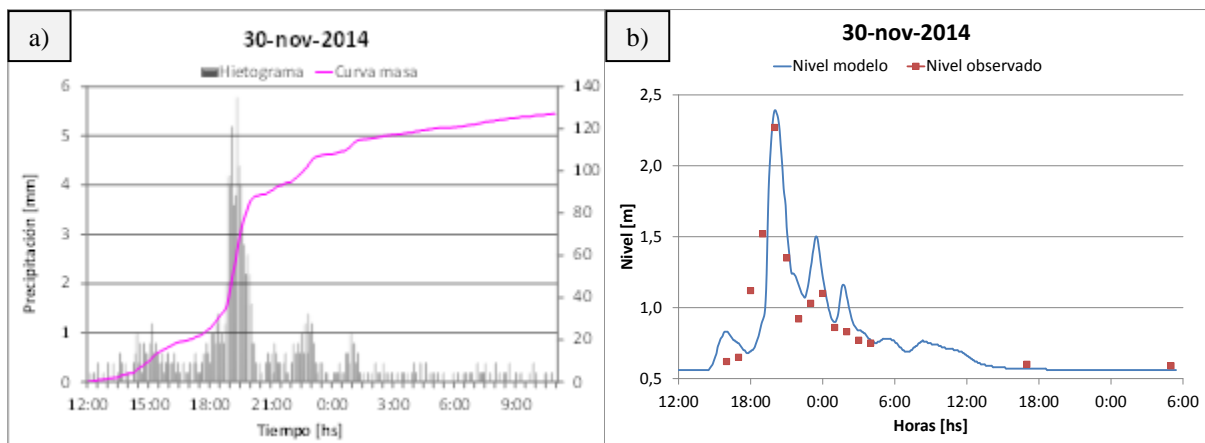


Figura 4.29.a. Hietograma y curva masa 30-nov-2014. b. Limnigramas registrado y modelado 30-nov-2014.

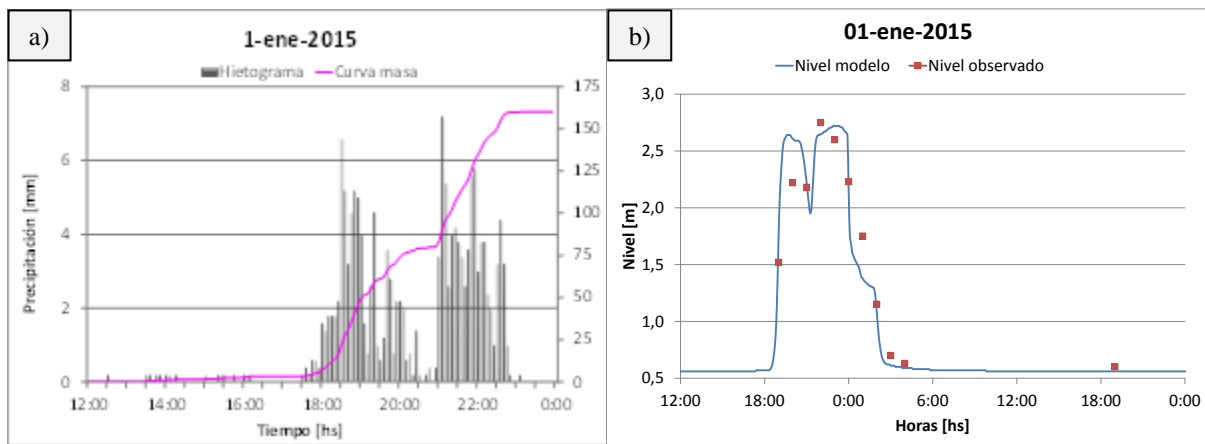


Figura 4.30.a. Hietograma y curva masa 01-ene-2015. b. Limnigramas registrado y modelado 01-ene-2015.

Tabla 4.5. Resumen de las corridas para los 10 eventos.

Parámetros			19-nov-2013	11-ene-2014	20-feb-2014	09-abr-2014	04-may-2014	19-jul-2014	06-oct-2014	31-oct-2014	30-nov-2014	01-ene-2015
Tormenta	Humedad antecedente	[adm]	II	II	II	I	II	II	II	III	I	III
	Precipitación total	[mm]	44.4	31.6	77.4	41.4	38.6	58.0	53.8	41.8	127.0	160.0
	Duración	[hs]	6	7	11	9	10	12	14	11	23	12
	Intensidad media	[mm/h]	7.4	4.5	7.0	4.6	3.9	4.8	3.8	3.8	5.5	13.3
Escorrentamiento superficial	Esc. Dir. modelado*	[m3]	131940	61129	316889	47854	87117	165507	150562	136961	341828	1227284
	Esc. Dir. observado	[m3]	132635	51031	371055	45018	83165	170478	172212	167656	363353	1049643
	Diferencia	[%]	-0.5	19.8	-14.6	6.3	4.8	-2.9	-12.6	-18.3	-5.9	16.9
	Caudal máximo modelo	[m3/s]	17.1	6.1	47.0	7.6	7.6	25.7	25.5	19.7	39.5	91.6
	Caudal máximo observado	[m3/s]	15.1	6.9	43.5	6.7	7.2	s/r	s/r	25.8	43.9	69.0
	Diferencia	[%]	13.4	-10.4	8.1	13.5	6.1	-	-	-23.6	-10.0	32.8
	R2	[adm]	0.88	0.84	0.80	0.64	0.73	0.90	0.83	0.88	0.72	0.74
	NSE	[adm]	0.83	0.82	0.66	0.63	0.68	0.72	0.75	0.82	0.70	0.63
PBIAS	[%]	5.7	0.0	12.8	1.6	2.8	9.8	8.4	9.0	4.4	5.6	
RSR	[adm]	0.41	0.43	0.58	0.60	0.57	0.53	0.50	0.43	0.54	0.61	

(\*) Volumen de escurrimiento generado por el modelo durante el periodo con registros; s/r Sin registro.

En la Tabla 4.5 observamos que el  $R^2$  presenta valor mínimo de 0.64 y máximo de 0.90, con un valor promedio de 0.80; mientras que la diferencia entre los volúmenes de escurrimiento directo observados y modelado variaron entre -18.3 y 19.8%, con un valor promedio en valores absolutos de 10.3%; respecto a la diferencia en los caudales máximos la misma varió entre -23.6 y 32.8%, con un valor promedio en valores absolutos de 14.7%. Los valores anteriormente, junto con los indicadores de bondad de ajuste exhiben un buen ajuste del modelo.

Finalmente, en la Tabla 4.5 están resaltados los valores de indicadores de bondad de ajuste que mejores resultados arrojaron. Puede observarse como no se evidencia una única tormenta con todos los mejores indicadores. Si la tormenta del 19-nov-13 presenta los mejores valores de RSR y diferencia entre volumen de escurrimiento observado y modelado.

#### 4.2.3.5. Validación del modelo en una tormenta extrema

Esta validación consistió en simular la tormenta del día 10 de noviembre de 2015, donde se presentó en la ciudad un severo evento pluviográfico, el cual provocó el colapso de obras de infraestructura por procesos de erosión, el arrastre de vehículos y la destrucción de viviendas, con niveles de inundación records según el testimonio de lugareños. Durante dicha jornada precipitaron un total de 207.4mm, en menos de 8h, con 164.2mm precipitados en 3h. En la Figura 4.31.a se presenta el hietograma y curva masa de dicho evento

De la modelación de este evento resultó una precipitación en exceso de 172.9mm, equivalente a  $1688196\text{m}^3$  y un caudal máximo en el punto de control de la cuenca de  $119.6\text{m}^3/\text{s}$  (Figura 4.31.b).

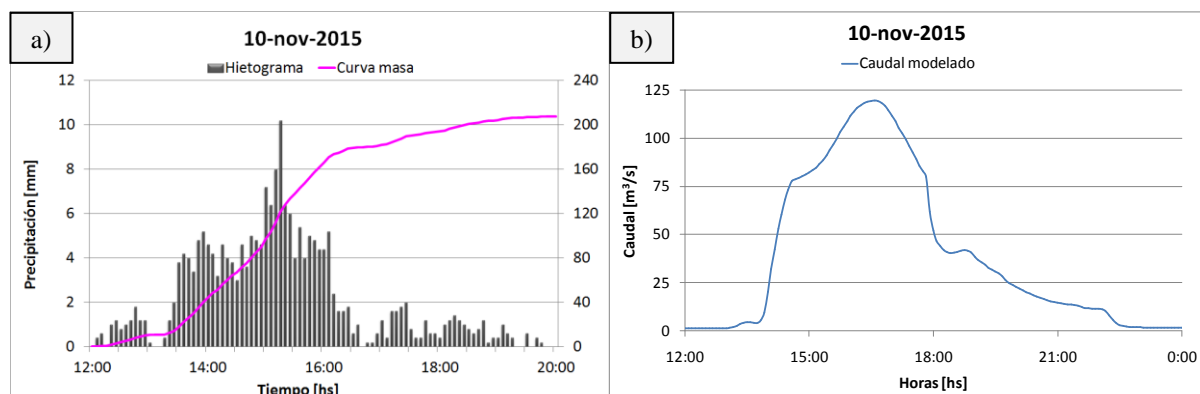


Figura 4.31.a. Hietograma y curva masa 10-nov-2015. b. Hidrograma modelado 10-nov-2015.

Una vez terminada la tormenta se llevó a cabo un relevamiento donde se logró registrar y referenciar los niveles máximos alcanzado en 10 puntos dentro de la cuenca (Figura 4.32).

Posteriormente, con la modelación del evento se logró la comparación de los niveles máximos los cuales se detallan en la Tabla 4.6.



Figura 4.32. Puntos de control de niveles máximos durante la tormenta del 10-nov-2015.

Tabla 4.6. Comparación de niveles máximos registrado y modelados 10-nov-2015.

Punto	Detalle de ubicación	Niveles máximos			Observación
		Observado	Modelado	Diferencia	
		[m]	[m]	[%]	
1	Ruta Nacional 14	1.95	2.35	20.5	Vivienda ubicada en la ribera del arroyo
2	Calle Puerto Madrin	2.05	2.38	16.1	Vivienda ubicada en la ribera del arroyo
3	Avenida de las Américas 1	3.54	3.23	-8.8	Puente lateral aguas arriba
4	Avenida de las Américas 2	2.65	2.29	-13.6	Finalización de la canalización
5	Calle Alfredo Palacios	2.50	3.09	23.6	Vivienda aguas arriba
6	Calle Sargento Cabral	2.00	2.29	14.5	Vivienda ubicada en la ribera del arroyo
7	Avenida Sarmiento	0.65	0.49	-24.6	Sobre cuneta Norte
8	Calle Gobernador Barreiro	2.15	1.53	-28.8	Vivienda aguas arriba
9	Calle Noruega	2.46	2.72	10.6	Finalización de la canalización
10	Avenida Finlandia	1.65	1.80	9.1	Finalización de la canalización

En la tabla anterior podemos ver la diferencia entre los niveles observados y modelados se encuentran en un rango de entre -28.8% y 23.6% con un promedio en valores absolutos de 17.0%.

#### 4.2.3.6. Parámetros resultantes de la calibración y validación

A partir de los resultados de los 15 eventos pluviográficos modelados en el proceso de calibración y validación, se logró una aceptable reproducción de los niveles de agua, tanto en la sección de control de la cuenca, como en los puntos interiores evaluados, lo que permite inferir que la modelación representa adecuadamente los procesos hidrológico-hidráulicos

dentro de la cuenca Mbotaby. Los parámetros finalmente resultantes del proceso de calibración y validación se presentan en las Tablas 4.7 a 4.9.

**Tabla 4.7.** Zonificación, área impermeable y CN ajustados.

Zonificación	Superficie Impermeable [%]	Superficie impermeable directamente conectada [%] <sup>(*)</sup>	CN I	CN II	CN III
<i>Distrito central</i>	85	90	48	76	87
<i>Residencial de densidad alta</i>	65	70	48	76	87
<i>Residencial de densidad media</i>	45	50	48	76	87
<i>Residencial de densidad baja</i>	25	30	48	76	87
<i>Loteos nuevos y zonas de intrusión</i>	5	10	48	76	87
<i>Viviendas sociales</i>	45	50	48	76	87
<i>Industrias</i>	25	30	48	76	87
<i>Parques y canchas</i>	2,5	50	42	71	84
<i>Plazoletas</i>	20	50	42	71	84
<i>Reservas ecológicas</i>	0	0	38	67	82
<i>Rutas asfaltadas</i>	45	50	48	76	87
<i>Ruta de tierra</i>	25	30	43	72	85

(\*) Expresado en porcentaje respecto del total de superficies impermeables.

**Tabla 4.8.** Volúmenes de almacenamiento superficial ajustados [mm].

Superficies	Humedad antecedente		
	I	II	III
<i>Permeable</i>	9	6	5
<i>Impermeable</i>	2	2	2

**Tabla 4.9.** Coeficiente de Manning utilizados en las distintas superficies de escurrimiento.

Subcuencas	Áreas permeable	0.100	Calles de tierra	Calzada	0.040
	Áreas impermeable	0.018		Cuneta	0.030
<i>Calles de pavimento flexible</i>	Calzada	0.020	<i>Conductos de hormigón</i>	Veredas	0.050
	Cuneta	0.018		0.015	
	Veredas	0.025	<i>Zanjas de tierra</i>	Lecho	0.030
	Calzada	0.025		Valle	0.100
<i>Calles de empedrado tipo brasilero</i>	Cuneta	0.018	<i>Arroyos</i>	Lecho	0.030
	Veredas	0.025		Valle	0.075

#### 4.2.3.7. Indicadores de bondad de ajuste a partir de caudales observados y simulados

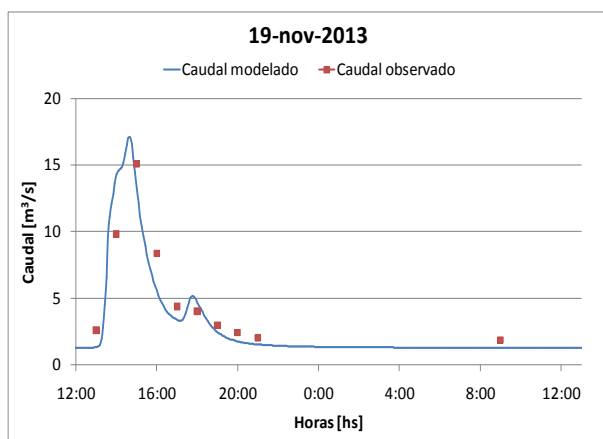
Durante los procesos de calibración inicial y calibración-validación se utilizó la comparación entre niveles observados y simulados para evaluar la bondad de ajuste, dado que fueron los niveles los parámetros efectivamente registrados de manera directa, y la utilización de caudales inferidos a partir de niveles observados llevaría implícito errores derivados del ajuste de la curva  $Q(h)$ , sobre todo para grandes caudales los cuales no han podido ser medidos dadas las condiciones adversas en el punto de control.

Sin embargo, el caudal como parámetro de flujo se presenta con una mayor consistencia que el tirante, dado que este último depende de factores geométricos (como el perfil transversal y la pendiente longitudinal) e hidráulicos (como ser la rugosidad), de la sección de control, que

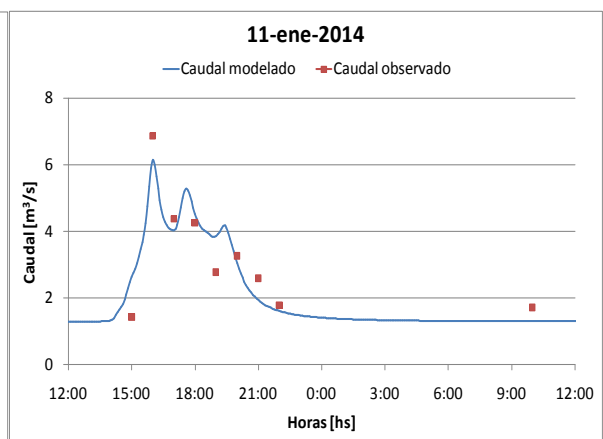
pueden sufrir variaciones en el tiempo por marcados procesos de erosión, particularmente en cursos naturales susceptibles de ser erosionados como los de la cuenca en estudio.

En caso de que alguno de estos factores varíe con el tiempo, un mismo nivel de agua puede corresponder a distintos valores de caudal, por lo que la evolución de los parámetros de ajuste mediante la comparación de caudales simulados y aquellos inferidos a través de los registros de niveles presenta significativa relevancia.

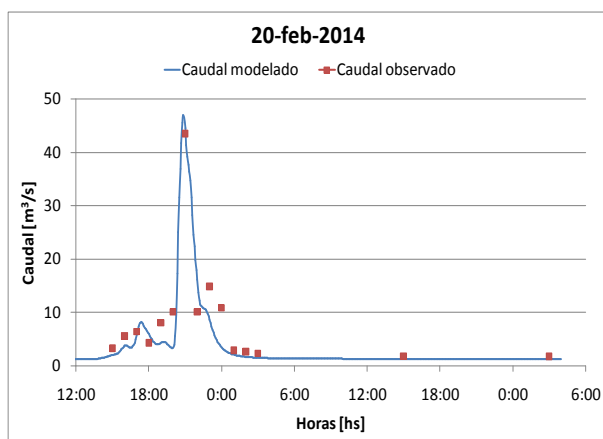
A continuación se presenta en las Figuras 4.33 a 4.42 una comparación de los hidrogramas simulados con aquellos observados para las tormentas utilizadas en los procesos calibración-validación. Posteriormente, en la Tabla 4.10 se presentan los valores de bondad de ajuste determinados a partir de la comparación de caudales.



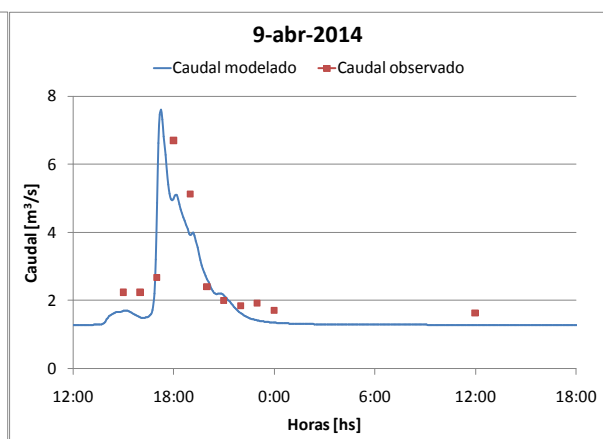
**Figura 4.33.** Hidrograma registrado y modelado 19-nov-2013.



**Figura 4.34.** Hidrograma registrado y modelado 11-ene-2014.



**Figura 4.35.** Hidrograma registrado y modelado 20-feb-2014.



**Figura 4.36.** Hidrograma registrado y modelado 9-abr-2014.

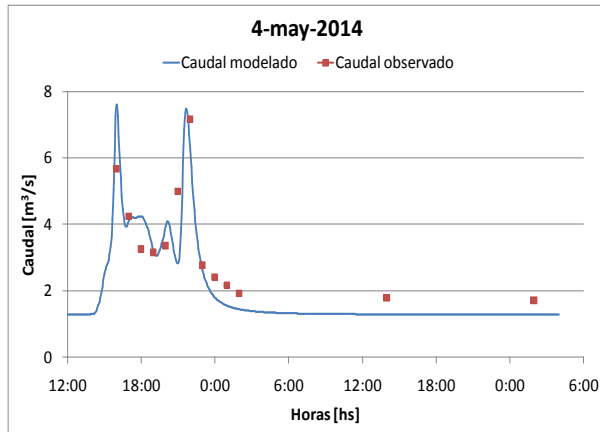


Figura 4.37. Hidrograma registrado y modelado 4-may-2014.

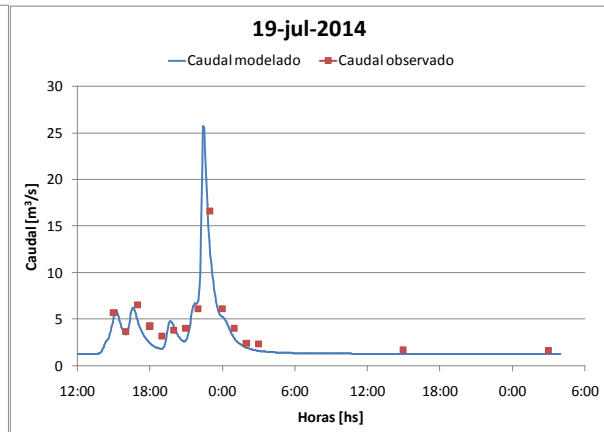


Figura 4.38. Hidrograma registrado y modelado 19-jul-2014.

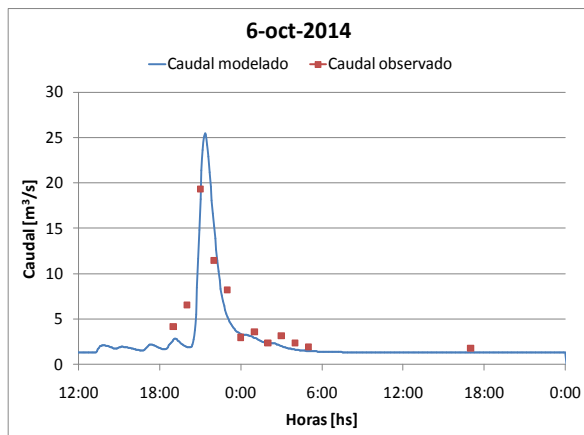


Figura 4.39. Hidrograma registrado y modelado 6-oct-2014.

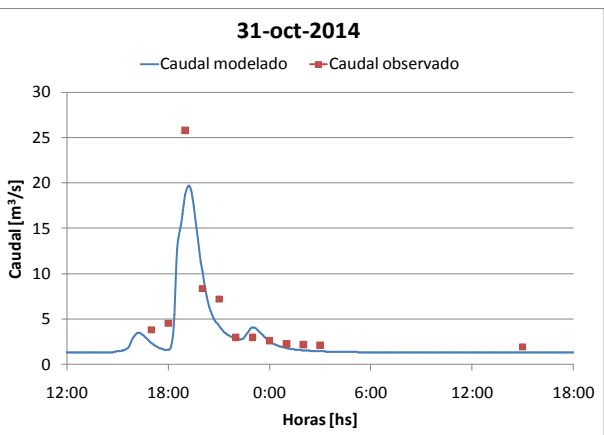


Figura 4.40. Hidrograma registrado y modelado 31-oct-2014.

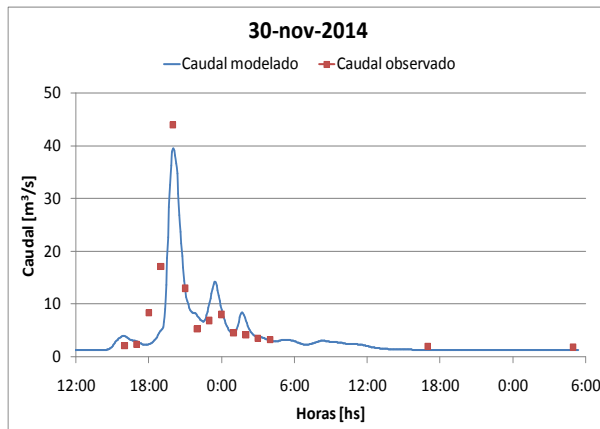


Figura 4.41. Hidrograma registrado y modelado 30-nov-2014.

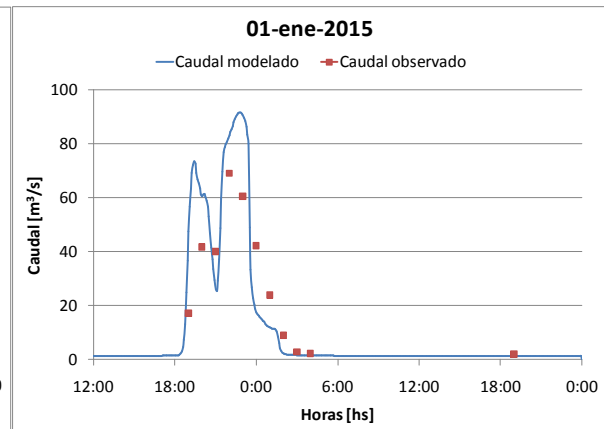


Figura 4.42. Hidrograma registrado y modelado 1-ene-2015.

Tabla 4.10. Bondad de ajuste por caudales.

$R^2$	[adm]	0.83	0.82	0.90	0.61	0.69	<b>0.91</b>	0.87	0.91	0.86	0.71
NSE	[adm]	0.78	0.82	<b>0.86</b>	0.58	0.56	0.79	0.82	0.84	0.85	0.63
PBIAS	[%]	6.4	<b>-1.8</b>	17.0	9.2	3.7	19.3	13.3	20.5	8.7	-11.2
RSR	[adm]	0.47	0.43	<b>0.37</b>	0.65	0.66	0.46	0.42	0.39	0.39	0.82

En la Tabla 4.10 observamos que, respecto a los indicadores determinados mediante los caudales inferidos a través de los niveles observados, el  $R^2$  presenta valor mínimo de 0.61 y

máximo de 0.91, con un valor promedio de 0.81. Como tendencia general, puede observarse que para hidrogramas con caudales altos el ajuste por caudales es menor que el ajuste por niveles, mientras que para bajos caudales la tendencia se revierte. Los valores medios de los indicadores se presentan similares a aquellos determinados a través de niveles únicamente.

Los hidrogramas presentados precedentemente, junto a los indicadores de bondad de ajuste por caudales robustecen la conjetura de un buen ajuste del modelo.

### **4.3. Implementación de los modelos de producción de sedimentos**

#### **4.3.1. Análisis de muestras de agua**

Durante los eventos pluviográficos utilizados para la calibración del modelo hidrológico-hidráulico, se alcanzó el registro temporal de los niveles en el punto de control de la cuenca, lo que permitió reproducir los hidrográmas de respuesta de la cuenca.

Además de efectuar el registro de los niveles, simultáneamente se realizó la toma de muestras de agua, lo cual permitió determinar la variación del TSD en el seno de la corriente hídrica de descarga de la cuenca a lo largo del desarrollo de las tormentas (Figura 4.43.a).

Los registros de niveles y tomas de muestra se realizaron inicialmente con intervalos de 1 hora, y una vez finalizo el escurrimiento por exceso de precipitación, cada 12hs aproximadamente. Esta metodología se utilizó debido a dos factores: (i) dada la imposibilidad de acceder al punto de control de la cuenca durante la noche; (ii) debido a que una vez restituido el flujo base en el arroyo, el mismo evidenciaba un alto contenido de TSD.

Para realiza el análisis de las muestra de agua se recurrió a una metodología ampliamente utilizada por el Laboratorio de Hidráulica y el CURIHAM de la FCEIyA-UNR. La misma consta en determinar la cantidad de TSD mediante el secado en horno de las muestras de agua, según el procediendo detallado a continuación:

1. Por cada muestra de agua se debe pesar, en un balanza de precisión, tres recipientes resistentes al calor, limpios y numerados, de aproximadamente 300ml de capacidad.
2. De las muestras de agua originales, las cuales poseen un volumen aproximado de 1 litro, se separan tres submuestras de aproximadamente 150ml, en los recipientes citados anteriormente.
3. Se pesan las submuestras obteniendo el valor corresponde a la suma de peso del recipiente, el agua propiamente dicha y el total de material solido (Figura 4.43.b).

4. Se produce el secado de la muestra en horno a 180°C, durante 24h.
5. Una vez enfriada la muestra se la pesa obteniendo el peso del recipiente más el total de sólidos (Figura 4.43c).
6. El TSD de cada submuestra se determina en función a la Ecuación 4.7 según:

$$TSD = \frac{Ps - Pr}{Ptotal - Pr} 1.000.000 [ppm] \quad (4.7)$$

7. Finalmente es necesario realizar un análisis estadístico de manera de descartar aquellas submuestras que posean valores atípicos. El TSD de la muestra resultara del promedio de los valores de sus respectivas submuestras.

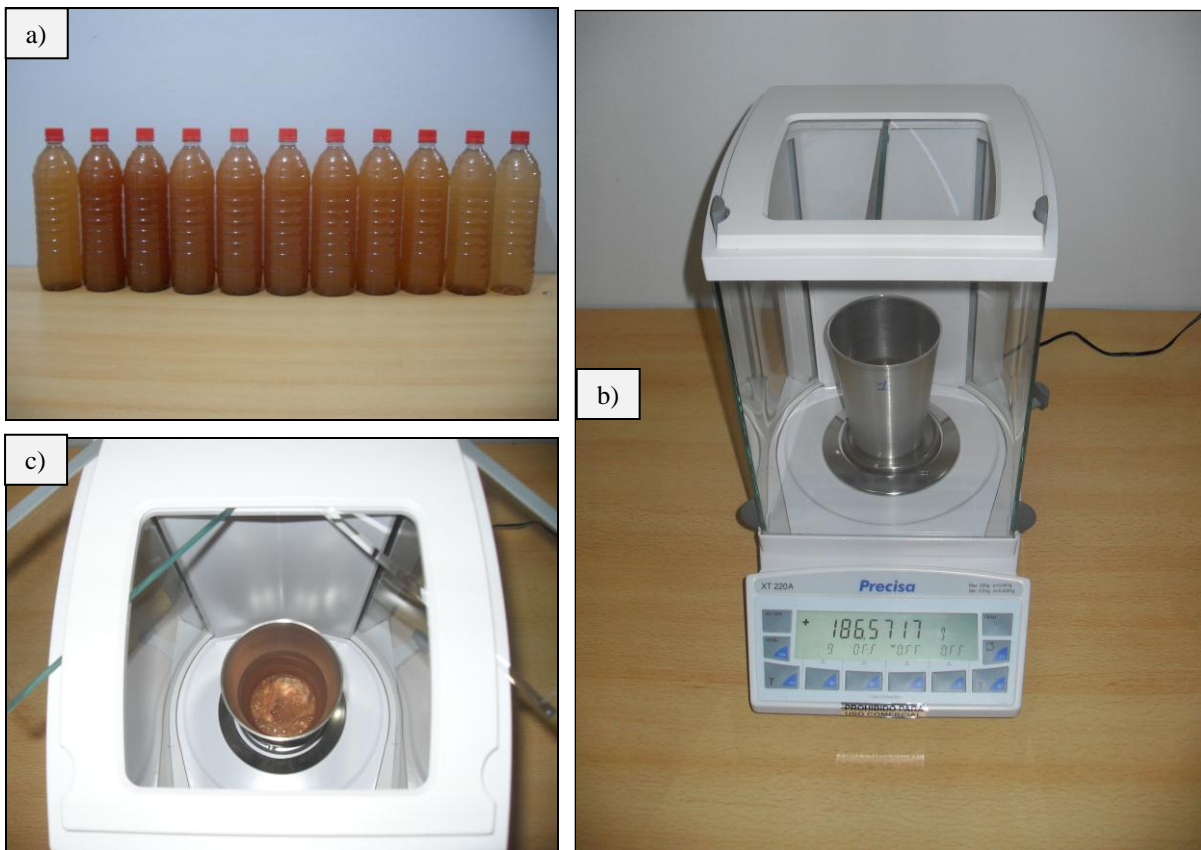


Figura 4.43.a. Muestras de agua recogidas durante la tormenta del 19-nov-2013. b. Submuestra de agua en balanza de precisión. c. Submuestra ya secada.

En la Tabla 4.11 se presenta un ejemplo de cálculo del TSD para una muestra de agua.

Tabla 4.11. Ejemplo de cálculo TSD. Muestra N°1 del 19-nov-2013.

Muestra	Submuestra	Pr	Ptotal	Ps	Ptotal-Pr	Ps-Pr	Concentración
		[gr]	[gr]	[gr]	[gr]	[gr]	[ppm o mg/l]
1	"1-1"	43,8121	184,0741	43,8427	140,2620	0,0306	218
	"1-2"	41,0512	190,4354	41,0772	149,3842	0,0260	174
	"1-3"	39,9740	185,8181	39,9976	145,8441	0,0236	162

### 4.3.2. Producción anual de sedimentos

Para la estimación de la producción anual de sedimentos en la cuenca del arroyo Mbotaby se utilizó la ecuación de la USLE, la cual fue detallada en el Capítulo 2. Si bien no se ha alcanzado un registro anual completo de la descarga de sedimentos en la cuenca, que nos permita validar el cálculo de producción de sedimentos mediante este algoritmo, dicha estimación nos da un rango aproximado del volumen de sedimentos esperable de ser generado por la cuenca.

#### 4.3.2.1. Pérdida de suelo por erosión hídrica

Para estimar la producción anual de sedimentos en las áreas permeables de la cuenca Mbotay se debe discretizar las diferentes zonas de producción en función a los usos y ocupaciones del suelo.

De los parámetros de la USLE, los primeros tres pueden suponerse constantes asumiendo una distribución de precipitaciones, suelos superficiales y pendiente media uniforme en toda la cuenca:

#### Factor R

Según la Ecuación 2.44 desarrollada por Arnoldus (1978), citado por Basile et al. (2008a), para ciudad de Oberá, utilizando los datos de precipitación mensual de la Figura 3.3, obtenemos un valor de  $R=617$  [ton pié pulgada)/(acre h)], con  $P_{MA}=1925$  mm y  $IFM=171$  mm.

Mientras que utilizando la Ecuación 2.53 de Rufino et al. (1993) resulta  $R=8318$  [(MJ mm)/(ha h)].

Finalmente, de las tres localidades de la provincia de Misiones con valores de  $R$  disponibles en el software para pronosticar la erosión hídrica desarrollado por Gvozdenaovich et al. (2015), la ciudad de Cerro Azul se presenta como la más cercana a Oberá y con características geográficas más similares. Dicha localidad presenta un  $R=12010$  [(MJ mm)/(ha h)] (Tabla 2.10).

En la Tabla 4.12 se presentan los valores de  $R$  determinados por los tres métodos presentados anteriormente, en unidades del sistema internacional e inglés

**Tabla 4.12.** Valores  $R$  para Oberá según los distintos autores analizados.

Autor	Sistema Ingles	Sistema Internacional
	[ton pié pulgada)/(acre h)]	[(MJ mm)/(Ha h)]
Arnoldus	617	10501
Rufino et al.	489	8318
Gvozdenaovich et al.	706	12010

### **Factor K**

Según datos extraídos de numerosos ensayos de suelo limo-arcilloso de la región realizados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FI-UNaM, podemos clasificar al suelo superficial de la cuenca con: *SAN*: 9%, *SIL*: 39%, *CLA*: 52%, *Cl*: 2% y *SNL*: 0.91.

El factor K puede ser determinado mediante la Ecuación 2.21 (Wischmeier y Smith, 1978). Resultando:  $T1=0.46$ ,  $T2=0.78$ ,  $T3=0.88$ ,  $T4=1.00$  y  $K=0,315$  [(ton acre h)/(acre ton pie pulg)] ó  $0.041$  [(ton ha h)/(MJ mm ha)].

Según la Ecuación 2.47 propuesta por Chaves (1996)  $K=0.048$  [(ton ha h)/(MJ mm ha)]

### **Factor L**

Como se detalló en el Capítulo 2, el valor de  $l$  en la Ecuación 2.23 representa la longitud promedio de la zona donde se desarrolla el flujo sobre el terreno en la subcuenca y en cuencas rurales se define como la inversa de la densidad de drenaje dividido 2.

Sin embargo, en cuencas urbanas dicho valor representa la longitud de escurrimiento superficial en las distintas áreas permeables, y puede variar significativamente dependiendo de las dimensiones de lote y la ocupación y uso del suelo en cada uno de ellos.

Para los usos residenciales y las rutas se adoptaron valores fijos de  $l$ , los cuales representan el valor medio esperable de las superficies permeables, en tanto que para las demás zonificaciones  $l$  está representado por: (i) el ancho de la subcuenca dividido 2 si las áreas permeables descargan sus aguas hacia un cauce central o (ii) dividido 4 si las mismas vierten sus aguas hacia los costados. En la Tabla 4.13 se presentan los valores de  $l$  y  $L$  para cada zonificación.

### **Factor S**

Dado que la pendiente de la cuenca se supuso uniforme en toda la cuenca para el modelo hidrológico-hidráulico e igual a 5.5%, de la Ecuación 2.24 obtenemos un valor de  $S=0.51$ .

### **Factor C y P**

Para la cuenca Mbotaby se discretizaron los valores de  $C$  y  $P$  para cada zonificación en función de la ocupación y los usos del suelo, según los valores recomendados en las Tablas 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6. Los valores adaptados para cada zonificación se presentan en la Tabla 4.13.

**Tabla 4.13.** Factores C, P, l y L para los distintos usos del suelo y toda la cuenca.

Zonificación	Área	Área	Sup. Imp.	C	P	l	L
	[ha]	[% respecto del total]	[%]	[adm]	[adm]	[m]	[adm]
Distrito central	34.4	3.5	85.0	0.060	0.60	5.0	0.48
Residencial alta	68.5	7.0	65.0	0.055	0.65	10.0	0.67
Residencial media	90.4	9.3	45.0	0.050	0.70	15.0	0.82
Residencial baja	221.6	22.7	25.0	0.045	0.75	20.0	0.95
Lotes nuevos e intrusión	248.0	25.4	5.0	0.040	0.80	25.0	1.06
Viviendas sociales	50.4	5.2	45.0	0.050	0.70	15.0	0.82
Industrias	41.6	4.3	25.0	0.050	0.65	30.6 <sup>(*)</sup>	1.15 <sup>(*)</sup>
Plazoletas	15.2	1.6	20.0	0.060	0.75	25.0 <sup>(*)</sup>	1.06 <sup>(*)</sup>
Parques y canchas	41.1	4.2	2.5	0.060	0.65	27.4 <sup>(*)</sup>	1.10 <sup>(*)</sup>
Reservas ecológicas	130.7	13.4	0.0	0.020	0.95	61.5 <sup>(*)</sup>	1.64 <sup>(*)</sup>
Rutas asfaltadas	28.8	3.0	45.0	0.040	0.65	25.0 <sup>(*)</sup>	1.06 <sup>(*)</sup>
Ruta de tierra	6.1	0.6	25.0	0.040	0.75	25.0 <sup>(*)</sup>	1.06 <sup>(*)</sup>
<b>Superficie total</b>	<b>976.7</b>	<b>100.0</b>	<b>23.9<sup>(*)</sup></b>	<b>0.062<sup>(*)</sup></b>	<b>0.76<sup>(*)</sup></b>	<b>25.9<sup>(*)</sup></b>	<b>1.04<sup>(*)</sup></b>

<sup>(\*)</sup>Valores resultantes del promedio ponderado

### Producción de sedimentos

Adoptando un valor de  $R=12010[(MJ\ mm)/(ha\ h)]$  y  $K=0.048 [(ton\ ha\ h)/(MJ\ mm\ ha)]$  obtenemos la máxima pérdida de suelo por erosión hídrica. Los valores de pérdida según los usos de suelo se presentan en la Tabla 4.14.

**Tabla 4.14.** Máxima pérdida de suelo por erosión hídrica para distintos usos de suelo en la cuenca Mbotaby.

Zonificación	EH en áreas permeable		EH total			
	[T/km <sup>2</sup> ]	[T/ha]	[T/km <sup>2</sup> ]	[T/ha]	[T]	[%]
Distrito central	507.0	5.1	76.1	0.8	26.1	0.3
Residencial alta	712.1	7.1	249.2	2.5	170.6	2.3
Residencial media	853.8	8.5	469.6	4.7	424.3	5.6
Residencial baja	950.7	9.5	713.0	7.1	1579.9	20.8
Lotes nuevos e intrusión	1007.8	10.1	957.4	9.6	2374.7	31.3
Viviendas sociales	853.8	8.5	469.6	4.7	236.7	3.1
Industrias	1109.3	11.1	832.0	8.3	436.6	5.8
Plazoletas	1417.2	14.2	1133.7	11.3	172.1	2.3
Parques y canchas	1274.3	12.7	1242.4	12.4	576.0	7.6
Reservas ecológicas	923.9	9.2	922.5	9.2	1389.3	18.3
Rutas asfaltadas	944.8	9.4	520.6	5.2	150.3	2.0
Ruta de tierra	944.8	9.4	708.6	7.1	43.4	0.6
<b>Superficie total</b>	<b>942.7</b>	<b>9.4</b>	<b>741.3</b>	<b>7.4</b>	<b>7580.1</b>	<b>100.0</b>

Si, en cambio adoptamos un valor de  $R=8318 [(MJ\ mm)/(ha\ h)]$  y  $K=0.041 [(ton\ ha\ h)/(MJ\ mm\ ha)]$  obtenemos la mínima pérdida de suelo por erosión hídrica, la cual es de 4484T, con 4.6T/ha y 6.0T/ha de área permeable.

#### 4.3.2.2. Descarga específica

La Erosión Hídrica (*EH*) debe ser afectada por la Relación de Erogación de Sedimentos (*RES*) según las Ecuaciones 2.25. Cabe recordar aquí que, para la cuenca Mbotaby el área de la misma asciende a 976.7ha, con una pendiente media del cauce principal del 2%.

La Tabla 4.15 presenta el volumen total anual de sedimentos esperable de ser erogado por la cuenca en función a las distintas teorías evaluadas en el apartado 2.2.2.1.

**Tabla 4.15.** Relaciones de erogación de sedimentos por autores y descargas específicas resultantes.

Teorías	RES	Mínimo ( <i>EH=4484T</i> )			Máximo ( <i>EH=7580T</i> )		
	[adm]	[T]	[T/ha]	[T/ha permeable]	[T]	[T/ha]	[T/ha permeable]
Vanonni	0.353	1585	1.62	2.14	2679	2.74	3.61
US-DA	0.441	1975	2.02	2.66	3339	3.42	4.50
Williams y Berndt	0.829	3717	3.81	5.01	6284	6.44	8.47

En la Tabla 4.15 observamos que, considerando todas las teorías de los diversos autores analizados para los distintos factores intervinientes en la USLE y la relación de erogación de sedimentos, el total de sedimentos erogados por la cuenca Mbotaby se encuentran en un rango de entre 1585 y 6284 toneladas anuales. Mientras que los rangos para producción de sedimentos por unidad de área resultante fueron de entre 1.62 y 6.44[T/ha] para el área total y entre 2.14 y 8.47[T/ha] considerando únicamente las áreas permeables.

#### 4.3.3. Producción de sedimentos por eventos

Para la determinación de la producción de sedimentos por eventos se utilizó la ecuación de la MUSLE, la cual utiliza los mismos factores de erosión superficial que la USLE, con la salvedad que reemplaza la erosividad de la lluvia *R* por una fórmula que relaciona el caudal máximo y el volumen de escurriendo directo total que genera el evento analizado.

La practicidad de la MUSLE recabe en la posibilidad de ajustar sus parámetros de producción de sedimentos utilizando mediciones hidrosedimentológicas de eventos aislados. Además, la cantidad de sedimentos estimada por la misma no requiere ser afectado por la relación de descarga específica.

Similar a la metodología implementada con la USLE, se procedió a determinar para cada evento analizado, el aporte individual de las 976 subcuencas, cada una de ellas caracterizada por sus factores de producción de sedimentos en función a la zonificación que pertenecen.

Previamente, para determinar el caudal máximo y el volumen de escurrimiento directo de cada subcuenca, en cada evento analizado, se utilizaron los modelos hidrológicos-hidráulicos ya calibrados, según la humedad antecedente.

Utilizando los eventos pluviográficos disponibles para calibrar los modelos hidrológicos-hidráulicos, de los cuales se contaba con el registro de limnigramas y toma de muestras de agua simultáneamente, se logró reconstituir los hidrogramas de escurrimiento y los polutogramas de TSD en el punto de control de la cuenca para un total de 10 eventos.

Cabe señalar que para evaluar la calidad del ajuste del modelo no se optó por la clásica metodología de particionar la muestra total de eventos en un subgrupo para calibrar y otro para validar. Si bien no se cumple taxativamente con la rigurosidad estadística que otorga un método de calibración-validación, se entendió que dada la poca cantidad de tormentas registradas en esta etapa de investigación (que comprendió un año hidrológico), se consideró más adecuado documentar los resultados de la utilización de todos los eventos para la calibración de los parámetros sin considerar eventos sometidos a la validación. En este marco se atribuyó la bondad del ajuste del modelo a los resultados obtenidos en el proceso de calibración.

Es necesario aclarar que, si bien 10 tormentas pueden resultar escasas para un proceso de calibración-validación, la medición en campo de cada uno de los eventos implicó un verdadero desafío para el equipo de trabajo del autor, dado que las mismas presentan como una metodología innovadora en la región, desarrolladas generalmente bajo situaciones ambientales adversas. Se espera en el próximo año de campañas de trabajo de campo, realizar mediciones en un grupo equivalente de eventos (alrededor de 10) para la correspondiente validación.

Para cada tormenta, la integración del polutograma y el hidrograma de escurrimiento permitió determinar el volumen total de sólidos erogados por la cuenca, el cual pudo ser comparado con el volumen de sólidos determinados mediante la implementación de la MUSLE en conjunto con los modelos hidrológicos-hidráulicos.

Para el análisis de erosión por esta metodología no se tuvo en cuenta la erosión fluvial, ya que en los eventos analizados no se verificaron procesos erosivos significativos en las distintas vías de desagüe del escurrimiento superficial.

A continuación se presentan las Figuras 4.44 a 4.53, las cuales muestran los hidrogramas y polutogramas registrados en punto de control de la cuenca en los 10 eventos analizados.

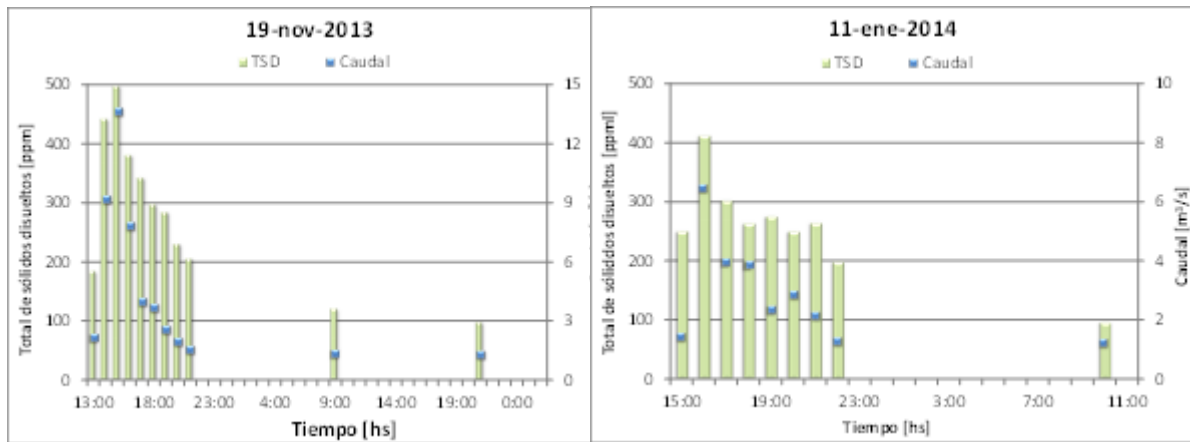


Figura 4.44. TSD y caudales observados 19-nov-2013. Figura 4.45. TSD y caudales observados 11-ene-2014.

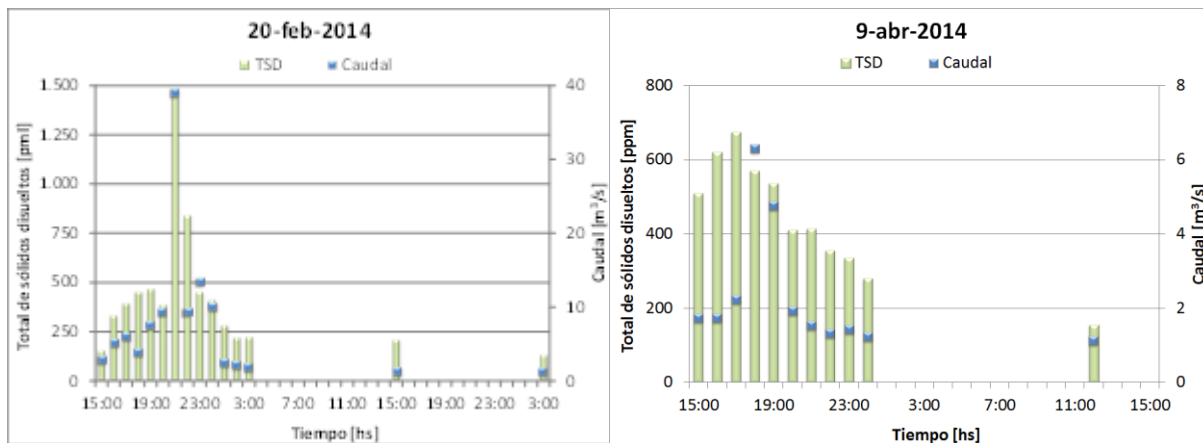


Figura 4.46. TSD y caudales observados 20-feb-2014. Figura 4.47. TSD y caudales observados 9-abr-2014.

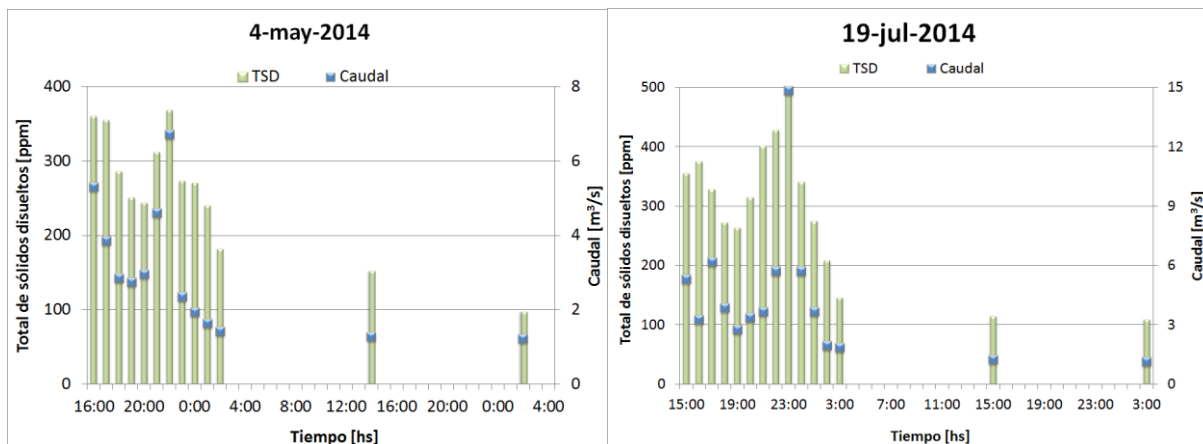


Figura 4.48. TSD y caudales observados 4-may-2014. Figura 4.49. TSD y caudales observados 19-jul-2014.

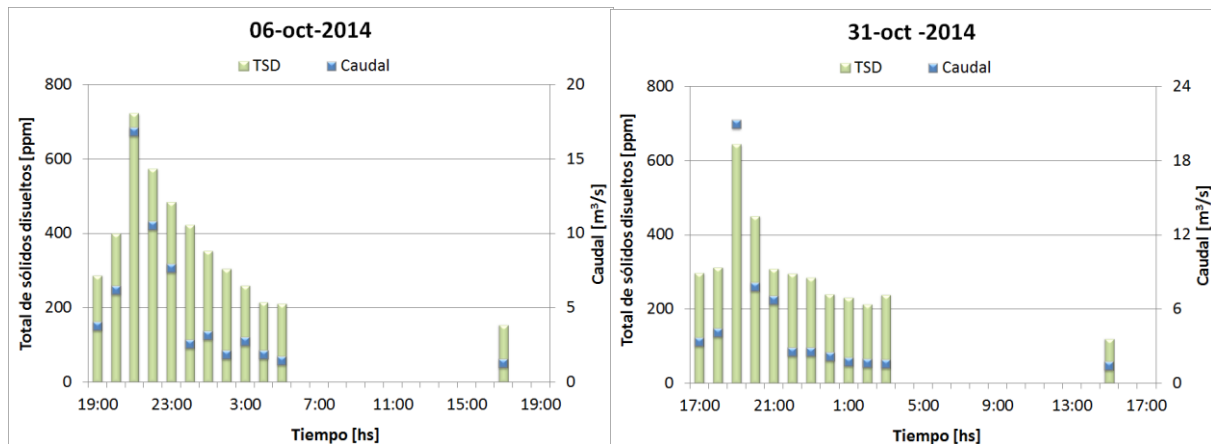


Figura 4.50. TSD y caudales observados 6-oct-2014. Figura 4.51. TSD y caudales observados 31-oct-2014.

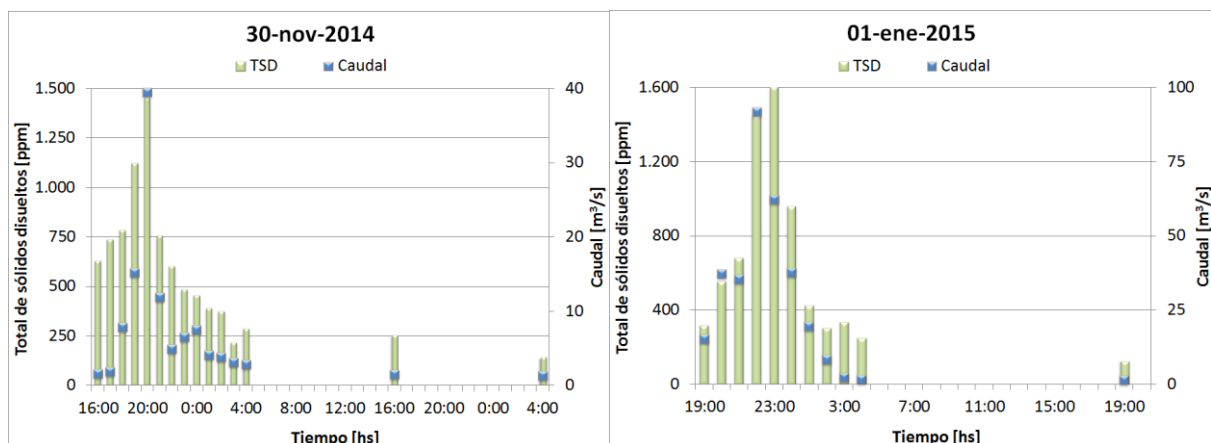


Figura 4.52. TSD y caudales observados 30-nov-2014. Figura 4.53. TSD y caudales observados 1-ene-2015.

#### 4.3.3.1. Ajuste de coeficientes MUSLE

Utilizando los 10 pares de valores (total de sólidos erogados observados y modelados), se ajustaron los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  de la MUSLE, de manera de maximizar el  $R^2$  como parámetro de bondad de ajuste. A su vez, se determinaron los valores de  $NSE$ ,  $PBIAS$  y  $RSR$  para compararlos con los rangos de valores recomendados por la bibliografía.

Finalmente, los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  que mejor representan la producción de sedimentos de los 10 eventos es de 12.4 y 0.50 respectivamente, arrojando un  $R^2$  de 0.84, mientras que los valores de  $NSE$ ,  $PBIAS$  y  $RSR$  resultaron 0.78, 32.38% y 0.47 respectivamente.

A continuación se presentará la Tabla 4.16 la cual exhibe un resumen de los resultados de la modelación hidrosedimentológica y los parámetros de ajuste de los 10 eventos.

**Tabla 4.16.** Resumen las modelaciones hidrosedimentológicas para los 10 eventos analizados.

Parámetros		Evento	19-nov-2013	11-ene-2014	20-feb-2014	09-abr-2014	04-may-2014	19-jul-2014	06-oct-2014	31-oct-2014	30-nov-2014	01-ene-2015	
Tormenta	Humedad antecedente	[adm]	II	II	II	I	II	II	II	III	I	III	
	Precipitación total	[mm]	44.4	31.6	77.4	41.4	38.6	58	53.8	41.8	127.0	160.0	
	Duración	[hs]	6	7	11	9	10	12	14	14	11.0	23.0	12.0
	Intensidad media	[mm/h]	7.4	4.5	7.0	4.6	3.9	4.8	3.8	3.8	3.8	5.5	13.3
Esc. superficial	Esc. Dir. Modelado(*)	[dm <sup>3</sup> ]	132	61	317	48	87	166	151	137	342	1.227	
	Esc. Dir. observado	[dm <sup>3</sup> ]	133	51	371	45	83	170	172	168	363	1.050	
	Diferencia	[%]	-0.5	19.8	-14.6	6.3	4.8	-2.9	-12.6	-18.3	-5.9	16.9	
	R <sup>2</sup>	[adm]	0.88	0.84	0.80	0.64	0.73	0.90	0.83	0.88	0.72	0.74	
Producción de sedimentos	Total sedimento MUSLE	[T]	83.9	36.5	180.7	39.2	57.0	137.7	123.8	117.1	309.9	908.2	
	Total sedimento observado	[T]	89.2	36.6	385.7	52.3	64.3	107.1	131.8	114.4	426.0	1128.8	
	Diferencia	%	-6.0	-0.2	-53.2	-25.0	-11.3	28.6	-6.1	2.4	-27.2	-19.5	

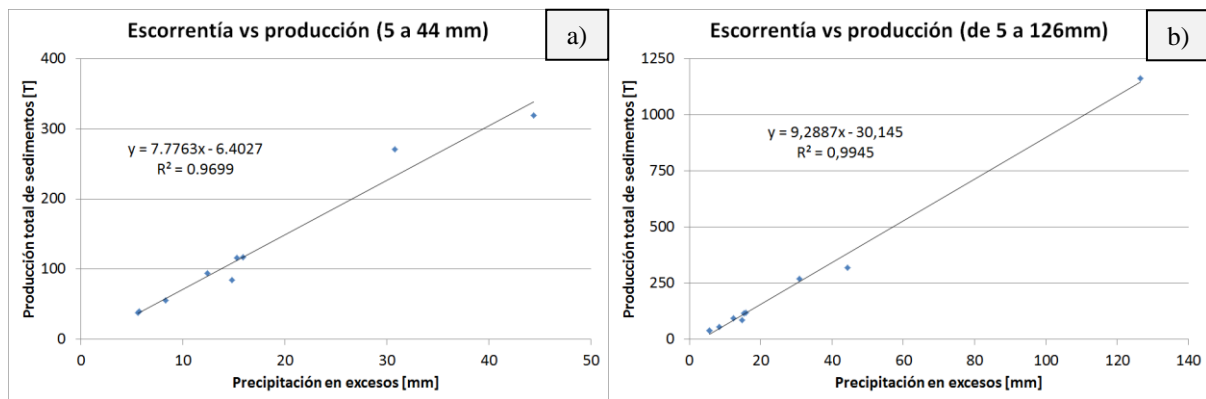
(\*) Volumen de escurrimiento directo arrojado por el modelo durante el mismo periodo de tiempo que las observaciones.

Respecto a la comparación de los volúmenes de sedimentos observados y modelados, la diferencia varía entre -53.2% y 28.6%, con un valor promedio de valores absolutos de 18.0%. En la Tabla 4.15 puede observarse cuales son los eventos con mejor ajuste, tanto en el modelo de escurrimiento superficial como en la MUSLE, los cuales no son coincidentes.

#### 4.3.3.2. Relación escorrentía vs producción total de sedimentos

A partir de los valores presentados en la Tabla 4.16 fue posible construir una relación gráfica entre la producción total de sedimentos por evento observada y la precipitación en exceso. En la Figura 4.54.a y b se exhiben, en el eje "x" la precipitación en exceso o escorrentía en milímetros registrada en los 10 eventos con registros de TSD, mientras que en el eje "y", se presenta el total de sedimentos erogado por la cuenca resultante de la integración de los polutogramas registrados e hidrogramas inferidos a través de los limnigramas registrados.

La Figura 4.54.a presenta el ploteo y la tendencia de la relación para eventos de 5 a 44mm de lluvia neta, la cual exhibe una buena densidad de puntos. Mientras que la Figura 4.54.b incorpora el evento extraordinario del 1-ene-2015 con 126mm de precipitación en exceso. En las citadas figuras puede observarse tendencia a relación lineal con R<sup>2</sup> cercano a la unidad, representando un muy buen ajuste.



**Figura 4.54.** Relación precipitación en exceso vs producción neta de sedimentos. **a.** Para eventos de 5 a 44 mm de lluvia neta. **b.** Para eventos de 5 a 126 mm de lluvia neta.

### 4.3.3.3. Extrapolación de producción a un año medio

Los eventos de los que se tienen registro de niveles y TSD alcanzan un total de 674mm precipitados y 2536T de sedimentos producidos. Si extrapolamos esta tendencia a un año medio con 1925mm, obtenemos un total de 7243T anuales de sedimento producido. Cabe destacar que esta proyección lleva implícita la hipótesis de que, durante todo lo que resta del año, las tormentas se presentan en igual cantidad, duración y lámina precipitada que aquellas durante el periodo medido,

Cabe enfatizar aquí que la extrapolación citada anteriormente presenta similitud con el valor máximo resultante de la implementación de la USLE (6284T), cuya diferencia es de 15%.

### 4.3.4. Producción de sedimentos mediante algoritmo de SWMM

#### 4.3.4.1. Metodología

El modelo de la calidad de agua que posee el SWMM fue utilizado para describir la dinámica, tanto de la generación sedimentos a nivel de subcuenca como el transporte de los mismos a través de la red de desagüe, hasta el punto de control de la cuenca Mbotaby.

Se utilizaron dos algoritmos de generación de sedimentos distinto. Uno para las áreas permeables, donde la disponibilidad de material puede suponerse infinita para un evento aislado, y otro para las áreas impermeables donde el material disponible para ser lavado es limitado y depende de las condiciones antecedentes.

#### 4.3.4.2. Resultados de la calibración

Nuevamente, la variable estadística utilizada para adoptar el conjunto de parámetros que mejor representa la real dinámica de la producción de sedimentos fue el  $R^2$ . Además, se

determinaron los valores de *NSE*, *PBIAS* y *RSR*, similar a lo actuado con el ajuste de la MUSLE.

A continuación se detallan los mecanismos de almacenamiento en superficies y lavado de sedimentos adoptados, como así también los rangos de valores evaluados y aquellos que mejor ajustaron, arrojando un valor máximo de  $R^2$ .

### Acumulación de contaminantes en áreas impermeables

Para la descripción de la acumulación de sedimento en áreas impermeables se utilizó, al igual que Mendez (2012), un modelo de acumulación exponencial según la Ecuación 2.45. En el mismo la acumulación sigue un crecimiento exponencial que se aproxima asintóticamente a un determinado valor máximo.

Para reproducir el fenómeno de acumulación se procedió a modelar, para cada evento registrado, un periodo de tiempo previo a la tormenta igual a la cantidad de días previos al evento sin lluvia, según los registros de precipitación los cuales se exhiben en la Tabla 4.17.

*Tabla 4.17. Días previos sin lluvia en los eventos modelados.*

<i>Evento</i>	<i>19-nov-2013</i>	<i>11-ene-2014</i>	<i>20-feb-2014</i>	<i>09-abr-2014</i>	<i>04-may-2014</i>	<i>19-jul-2014</i>	<i>06-oct-2014</i>	<i>31-oct-2014</i>	<i>30-nov-2014</i>	<i>01-ene-2015</i>
<i>Días previos sin lluvia</i>	3	4	5	9	4	4	4	0	23	0

Los valores que mejor ajustaron durante el proceso de calibración resultaron:

- Acumulación máxima posible  $C_1= 1200\text{kg/ha}$  (evaluado de 750 a 3000kg/ha)
- Constante de crecimiento  $C_2= 0.05\text{días}^{-1}$  (evaluado de 0.01 a 0.10días<sup>-1</sup>)

### Lavado de contaminantes en áreas impermeables

La carga de arrastre en áreas impermeables fue descrita por una función potencial según la Ecuación 2.48. Los valores que mejor ajustaron resultaron:

- Coeficiente de arrastre  $C_8=0.010$  (evaluado de 0.005 a 0.100)
- Exponente de arrastre  $C_9= 1.6$  (evaluado de 1.0 a 5.0)

### Lavado de contaminantes en áreas permeables

Para descripción del lavado y arrastre de sedimentos desde las áreas permeables se utilizó un modelo de curva de flujo de arrastre descrita por la Ecuación 2.49. Los valores que mejor ajustaron durante son:

- El coeficiente de arrastre  $C_{10}$  fue ajustado para cada zonificación siguiendo las relaciones de erogación de sedimentos de la MUSLE [kg/l], es decir que siempre que se modificó un coeficiente de arrastre de una zonificación dada, las demás cambiaron de modo que la relación entre las mismas se mantenga. La Tabla 4.18 presenta los valores resultantes de la calibración, con un rango de valores evaluado entre 100 y 5000kg/l. Valores experimentales, ya que la concentración de sólidos solo fue evaluada en el punto de control de la cuenta y representa la confluencia de las descargas de todas las subcuencas modeladas.
- Exponente de arrastre  $C_{11} = 1.14$  (evaluado de 1.00 a 5.00)

**Tabla 4.18.** Coeficiente  $C_{10}$  adaptados para los distintos usos del suelo.

Zonificación	CxPxL (MUSLE)	Relación respecto al mínimo	$C_{10}$ calibrados
Distrito central	0.017	1.00	360
Residencial de densidad alta	0.024	1.41	508
Residencial de densidad media	0.029	1.71	614
Residencial de densidad baja	0.032	1.88	678
Loteos nuevos y zonas de intrusión	0.034	2.00	720
Viviendas sociales	0.029	1.71	614
Industrias	0.037	2.18	784
Plazoletas	0.048	2.82	1016
Parques y canchas	0.043	2.53	911
Reservas ecológicas	0.031	1.82	656
Rutas asfaltadas	0.028	1.65	593
Ruta de tierra	0.032	1.88	678

Finalmente, el total de pares de datos evaluados (TSD registrados y modelados) asciende a 108, y el máximo valor de  $R^2$  resultante de la calibración fue de 0.56.

Del total de las 10 tormentas, 2 arrojaron calibraciones insatisfactorias. El evento del 9 de abril de 2014 arrojó un valor de  $R^2=0.39$ , mientras que el evento del 1-ene-2015 un valor de  $R^2=0.34$

Si considerando que estos 2 eventos no pudieron ser calibrados, los 88 pares de valores de las 8 tormentas restantes acusan un  $R^2=0.70$ , lo que representa un buen ajuste. Con la particularidad que los valores de los parámetros ajustados que presentan un mejor ajuste con o sin los eventos del 9-abr-2014 y el 1-ene-2015 son los mismos.

En las Figuras 4.55 a 4.64 se presentan los polutogramas de TSD en el punto de control establecido (ubicación de las reglas limnimétricas y toma de muestras) de los 10 eventos utilizados para la calibración de los modelos de calidad de agua.

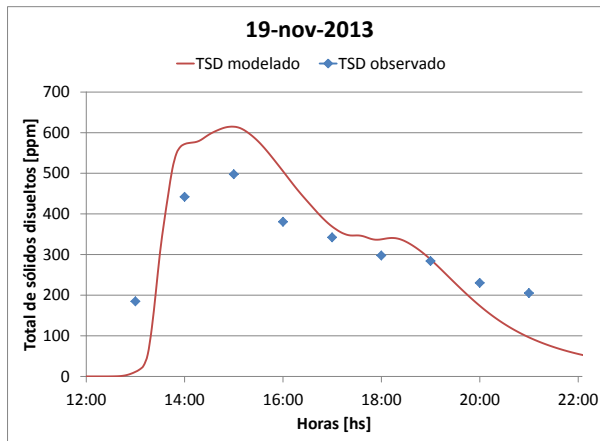


Figura 4.55. TSD observados y modelados 19-nov-2013

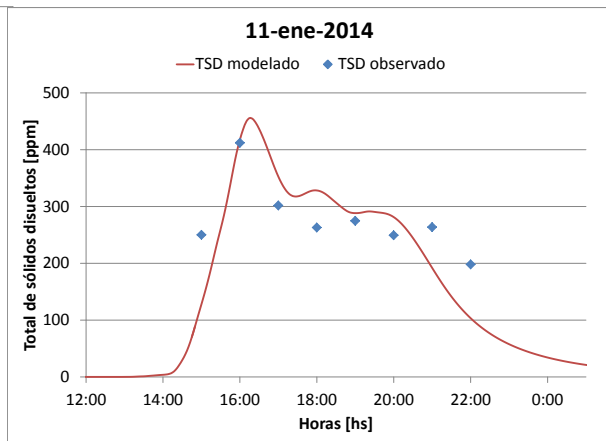


Figura 4.56. TSD observados y modelados 11-ene-2014.

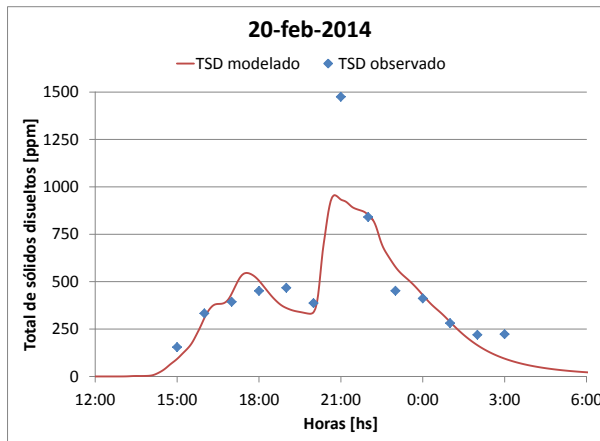


Figura 4.57. TSD observados y modelados 20-feb-2014.

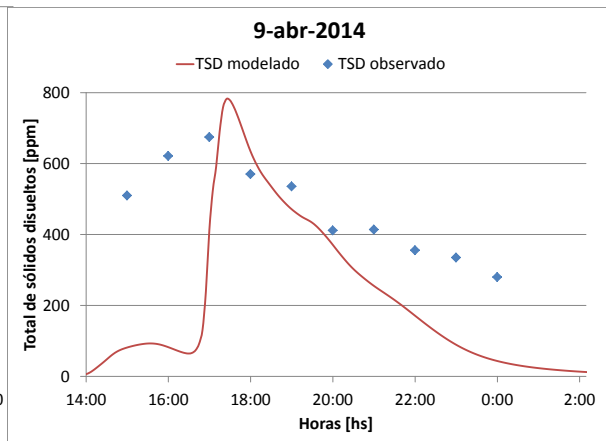


Figura 4.58. TSD observados y modelados 9-abr-2014.

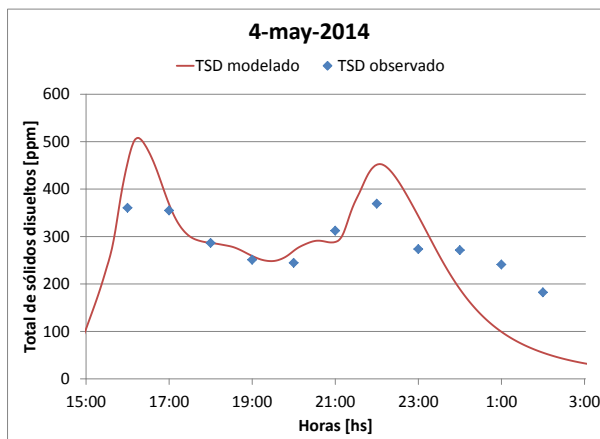


Figura 4.59. TSD observados y modelados 4-may-2014.

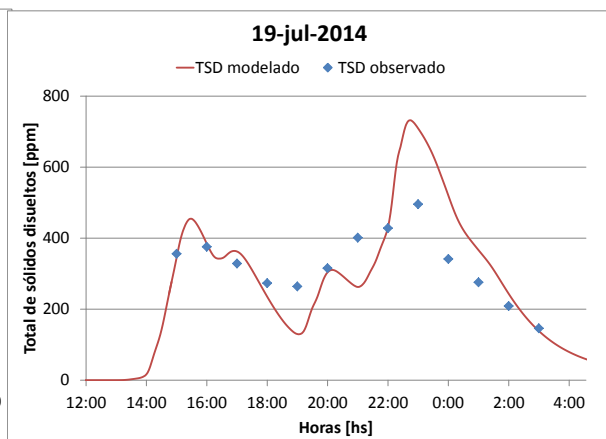


Figura 4.60. TSD observados y modelados 19-jul-2014.

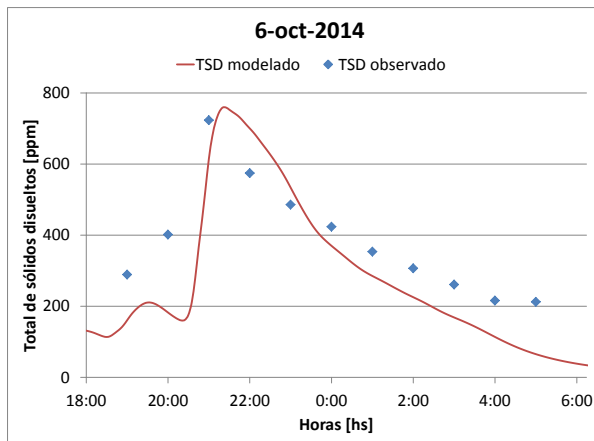


Figura 4.61. TSD observados y modelados 6-nov-2014.

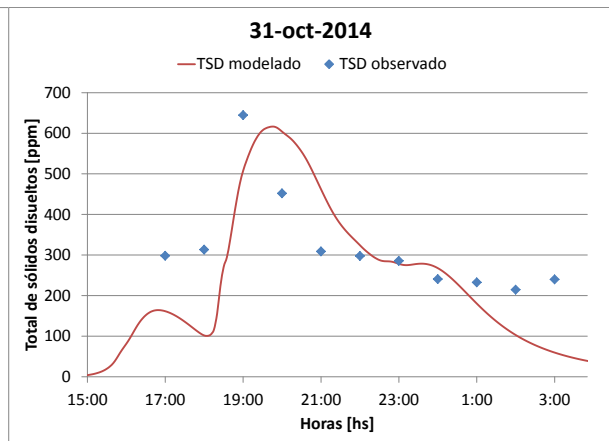


Figura 4.62. TSD observados y modelados 31-oct-2014.

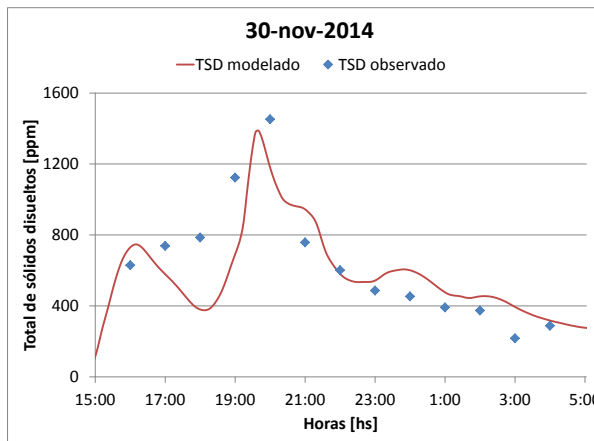


Figura 4.63. TSD observados y modelados 30-nov-2014.

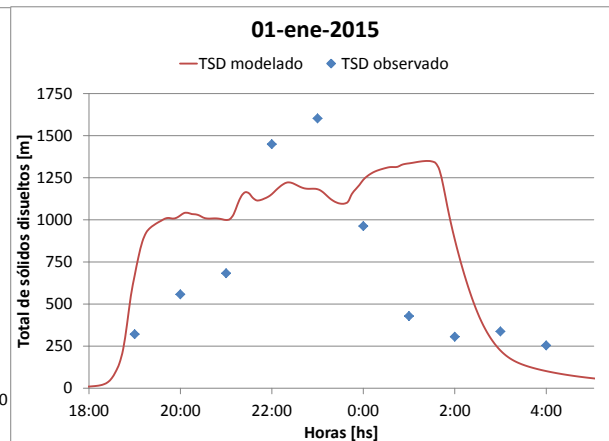


Figura 4.64. TSD observados y modelados 1-ene-2015.

En la Tabla 4.19 se presenta un resumen de los resultados de las modelaciones y una comparación con los registros realizados. En la misma podemos observar que de la comparación de los volúmenes de sedimentos observados y modelados, la diferencias varían entre -24.8% y 30.6%, con un valor promedio de valores absolutos de 20.9%. Además en la misma, están resaltadas aquellas variables de ajuste que mejor resultado arrojaron. Puede observarse como la tormenta con mayor valor de  $R^2$  para producción de sedimentos no coincide con aquella de mayor  $R^2$  para el modelo hidrológico-hidráulico, como así tampoco con el evento del 20-feb-2014 el cual presenta los valores más satisfactorios de  $NSE$ ,  $PBIAS$  y  $RSR$ .

Tabla 4.19. Resumen de las corridas utilizados para la calibración del modelo de calidad de agua del SWMM.

Parámetros		Evento	19-nov-2013	11-ene-2014	20-feb-2014	09-abr-2014	04-may-2014	19-jul-2014	06-oct-2014	31-oct-2014	30-nov-2014	01-ene-2015
Tormenta	Humedad antecedente	[adm]	II	II	II	I	II	II	II	III	I	III
	Precipitación total	[mm]	44.4	31.6	77.4	41.4	38.6	58	53.8	41.8	127.0	160.0
	Duración	[hs]	6	7	11	9	10	12	14	11.0	23.0	12.0
	Intensidad media	[mm/h]	7.4	4.5	7.0	4.6	3.9	4.8	3.8	3.8	5.5	13.3
Esc. superficial	Esc. Dir. Modelado <sup>(*)</sup>	[dm3]	132	61	317	48	87	166	151	137	342	1227
	Esc. Dir. observado	[dm3]	133	51	371	45	83	170	172	168	363	1050
	Diferencia	[%]	-0.5	19.8	-14.6	6.3	4.8	-2.9	-12.6	-18.3	-5.9	16.9
	R <sup>2</sup>	[adm]	0.88	0.84	0.80	0.64	0.73	0.90	0.83	0.88	0.72	0.74
Producción de sedimentos	Modelo <sup>(**)</sup>	[T]	94.0	37.5	270.6	39.8	55.2	117.2	116.3	84.2	318.9	1162.9
	Observado <sup>(**)</sup>	[T]	72.0	29.6	359.9	52.3	45.3	90.8	119.9	104.4	423.3	1108.1
	Diferencia	%	30.6	26.5	-24.8	-23.9	21.9	29.1	-2.9	-19.3	-24.7	4.9
	R <sup>2</sup>	[adm]	0.96	0.58	0.70	0.39	0.70	0.68	0.90	0.48	0.65	0.34
	NSE	[adm]	-1.06	-2.86	0.68	-3.77	-4.03	-0.97	0.50	-0.26	0.64	0.32
	PBIAS	[%]	-18.1	-23.0	2.4	43.3	-20.7	-24.2	7.4	5.3	3.4	-6.7
	RSR	[adm]	1.44	1.97	0.56	2.18	2.24	1.41	0.71	1.12	0.60	0.82

<sup>(\*)</sup> Volumen de escurrimiento directo arrojado por el modelo durante el mismo periodo de tiempo que las observaciones.

<sup>(\*\*)</sup> Total de sedimentos erogados por la cuenca durante el escurrimiento directo.

#### 4.3.4.3. Análisis de sensibilidad del modelo

Para evaluar la sensibilidad del modelo de producción de sedimentos implementado en el SWMM se procedió a realizar la modelación de los 10 eventos utilizados para la calibración del mismo, modificando de a uno a la vez, cada uno de los coeficientes utilizados y calibrados para la acumulación y lavado de sólidos.

Los 6 coeficientes ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_8$ ,  $C_9$ ,  $C_{10}$  y  $C_{11}$ ) fueron incrementados en un 20% resultado un total de 60 corridas del modelo, lo que permitió evaluar el porcentaje de incremento del total de sólidos erogados por la cuenca ante la variación de cada coeficiente.

En la Tabla 4.20 se presentan los resultados el análisis de sensibilidad para cada uno de los coeficientes y las tormentas evaluadas. En la misma puede observarse como el modelo presenta una mayor sensibilidad al coeficiente  $C_{11}$  (exponente de arrastre de las áreas permeables), seguido por  $C_{10}$  (coeficiente de arrastre de áreas permeables), mientras que el coeficiente de menor sensibilidad es  $C_8$  (coeficiente de arrastre de áreas impermeables).

**Tabla 4.20.** Resultados del análisis de sensibilidad del modelo de producción de sedimentos del SWMM.

Tormenta	Humedad antecedente	Lluvia neta [mm]	Total de sedimentos SWMM calibrado [T]	Variación en la producción de sedimentos					
				Acumulación impermeable		Arrastre impermeable		Arrastre permeable	
				C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>
19-nov-2013	II	12.4	94	4.0%	3.6%	1.5%	3.8%	16.0%	63.8%
11-ene-2013	II	5.6	37.5	6.2%	5.4%	4.3%	11.9%	13.8%	29.3%
20-feb-2013	II	30.8	270.6	3.9%	3.2%	0.2%	0.1%	16.1%	98.3%
9-abr-2014	I	5.7	39.8	11.8%	8.8%	6.7%	6.7%	8.2%	22.4%
4-may-2014	II	8.3	55.2	5.5%	4.8%	4.8%	3.3%	34.6%	8.5%
19-jul-2014	II	15.9	117.2	4.5%	3.9%	1.6%	4.7%	15.5%	62.5%
6-oct-2014	II	15.3	116.3	4.8%	4.2%	1.4%	4.1%	15.2%	72.4%
31-oct-2014	III	14.8	84.2	0.8%	0.8%	0.4%	1.1%	19.2%	81.8%
30-nov-2014	I	44.4	318.9	6.7%	3.1%	0.0%	0.0%	13.3%	66.1%
1-ene-2015	III	126.5	1162.9	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	19.9%	199.0%
<b>Variación para el total de los eventos analizados</b>				<b>2.6%</b>	<b>1.8%</b>	<b>0.5%</b>	<b>1.2%</b>	<b>17.4%</b>	<b>134.6%</b>

## CÁPITULO 5

### APLICACIONES DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA Y DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

#### 5.1. Metodología

Una vez calibrados los modelos de simulación hidrológica-hidráulica y de producción de sedimentos, se procedió a su explotación enfocada a la elaboración de mapas de amenaza de inundación y de vulnerabilidad a la erosión de todo el ambiente en estudio para distintas recurrencias, tanto para el escenario actual como para un hipotético escenario futuro, esperable de ser alcanzado en caso que la dinámica de la urbanización continúe con las tendencias actuales de modificación de los usos del suelo y aumento de superficies impermeables.

Primeramente se determinaron las tormentas críticas a utilizar, objetivando la selección de la duración de aquellas tormentas que producen los mayores caudales a misma condición de humedad antecedente. Posteriormente se llevaron a cabo las respectivas corridas del modelo de simulación para determinar los niveles y velocidades en cada uno de los elementos constitutivos del sistema de drenaje pluvial en los que se constituyó el modelo.

Finalmente a partir de los cálculos de niveles y velocidades de flujo para las distintas recurrencias, tanto en las subcuencas como en los elementos conductores, y su posterior acople a modelos de producción de sedimentos, se procesaron dichos resultados a los efectos de su representación en formato de mapas de:

- Amenaza por inundación en calles.
- Amenaza por inundación en cauces naturales.
- Vulnerabilidad a erosión superficial.
- Vulnerabilidad a erosión en cauces naturales.

En los escenarios críticos simulados se utilizó el modelo hidrológico-hidráulico calibrado y validado para una humedad antecedente tipo III, el cual representa el escenario con mayores volúmenes de escurrimiento superficial esperable.

Finalmente, se procedió a estimar el total de sedimentos esperable a ser erogados por la cuenca durante las tormentas de diseño de distintas recurrencias ante diferentes humedades antecedentes, tanto para el escenario actual como para el hipotético futuro.

## **5.2. Determinación de la tormenta crítica**

En la determinación de la tormenta crítica se utilizaron curvas de intensidad, duración y frecuencia de precipitaciones máximas disponibles de la localidad de Cerro Azul, y con el método de los bloques alternos (Riccardi, 2004) se confeccionaron distintos hietogramas de precipitación para diversas duraciones de tormentas. Con el objetivo de encontrar la precipitación que produzca los mayores tirantes en las cunetas de la cuenca, se evaluó cual es la duración de tormenta crítica. Una vez establecida la duración de la tormenta crítica se confeccionaron los hietogramas de diseño para 2, 5 y 100 años de recurrencia.

Para la confección de los distintos hietogramas de precipitación se utilizaron las curva intensidad–duración–frecuencia confeccionadas por Litwin y Franco (1987) con datos de la estación experimental INTA de Cerro Azul, las cuales fueron descriptas en el Capítulo 3.

### **5.2.1. Duración de tormenta crítica**

Para determinar la duración de la tormenta crítica asociada a cada recurrencia para el escenario actual, se llevaron a cabo simulaciones de modo de hallar aquella duración que produzca los mayores caudales en la sección de cierre. De este modo se obtuvieron distintas tormentas con diferentes duraciones y se confeccionaron los hietogramas de diseño para 2 años de recurrencia, los cuales se ilustran en la Figura 5.2.a.

El método de los bloques alternos presenta la particularidad de que los bastones de precipitaciones máximas no varían con la duración de la tormenta y simplemente se van desplazando para ubicarse en el centro de la tormenta. Por lo que es esperable que los caudales generados aumenten con el incremento de la duración de la tormenta, debido a que al aumentar la duración de la tormenta, cuando ocurren los máximos del hietograma, el suelo se encuentra cada vez más húmedo, disminuyendo así las pérdidas.

Los caudales continúan aumentando hasta establecerse en un máximo invariante con la duración de la tormenta (Riccardi, 2004). Para este tipo de análisis la tormenta crítica se define como aquella que genera caudales máximos lo suficientemente cercanos al máximo invariante y poseen una duración esperable en la región de estudio.

Para este análisis se seleccionaron dos elementos críticos del sistema para ser evaluados los cuales se presentan en la Figura 5.1: (i) la salida propiamente dicha de la cuenca Mbotaby y (ii) el tramo más comprometido de la calle Salta, donde suelen presentarse inundaciones menores, pero las aguas superficiales alcanzan altas velocidad.

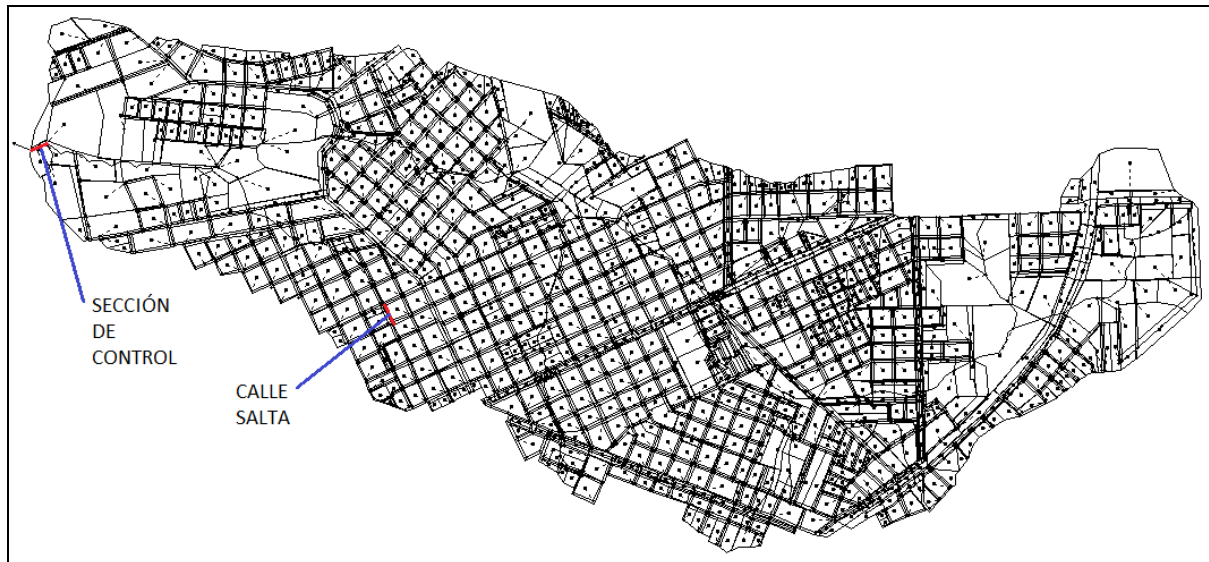


Figura 5.1. Elementos evaluados para selección de tormenta crítica.

En la Figura 5.2.a se presentan los hietogramas de diseño para 2 años de recurrencia y 2 a 12h de duración, determinados por el método de los bloques alternos para establecer la duración de la tormenta crítica. A su mismo, la Figura 5.2.b exhibe las correspondientes variaciones de caudal máximo con el incremento de la duración de la tormenta crítica.

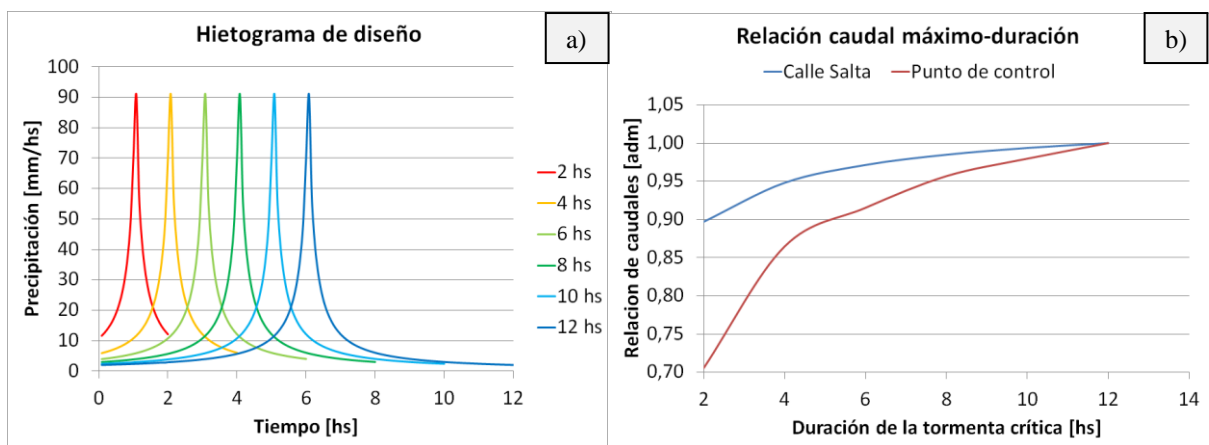


Figura 5.2.a. Hietogramas de diseño para la determinación de la tormenta crítica de 2 a 12 hs de duración y 2 años de recurrencia. b. Caudales máximos vs duración de la tormenta en la salida de la cuenca y la calle Salta para 2 años de recurrencia en función a la duración de la tormenta.

Seguidamente la Tabla 5.1 presenta los caudales y niveles máximos alcanzados en los tramos analizados en función a la duración de la tormenta. En la misma se verifica que, en el punto de cierre de la cuenca, es necesaria una tormenta de 12h de duración para que la variación en el caudal máximo sea del 2.0% respecto al anterior, con una variación en el tirante máximo

de 1cm. Mientras que para el tramo de la calle Salta, dicha variación de caudal es 0.6% , con un incremento del nivel menor a 1cm.

**Tabla 5.1.** Caudales y tirantes máximos alcanzados en la calle Salta y punto de control de la cuenca para distintas duraciones de tormenta y 2 años de recurrencia.

Duración	Precipitación	Intensidad media	Calle Salta				Punto de control			
			Tiempo al pico	Caudal máximo	Relación respecto al máximo	Nivel máximo	Tiempo al pico	Caudal máximo	Relación respecto al máximo	Nivel máximo
[h]	[mm]	[mm/h]	[h]	[m <sup>3</sup> /s]	[adm]	[m]	[h]	[m <sup>3</sup> /s]	[adm]	[m]
2	57.72	28.9	01:15	3.537	0.897	0.26	02:40	22.741	0.706	2.07
4	73.79	18.4	02:10	3.738	0.948	0.26	04:10	27.869	0.865	2.25
6	83.33	13.9	03:10	3.830	0.971	0.26	05:35	29.500	0.915	2.29
8	90.16	11.3	04:10	3.883	0.985	0.27	06:25	30.836	0.957	2.35
10	95.49	9.5	05:10	3.918	<b>0.994</b>	0.27	07:15	31.572	<b>0.980</b>	2.37
12	99.88	8.3	06:10	3.943	1.000	0.27	08:25	32.230	1.000	2.38

Respecto a la duración esperable determinada y su contrastación con duraciones observadas, puede decirse que la tormenta que provoco las inundaciones del 1 de diciembre de 2012, indica que en la región pueden presentarse tormentas severas de 12h de duración. Además, según los datos del pluviómetro de la CELO, se han registrado en los últimos 12 años eventos de hasta 4 días de duración y numerosos registros con 2 días de duración.

Se decidió así trabajar con tormentas críticas de 12h de duración, ya que las mismas producen caudales y tirantes cercanos a los máximos esperables y una duración mayor de la tormenta agregaría un tiempo de cálculo innecesario a la modelación y no aportará una apreciable precisión al cálculo.

### 5.2.2. Hietogramas de diseño

Mediante la técnica del método de bloques alternos y los datos obtenidos de las i-d-f Cerro Azul, se confeccionaron 3 hietogramas de diseño, para 2, 5 y 100 años de recurrencia. Cada uno de 12 horas de duración, con pulsos de precipitación discretizados cada 5 minutos.

Las recurrencias seleccionadas corresponden a los escenarios recomendados por la bibliografía especializada para la evaluación de los sistemas menor y mayor (Riccardi et al., 2008).

Los eventos de 2 años de recurrencia representan eventos de alta periodicidad, con un 50% de ocurrencia en un año, determina la afectación del sistema ante tormentas recurrentes. Los eventos pluviográficos de 5 años de recurrencia se utilizan para diseñar los sistemas menores

o iniciales de desagües pluviales, de manera que se verifique la suposición de impacto cero por inundación. Mientras que los eventos de 100 años, son utilizados para diseñar los sistemas mayores de desagües pluviales o al menos evaluar la respuesta del sistema ante una lluvia extraordinaria, cuantificar los daños esperables y planificar el accionar de los sistemas de emergencia.

Para 2 años de recurrencia son esperables 99.9mm de precipitación total, con una intensidad media de 8.3mm/h y una intensidad máxima durante 5 minutos de 91mm/h (Figura 5.3.a). Para 5 años de recurrencia, el total precipitado esperable es de 125.8mm, con una intensidad media de 10.5mm/h y una intensidad máxima de 101.8mm/h (Figura 5.3.b). En tanto que para 100 de recurrencia, obtenemos 201.2mm totales precipitados, con una intensidad media de 16.8mm/h y 140.7mm/h durante los 5 minutos de mayor intensidad (Figura 5.3.c).

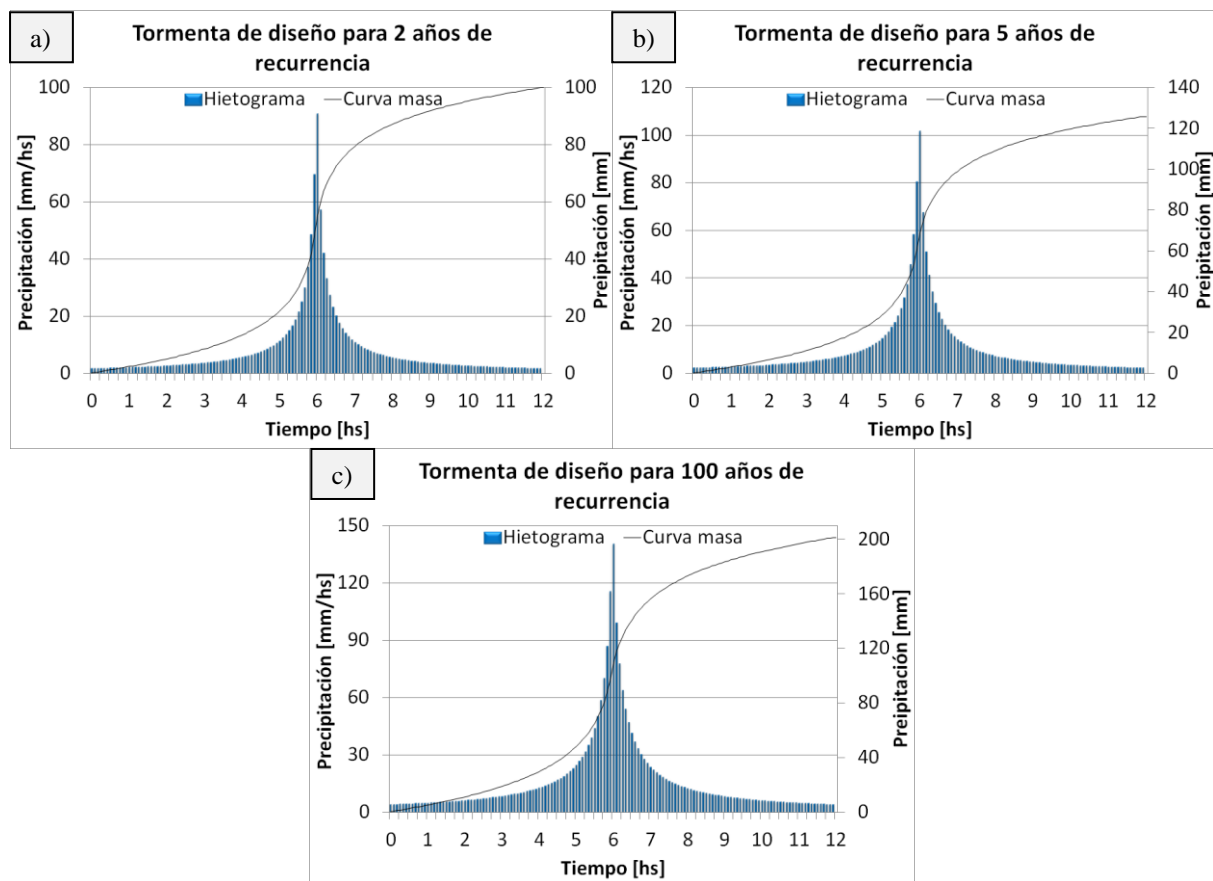


Figura 5.3.a. Hietograma y curva masa de la tormenta de diseño para 2 años de recurrencia. b. Para 5 años de recurrencia. c. Para 2 años de recurrencia.

### 5.3. Escenario futuro hipotético

Para establecer un posible escenario futuro, donde la presión urbanística avance sobre los actuales espacios permeables dentro de la cuenca, se estableció en los lotes particulares una

---

superficie impermeable igual al máximo de superficie construida permitido por el Código de Edificación Municipal (CEM) vigente, según las distintas zonificaciones.

Es de hacer notar que el CEM no limita las superficies impermeables que puede haber dentro de los lotes, sino que impone restricciones a las superficies cubiertas mediante el Factor de Ocupación del Suelo (FOS). Según este código, el FOS está determinado por la suma de superficies cubierta; las cuales son consideradas como aquella que posee cubierta de techo y cerramientos verticales en al menos tres direcciones, mientras que si posee cerramiento en dos o menos direcciones es una superficie semicubierta y su incidencia en el FOS será multiplicado por 0.5. Por lo que es esperable que las superficies impermeables totales sean superiores al FOS establecido como máximo en el código, tanto por las superficies semicubiertas, como por los pisos impermeables que no poseen limitación.

Asimismo, dada la manera en que está constituido el modelo hidrológico, es necesario contemplar en cada subcuenca el porcentaje de impermeabilización que corresponde a la media calle, es decir a su media calzada y vereda correspondientes. Si consideramos a las calzadas como impermeables en un 98% y a las veredas impermeabilizadas en un porcentaje igual al FOS, según la zonificación en la que se encuentre, en promedio tenemos un incremento del 5% en la impermeabilidad de las subcuencas.

Para este posible escenario futuro las superficies impermeables de las zonas del distrito central, residenciales, nuevos loteos e industrias fueron supuestas igual a los FOS máximos más un 5% debido a la incidencia de las calles, las actuales rutas de tierra consideradas como asfaltadas con 45% de impermeabilidad y las actuales rutas asfaltadas, parques y reservas ecológicas conservan su actuales porcentajes de impermeabilidad.

Para este escenario la totalidad de las superficies impermeables fueron consideradas como directamente conectadas y el CN de las superficies permeables son iguales a las condiciones actuales salvo para los actuales caminos de tierra (Tabla 5.2). Cabe recordar aquí que el CN en el SWMM corresponde únicamente a la parte permeable de las subcuencas, por lo que la caracterización del mismo dentro de las distintas zonificaciones, no resulte alterada significativamente con el paso del tiempo.

En este posible escenario futuro se consideraron que las actuales calzadas de tierra alcanzaron a ser materializadas en pavimento tipo empedrado brasilero, con cordones cunetas de hormigón y las actuales calzadas de pavimento brasilero recibieron un tratamiento superficial bituminoso, comportándose como calzadas de pavimento flexible.

**Tabla 5.2.** Zonificación, área impermeable y CN para el escenario actual y el hipotético futuro.

Zonificación	Escenario Actual					Escenario Futuro				
	Sup. Imp. [%]	Sup. Imp. D.C. [%] <sup>(*)</sup>	CN I	CN II	CN III	Sup. Imp. [%]	Sup. Imp. D.C. [%] <sup>(*)</sup>	CN I	CN II	CN III
<i>Distrito central</i>	85	90	48	76	87	85	100	48	76	87
<i>Residencial de densidad alta</i>	65	70	48	76	87	75	100	48	76	87
<i>Residencial de densidad media</i>	45	50	48	76	87	65	100	48	76	87
<i>Residencial de densidad baja</i>	25	30	48	76	87	55	100	48	76	87
<i>Loteos nuevos y zonas de intrusión</i>	5	10	48	76	87	50	100	48	76	87
<i>Industrias</i>	25	30	48	76	87	60	100	48	76	87
<i>Parques y canchas</i>	2.5	50	42	71	84	2.5	100	42	71	84
<i>Plazoletas</i>	20	50	42	71	84	20	100	42	71	84
<i>Reservas ecológicas</i>	0	0	38	67	82	0	0	38	67	82
<i>Rutas asfaltadas</i>	45	50	48	76	87	45	100	48	76	87
<i>Ruta de tierra</i>	25	30	43	72	85	45	100	48	76	87

(\*) Expresado en porcentaje respecto del total de superficies impermeables.

Respecto a los parámetros de erosión para el hipotético escenario futuro, los mismos se mantuvieron invariantes respecto del escenario actual. Dicha suposición se basa en que las distintas subcuencas en las que fue discretizada la cuenca Mbotaby no presentan cambio de zonificación, salvo las rutas de tierra del escenario actual que pasa a ser asfaltadas en el hipotético futuro. Por lo que las variaciones en los procesos de producción y transporte de sedimentos están marcados por el avance de las áreas impermeables sobre zonas permeables ya antropizadas.

## 5.4. Simulaciones mediante modelación matemática hidrológica-hidráulica

Una vez definidos los hietogramas de diseño para cada recurrencia, se llevaron a cabo las simulaciones mediante el modelo matemático hidrológico-hidráulico SWMM. Todas las corridas arrojaron errores de continuidad hidrológica e hidráulica menores al 1%. El modelo permitió generar valores de tirante de agua, velocidad y caudal en todos los elementos del sistema de drenaje pluvial constituido.

El paso de tiempo de cálculo que ha permitido verificar el menor error en continuidad fue de  $dt = 1\text{seg}$ . Para un adecuado seguimiento de los resultados obtenidos una vez culminadas las simulaciones, los valores de tirantes, velocidades y caudales fueron impresos en archivos cada 5 min.

Considerando los 2967 nodos y 3742 elementos con que se constituyó el ambiente modelado, el tiempo de cálculo de cada tormenta fue de 26 minutos.

En la Tabla 5.3 se presenta un resumen con los resultados de las corridas con datos del balance hidrológico, valores de caudales y niveles máximos en el punto de control de la cuenca, como así también el tiempo que permanece desbordado el arroyo en dicho punto, teniendo presente que el mismo se produce para un nivel de agua de 1.80m.

**Tabla 5.3.** Síntesis de resultados obtenidos para humedad antecedente III, distintos escenarios y recurrencias.

<b>Recurrencia</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Escenario actual</b>	<b>Escenario futuro</b>	<b>Variación</b>
2 años	Caudal máximo	[m <sup>3</sup> /s]	82.94	85.10	2.6%
	Nivel máximo	[m]	2.73	2.73	0.0%
	Tiempo al pico	[h:mm]	6:50	6:45	-0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	2:35	2:40	0:05
	Precipitación total	[mm]	99.870	99.870	0.0%
	Infiltración	[mm]	23.956	19.072	-20.4%
	Escorrentía	[mm]	70.952	79.040	11.4%
	Almacenamiento	[mm]	5.022	1.79	-64.4%
5 años	Caudal máximo	[m <sup>3</sup> /s]	89.59	93.65	4.5%
	Nivel máximo	[m]	2.75	2.77	0.7%
	Tiempo al pico	[h:mm]	6:55	6:50	-0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	3:30	3:35	0:05
	Precipitación total	[mm]	125.800	125.800	0.0%
	Infiltración	[mm]	25.320	20.002	-21.0%
	Escorrentía	[mm]	95.509	103.871	8.8%
	Almacenamiento	[mm]	5.033	1.947	-61.3%
100 años	Caudal máximo	[m <sup>3</sup> /s]	112.76	115.66	2.6%
	Nivel máximo	[m]	2.84	2.84	0.7%
	Tiempo al pico	[h:mm]	7:10	7:05	-0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	6:30	6:50	0:20
	Precipitación total	[mm]	201.270	201.270	0.0%
	Infiltración	[mm]	27.620	21.4780	-22.2%
	Escorrentía	[mm]	168.693	177.474	5.2%
	Almacenamiento	[mm]	5.043	2.320	-54.0%

En la tabla anterior puede observarse como para la simulación entre los dos escenarios, con una humedad antecedente III, para todas las recurrencias, se aprecia que no existe un incremento significativo de los niveles y caudales máximos en el punto de control de la cuenca. Las mayores diferencias porcentuales se dan en los valores de infiltración y almacenamiento superficial.

## **5.5. Amenaza de inundación en calles**

A partir de las simulaciones realizadas se obtuvieron, para cada recurrencia y escenario, dos mapas. Uno que detalla los niveles máximos alcanzados y otro similar con las velocidades máximas desarrolladas en las cunetas.

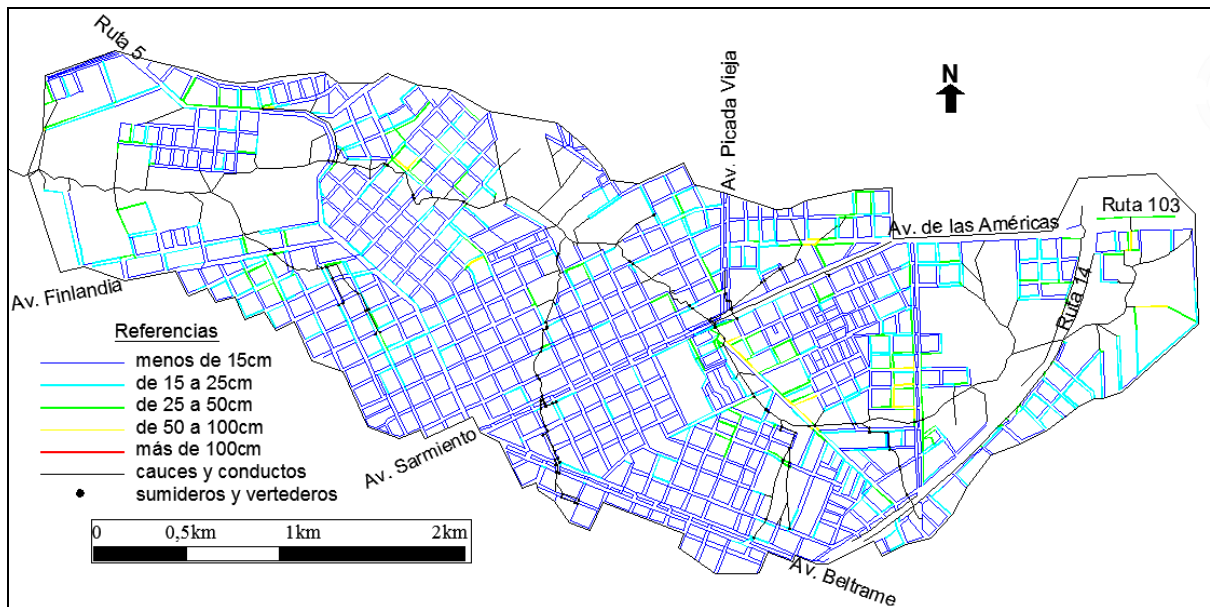
Los 6 mapas obtenidos constituyen la respuesta de la cuenca ante una precipitación de 12 horas de duración, con 2, 5 y 100 años de recurrencia. Para una mejor interpretación de los resultados, los mismos fueron discretizados en rangos para ser visualizados en los mapas.

En los mapas de niveles máximos, el primer rango de valores, menos de 0.15m, corresponde a aquellas cunetas que no presentan desborde por poseer tirantes de agua menores al nivel máximo de la cuneta. El segundo rango, entre 0.15 y 0.25m, corresponde a aquellas calles cuyos niveles máximos presentan desborde de las cunetas e inundación parcial de las veredas. El rango siguiente, entre 0.25 y 0.50m, corresponde a las calles donde el agua ha inundado las calzadas, la totalidad de las veredas e ingresado a los lotes de viviendas y comercios. Los próximos rangos de valores son para evaluar la severidad de la inundación en aquellas zonas más afectadas.

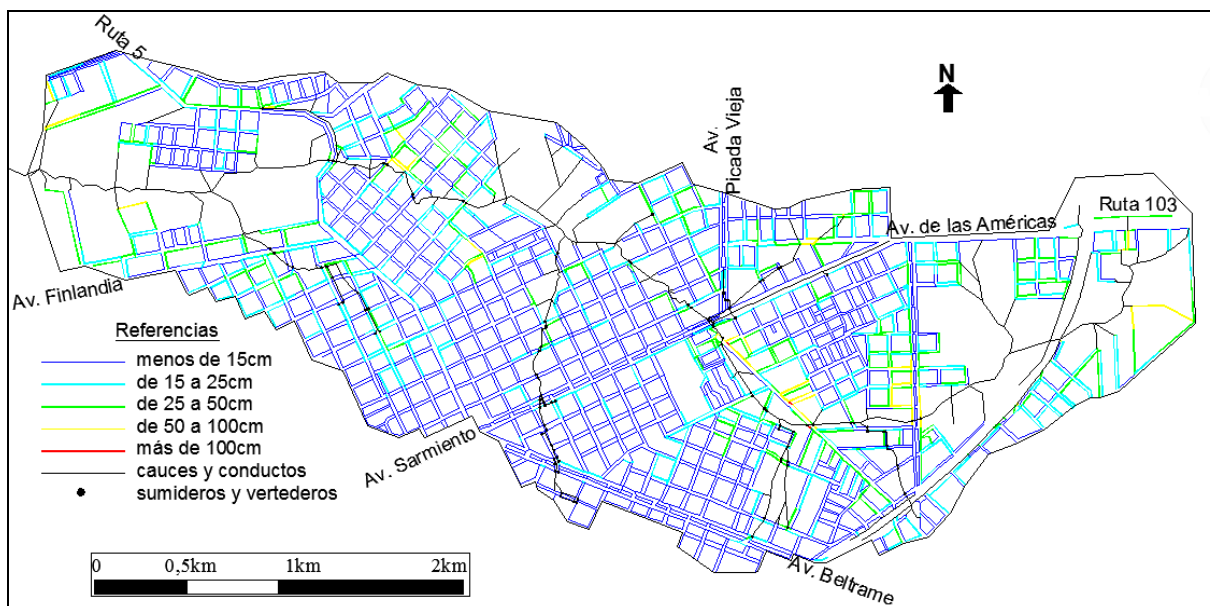
En los mapas de velocidades máximas, el rango menor representa las cunetas que alcanzan velocidades menores a 1m/s y los rangos siguientes presentan valores que se incrementan en 1m/s cada uno. El mayor de los rangos representa las cunetas donde se alcanza velocidades mayores a los 4m/s.

### **5.5.1. Mapas de niveles máximos**

En la Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se presentan los mapas de niveles máximos alcanzados en las cunetas de la cuenca en estudio para 2, 5 y 100 años de recurrencia respectivamente para el escenario actual, mientras que las Figuras 5.7, 5.8. y 5.9 los son para el escenario futuro hipotético. En la Tabla 5.4 se presentan los porcentajes de cunetas comprendida dentro de cada rango de valores para los distintas recurrencias y escenarios.



*Figura 5.4. Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.*



*Figura 5.5. Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia.*

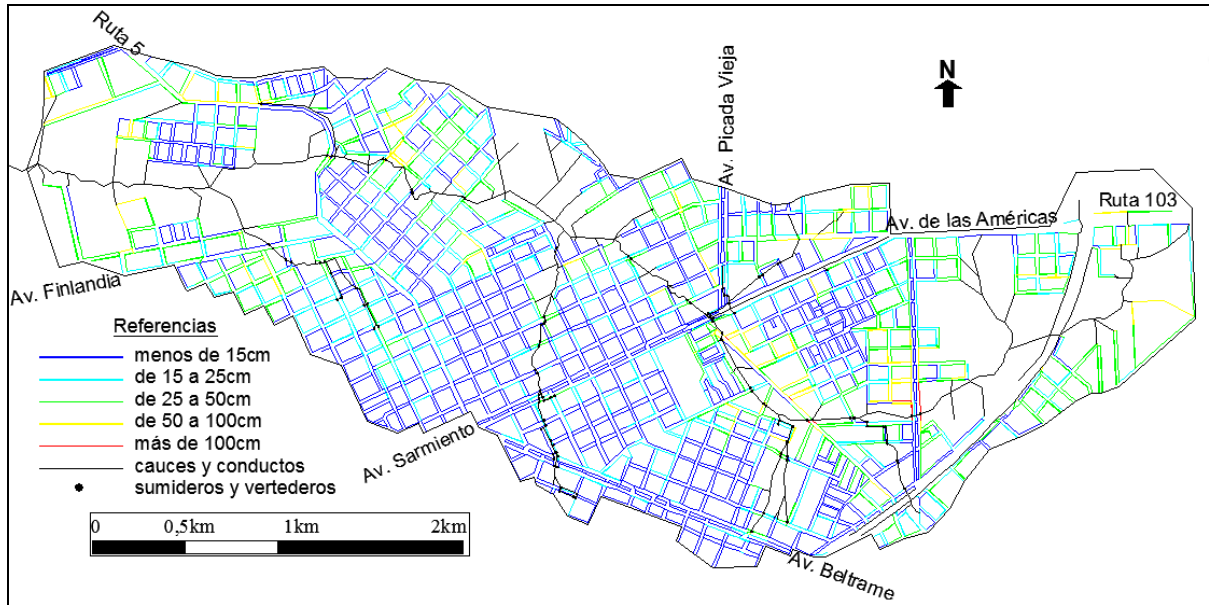


Figura 5.6. Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia.

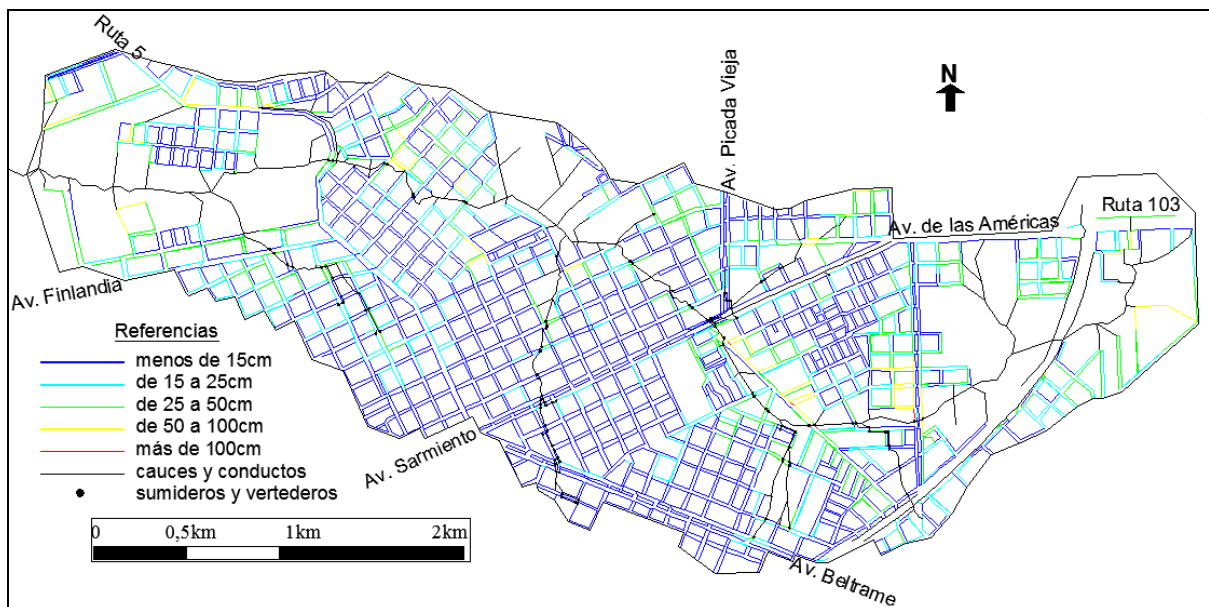


Figura 5.7. Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 2 años de recurrencia.

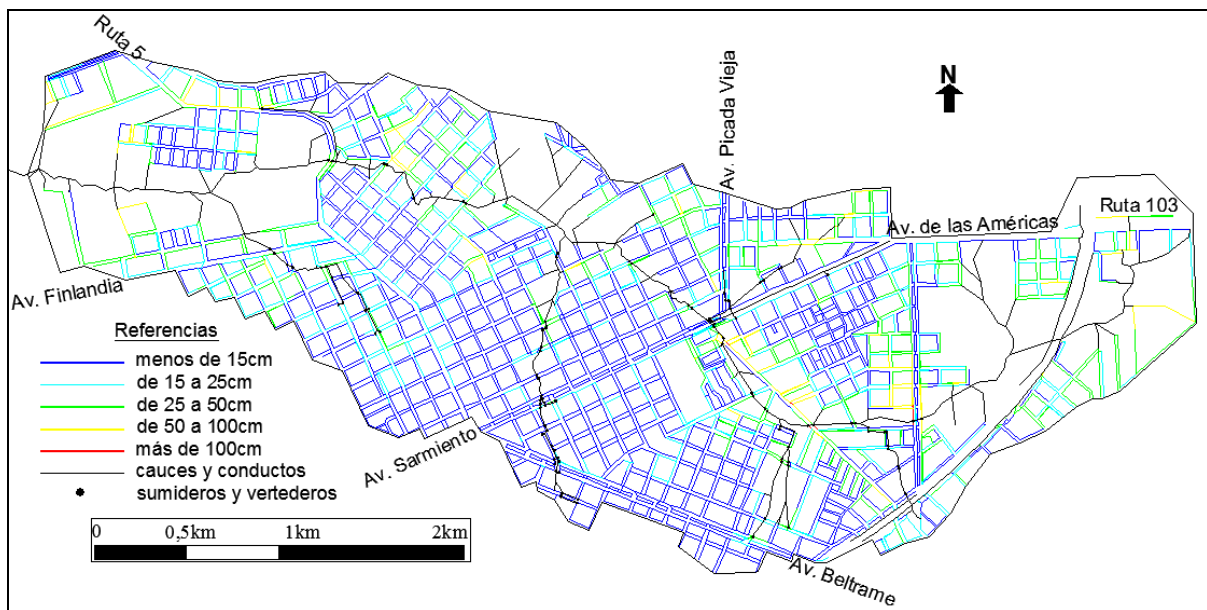


Figura 5.8. Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 5 años de recurrencia.

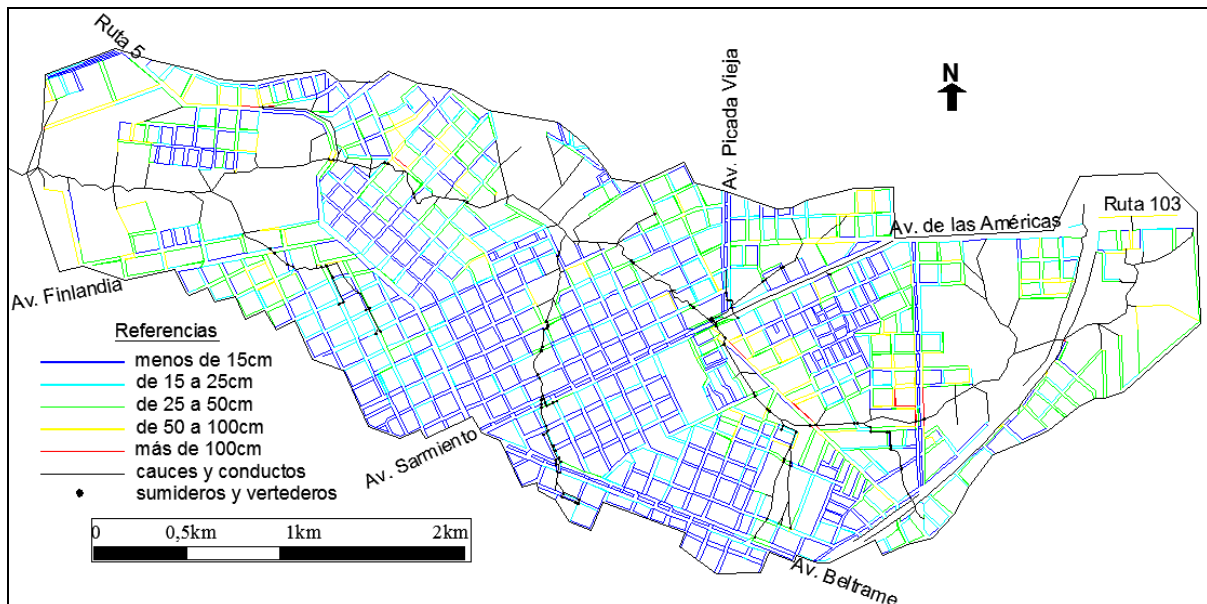


Figura 5.9. Niveles máximos en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.

Tabla 5.4.- Porcentajes de niveles máximos en cunetas para humedad III, distintos escenarios y recurrencias.

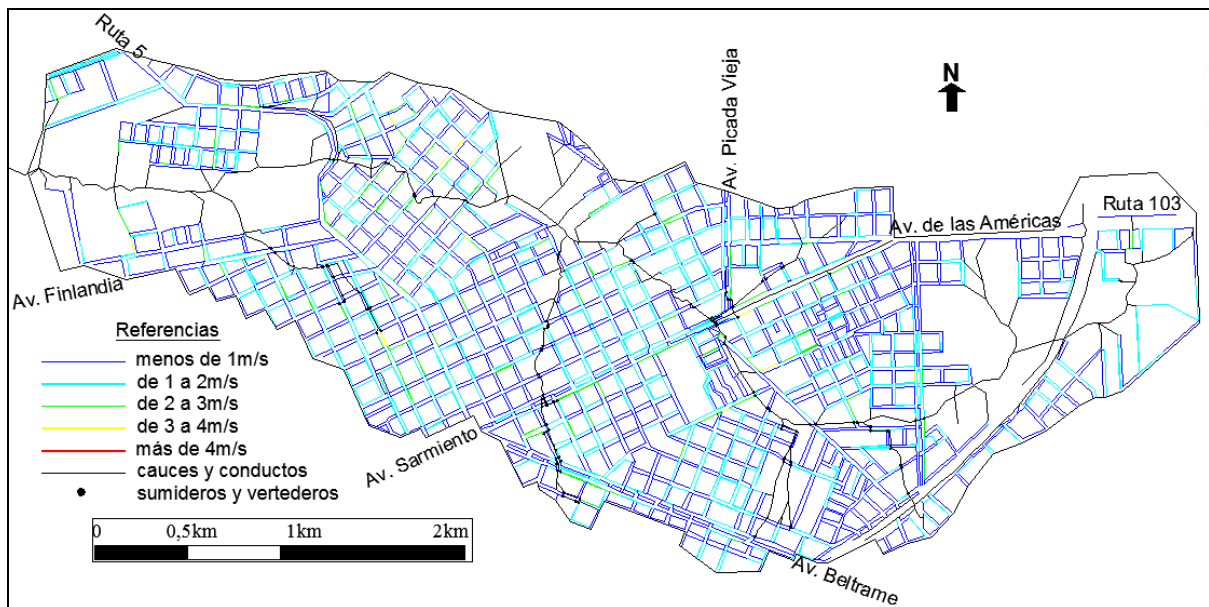
Niveles máximos	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
menos de 15 cm	73.5%	62.7%	-10.8%	66.3%	58.2%	-8.1%	50.5%	45.9%	-4.6%
de 15 a 25 cm	18.2%	20.6%	2.4%	20.2%	21.7%	1.5%	24.7%	25.0%	0.3%
de 25 a 50 cm	7.2%	13.6%	6.4%	11.5%	15.5%	4.0%	18.7%	20.4%	1.7%
de 50 a 100 cm	1.1%	2.9%	1.8%	1.8%	4.3%	2.5%	5.7%	8.1%	2.4%
más de 100 cm	0.0%	0.2%	0.2%	0.1%	0.2%	0.1%	0.4%	0.6%	0.3%

En la Tabla 5.4 se detalla lo que pudo visualizarse en las figuras anteriores, que para todas las recurrencias las cunetas que presentan desborde (niveles mayores a 15cm) son significativas.

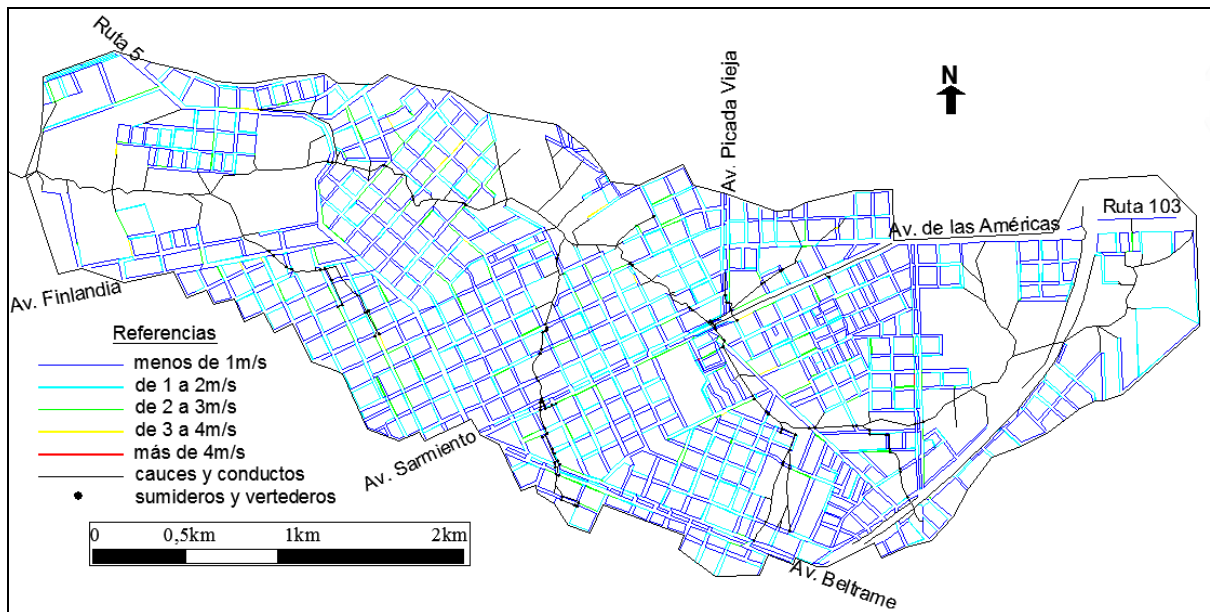
Salvo el escenario actual con una recurrencia de 2 años, todos los otros escenarios modelados presentan niveles máximos superiores a los 100cm. Para menores recurrencias, mayor es el aumento porcentual de los niveles del escenario hipotético futuro respecto al actual.

### 5.5.2. Mapas de velocidades máximas

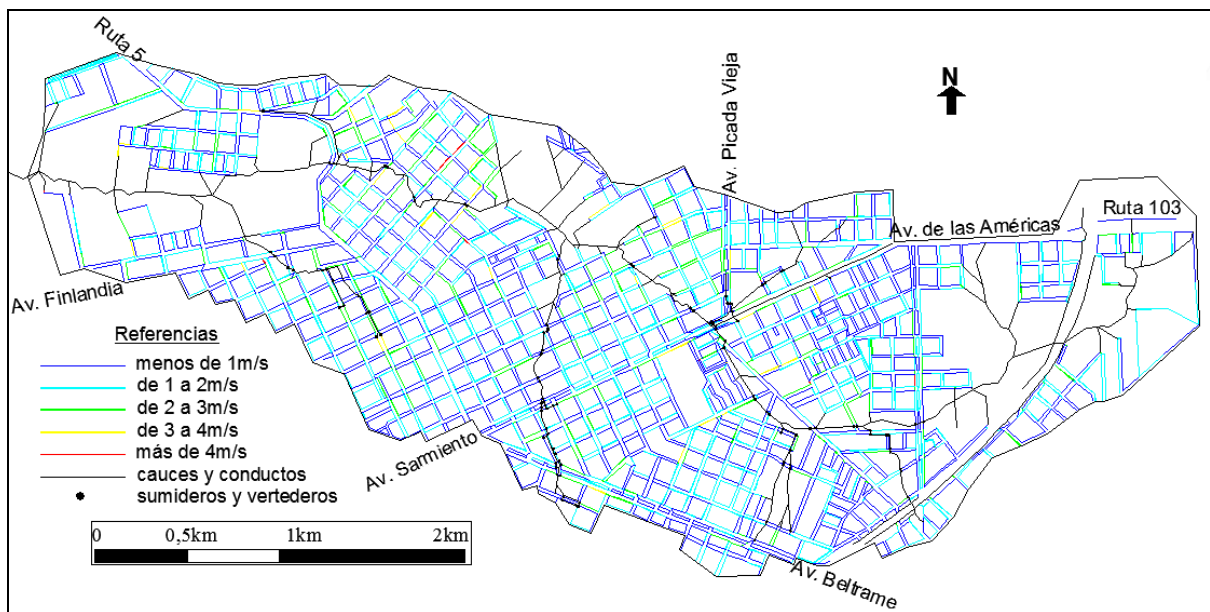
En las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12 se visualizan los mapas con las velocidades máximas alcanzadas para 2, 5 y 100 años de recurrencia respectivamente para el escenario actual, mientras que las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15 los son para el hipotético futuro. A continuación de las mismas, se detallan en la Tabla 5.5, los porcentajes de velocidades máximas alcanzadas dentro de cada rango de valores para distintas recurrencias y escenarios. Puede visualizarse las altas velocidades alcanzadas en las cunetas, velocidades que se desarrollan en toda la cuenca. Aún para una reducida recurrencia las cunetas con velocidades mayores a 1m/s casi alcanzan el 40% del total de cunetas de la cuenca. Para 100 años de recurrencias las velocidades máximas alcanzadas superan los 4m/s.



*Figura 5.10. Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.*



*Figura 5.11. Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia.*



*Figura 5.12. Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia.*

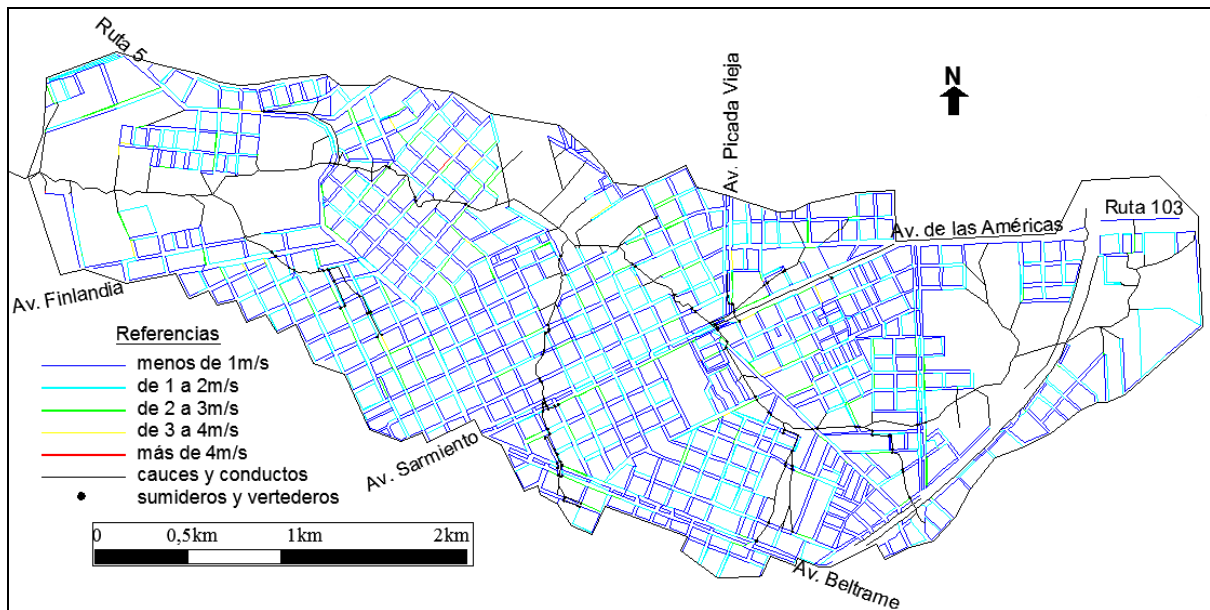


Figura 5.13. Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 2 años de recurrencia.

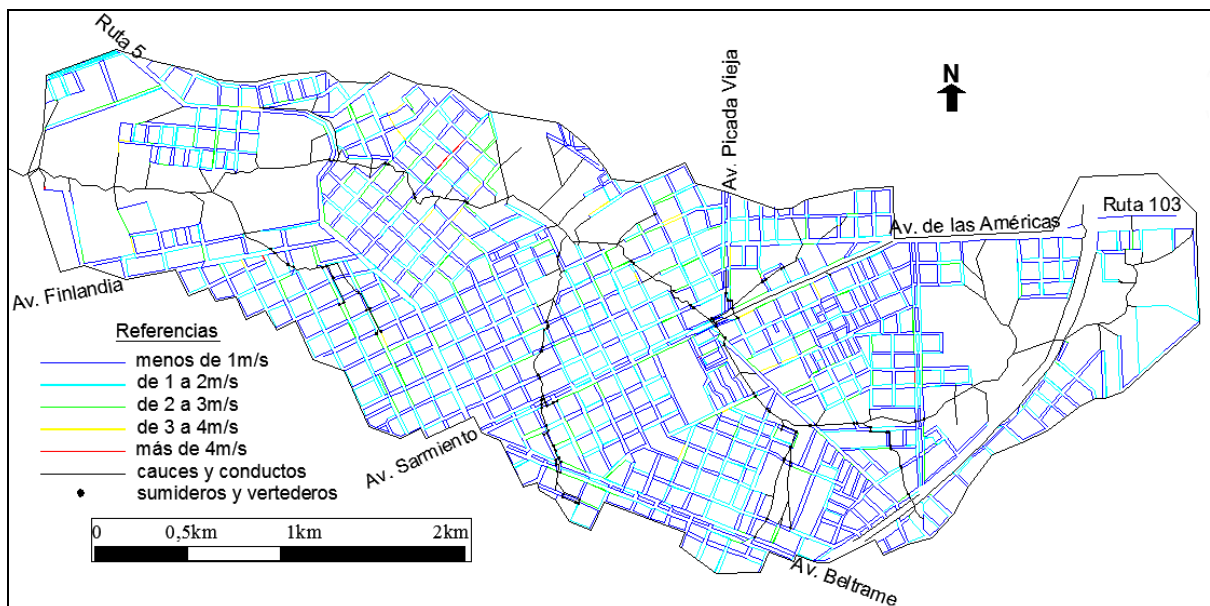


Figura 5.14. Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 5 años de recurrencia.

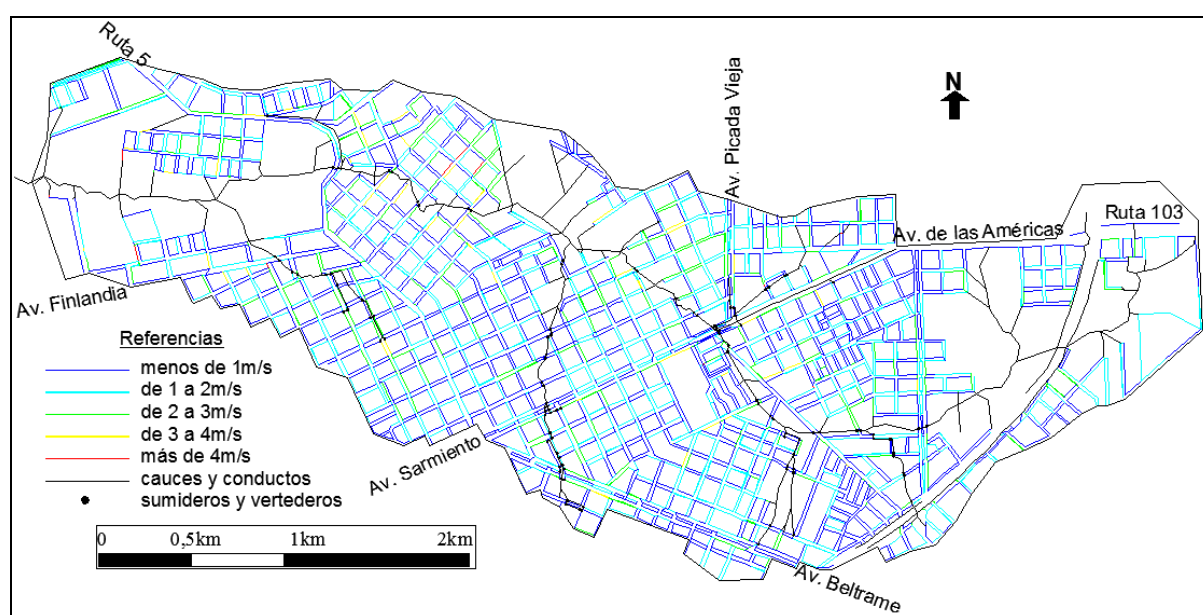


Figura 5.15. Velocidades máximas en cunetas de calles para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.

Tabla 5.5.- Porcentajes de velocidades máximas en cunetas para humedad III, distintos escenarios y recurrencias.

Velocidades máximas	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
menos de 1 m/s	62.7%	58.4%	-4.3%	58.2%	56.1%	-2.1%	51.9%	50.9%	-1.0%
de 1 a 2 m/s	32.4%	34.1%	1.8%	35.4%	35.0%	-0.4%	36.8%	36.4%	-0.4%
de 2 a 3 m/s	4.4%	6.7%	2.3%	5.7%	7.8%	2.1%	9.8%	10.7%	0.9%
de 3 a 4 m/s	0.5%	0.6%	0.1%	0.6%	0.9%	0.3%	1.2%	1.7%	0.5%
más de 4 m/s	0.0%	0.2%	0.2%	0.1%	0.2%	0.1%	0.3%	0.3%	0.1%

En la Tabla 5.5 se detalla que, para todos los escenarios y recurrencias modeladas, las cunetas con velocidades superiores al 1m/s rondan el 45%, lo que representa un porcentaje alto para todas las recurrencias, con velocidades máximas superiores a los 4m/s, para todos los escenarios, salvo el estado actual con una recurrencia de 2 años. Puede inferirse además que, el aumento porcentual de las velocidades en cunetas para el hipotético escenario futuro respecto al actual es menor que el incremento de los niveles mostrados en la Tabla 5.4.

Con el escenario actual, para una recurrencia de 2 años, el 37.3% de las cunetas desarrollan velocidades mayores a 1m/s, con valores máximos que superan los 3m/s, lo que representa un alto riesgo de afectación por arrastre con una frecuencia muy alta. En tanto que para 100 años de recurrencia, el 48.1% de las cunetas presentan velocidades máximas superiores a 1m/s, con velocidades máximas que superan los 4m/s en algunas zonas.

Tanto los niveles máximos como las velocidades presenta un aumento para el hipotético escenario futuro, donde el aumento porcentual es mayor para menores recurrencias.

Dentro de la actual zona con cordones cunetas de hormigón, son escasas las cunetas desbordadas para 2 y 5 años de recurrencia, lo que minimiza la inundación de las veredas. Aunque se observan algunas en cercanías de los arroyos, lugar donde se ubican las bocas de tormenta y vertederos que derivan los caudales hacia los arroyos.

Se han detectado calles, actualmente materializadas de tierra, que alcanzan a desarrollar altas velocidades, en las cuales es esperable un aumento de dicha velocidad ante la construcción de los cordones cuneta de hormigón, modificando la dinámica actual del escurrimiento en calles e impactando en los cauces receptores.

### **5.5.3. Zonas de alta amenaza en calles**

De la comparación entre los mapas descriptos anteriormente, surgen 7 zonas dentro de la cuenca que se destacan por alcanzar grandes valores de niveles y velocidades en las calles. En ellas las calzadas, veredas y lotes se ven afectados severamente, por el desarrollo de tirantes mayores al máximo admitido por la cuneta, en combinación con velocidades capaces de arrastrar objetos y personas. A continuación se detallan las zonas de mayor amenaza detectadas y los valores de niveles y velocidades descriptos por el modelo para el escenario actual y una tormenta de 5 años de recurrencia. Dicha recurrencia es la recomendada por la bibliografía para proyectar obras en el sistema menor de desagüe a modo de evitar desbordes y amenazas por inundación.

(1) Calle Salta entre Sargento Cabral y French: Esta es la zona más céntrica donde se alcanzan valores críticos de niveles y sobre todo de velocidades. Con una pendiente media del 6%, alcanza para el escenario actual un valor máximo de velocidad de 3.50m/s, para una recurrencia de diseño de 5 años, en combinación con un tirante de 28cm, lo que implica el ingreso del agua a las viviendas residenciales de la zona.

(2) Esquina de las calles Urquiza y San Luis: Esta es una zona donde son afectadas varias calles a la redonda, por tratarse de zona relativamente plana que recibe los excedentes de varias cunetas de gran pendiente. El nivel máximo alcanzado, para 5 años de recurrencia, para un tramo de calle es de 50cm, con una velocidad máxima de 1.85 m/s.

(3) Calle Polonia entre Yaguareté y Dos de mayo: Esta es una zona totalmente urbanizada, donde existe calles con pendientes mayores al 15%. En ella es esperable una velocidad de 4.23m/s y un tirante de 36cm para 5 años de recurrencia. Actualmente no posee

---

cordones cunetas, por lo que las velocidades serán mayor al momento de materializar las mimas.

(4) Calle Primeros Colonizadores entre Suecia y Matheu: Similar a lo que sucede en la zona 2, la calle Pros. Colonizadores posee una zona plana que recibe las aguas de una serie de calles de gran pendiente. Aquí se alcanza, para 5 años de recurrencia, un nivel máximo de 66cm, en combinación con una velocidad de 2.77m/s.

(5) Av. de las América y el cruce del arroyo Mbotaby: Como se observa en la Figura 4.5.b, c y e, esta es una zona conflictiva por la combinación de los importantes caudales que escurren por los cordones de las avenidas y el frecuente desborde del arroyo. Sobre la avenida, en cercanía del punto más bajo, se alcanzan 19cm de agua en combinación con una velocidad de 3.57m/s, para una recurrencia de 5 años. En el punto más bajo, debido al desborde del arroyo, los niveles para bajas recurrencias superan los 100cm.

(6) Av. J. D. Perón y el cruce del arroyo Mbotaby. Esta avenida presenta varias zonas desbordadas por el agua. La misma se desarrolla al pie de una colina, recibiendo los excedentes de todos los barrios de viviendas sociales construidos en la ladera del cerro. El nivel máximo alcanzado sobre la avenida es de 76cm para 5 años de recurrencia, el cual exhibe una velocidad de 1.41m/s. Cabe mencionar que dicha avenida no cuenta con cordones cunetas de hormigón y las cunetas excavadas en la tierra que posee evidencian marcados procesos de erosión.

(7) Av. Gendarmería Nacional y el cruce del arroyo Mbotaby: Al momento de las campañas de relevamiento para la constitución y calibración del modelo, dicha avenida se encontraba en proceso de construcción de sus cordones cunetas de hormigón y un pavimento tipo empedrado brasilero. La misma actúa como colector de los excedentes superficiales de todas las calles aledañas. Con la materialización del cordón en las cercanías de la zona más baja, para 5 años de recurrencia, es esperable un nivel máximo de 50cm en combinación con una velocidad de 2.56m/s.

Las zonas descriptas pueden visualizarse en la Figura 5.16, mientras que en la Tabla 5.6 se detallan los niveles y velocidades máximas alcanzadas en cada zona para los distintos periodos de recurrencia en el escenario actual, mientras que a Tabla 5.7 lo es para el escenario hipotético futuro.

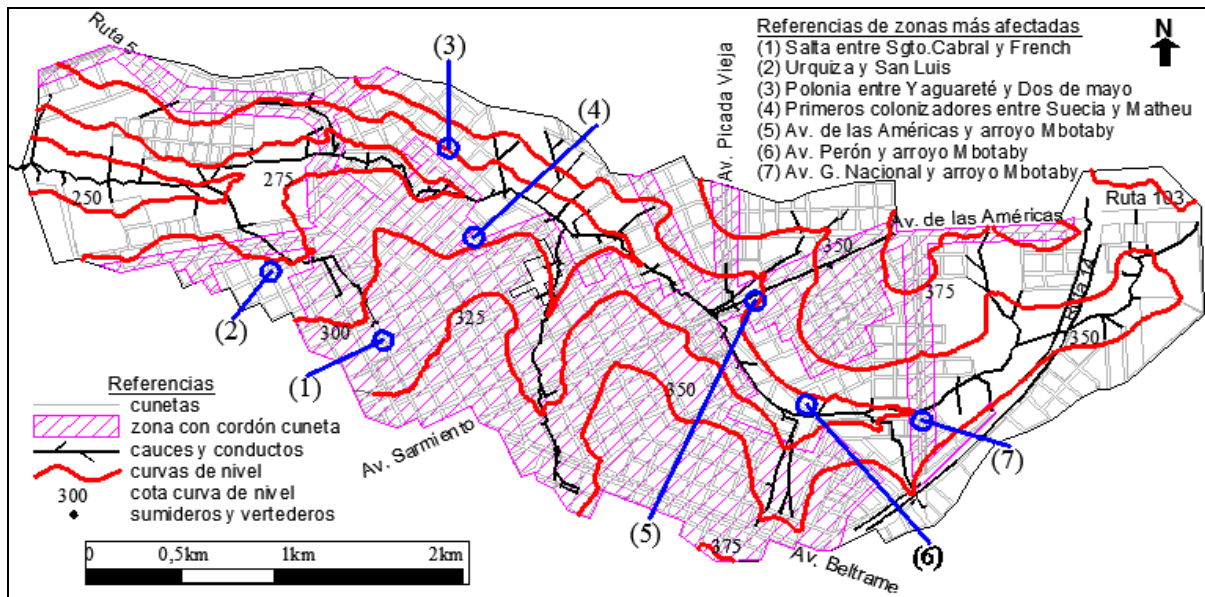


Figura 5.16. Zonas de mayor amenaza por inundación en calles.

Tabla 5.6. Resumen de niveles y velocidades máximas en las zonas más afectadas para el escenario actual.

Zonas	Niveles máximos [cm]			Velocidades máximas [m/s]		
	Años de recurrencia			Años de recurrencia		
	2	5	100	2	5	100
(1) Salta entre Sgto. Cabral y Mitre	27	28	33	3.33	3.50	3.97
(2) Urquiza y San Luis	44	50	63	1.72	1.85	2.19
(3) Polonia entre Yaguareté y Dos de mayo	30	36	49	3.94	4.23	4.75
(4) Primeros colonizadores entre Suecia y Matheu	55	66	88	2.84	2.77	1.66
(5) Av. de las Américas y arroyo Mbotaby	18	19	22	3.45	3.57	3.74
(6) Av. Perón y arroyo Mbotaby	66	76	99	1.4	1.41	1.23
(7) Av. Gendarmería Nacional y arroyo Mbotaby	44	50	65	2.58	2.56	2.94

Tabla 5.7. Resumen de niveles y velocidades máximas en las zonas más afectadas para el escenario futuro.

Zonas	Niveles máximos [cm]			Velocidades máximas [m/s]		
	Años de recurrencia			Años de recurrencia		
	2	5	100	2	5	100
(1) Salta entre Sgto. Cabral y Mitre	27	29	33	3.35	3.52	3.98
(2) Urquiza y San Luis	50	54	65	1.82	1.95	2.18
(3) Polonia entre Yaguareté y Dos de mayo	35	41	54	4.21	4.44	4.93
(4) Primeros colonizadores entre Suecia y Matheu	65	74	93	2.90	2.24	1.52
(5) Av. de las Américas y arroyo Mbotaby	18	19	24	3.54	3.62	3.48
(6) Av. Perón y arroyo Mbotaby	74	88	102	1.45	1.25	1.24
(7) Av. Gendarmería Nacional y arroyo Mbotaby	50	56	67	2.58	2.74	2.82

Las zonas de mayor afectación por inundación de calles detectadas presentan características similares. Con elevada pendiente, recogen los excedentes superficiales de las calles aledañas, alcanzando una zona de menor pendiente en cercanía de los arroyos.

En la comparación entre las Tablas 5.6 y 5.7 puede observarse zonas con aumento del riesgo de inundación para el escenario futuro, ya sea por aumento de los niveles y/o aumento de velocidades asociadas. Sin embargo, existen puntos con aumento de niveles y disminución de la velocidad asociada por efecto de remanso, situación que no reduce el nivel de amenaza del escenario actual.

### 5.6. Amenaza de inundación en cauces naturales

Para determinar la amenaza por inundación en los cauces naturales de la cuenca se utilizó un modelo multicriterio que relación el nivel máximo alcanzado en cada elemento con la velocidad asociada (Pilar et al., 2002; Gómez Valentín, 2007). De este modo el nivel de amenaza no está determinado únicamente por nivel de agua máximo alcanzado en cauce, ni por la velocidad máxima desarrollada, sino por la combinación simultanea de los mismos.

La matriz propuesta para la evaluación de los distintos niveles de amenaza se presenta en la Figura 5.17.

Nivel de desborde	mayor a 2m					
	de 1.5 a 2m					
	de 1 a 1.5m					
	de 0.5 a 1m					
	menor a 0.5m					
		menor a 1m/s	de 1 a 2m/s	de 2 a 3m/s	de 3 a 4m/s	mayor a 4m/s
		Velocidad				

**Referencias**

Sin amenaza

Bajo

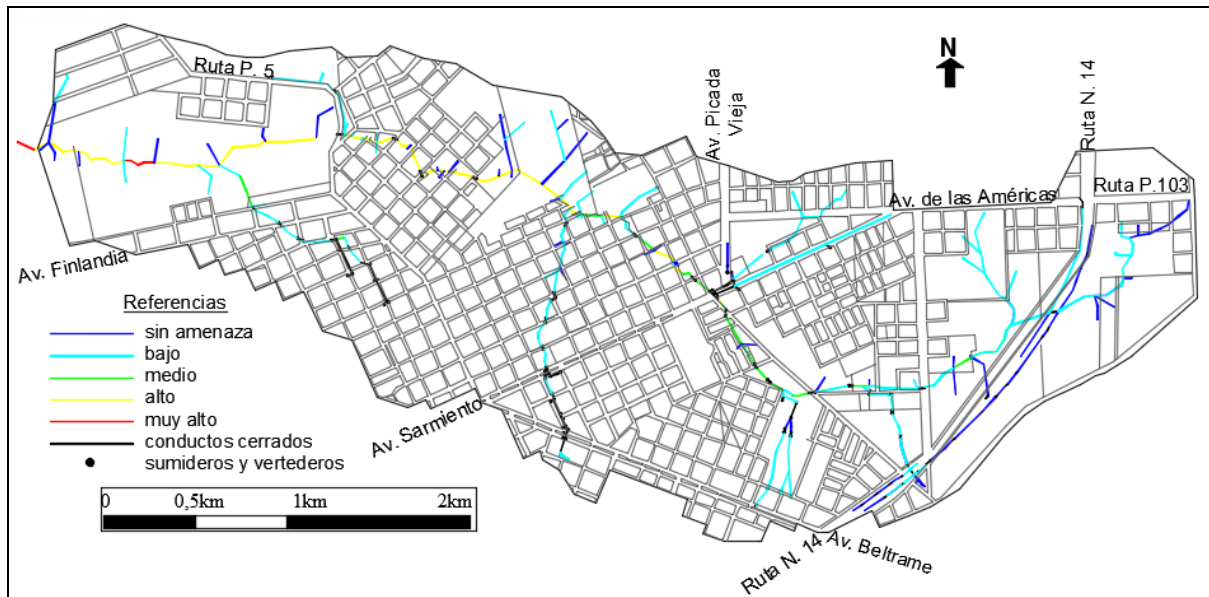
Medio

Alto

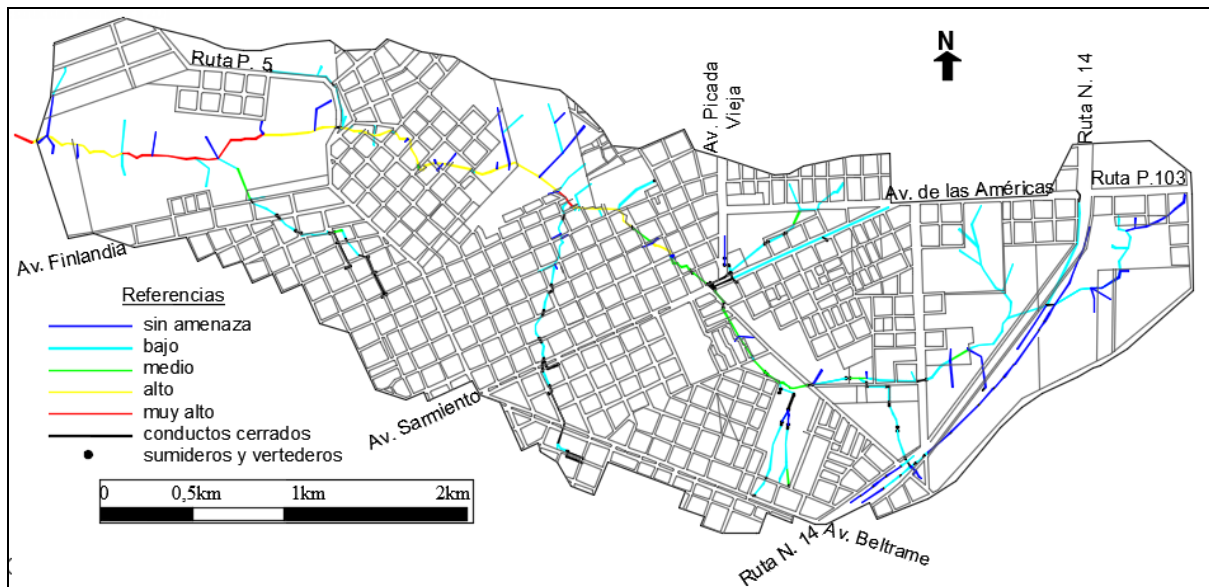
Muy alto

Figura 5.17. Matriz para definir los niveles de amenaza en cauces.

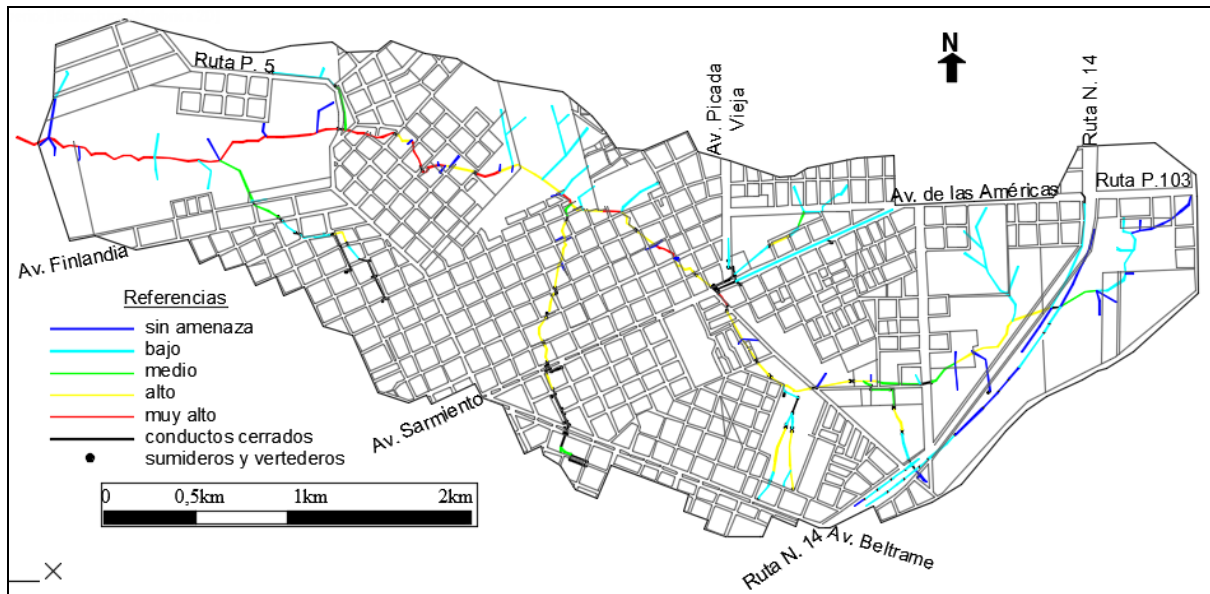
Las Figuras 5.18, 5.19 y 5.20 presentan los mapas de amenaza por inundación en cauces naturales para el escenario actual para 2, 5 y 100 años de recurrencia respectivamente. Mientras que las Figuras 7.21, 7.22 y 7.23 lo son para el hipotético escenario futuro.



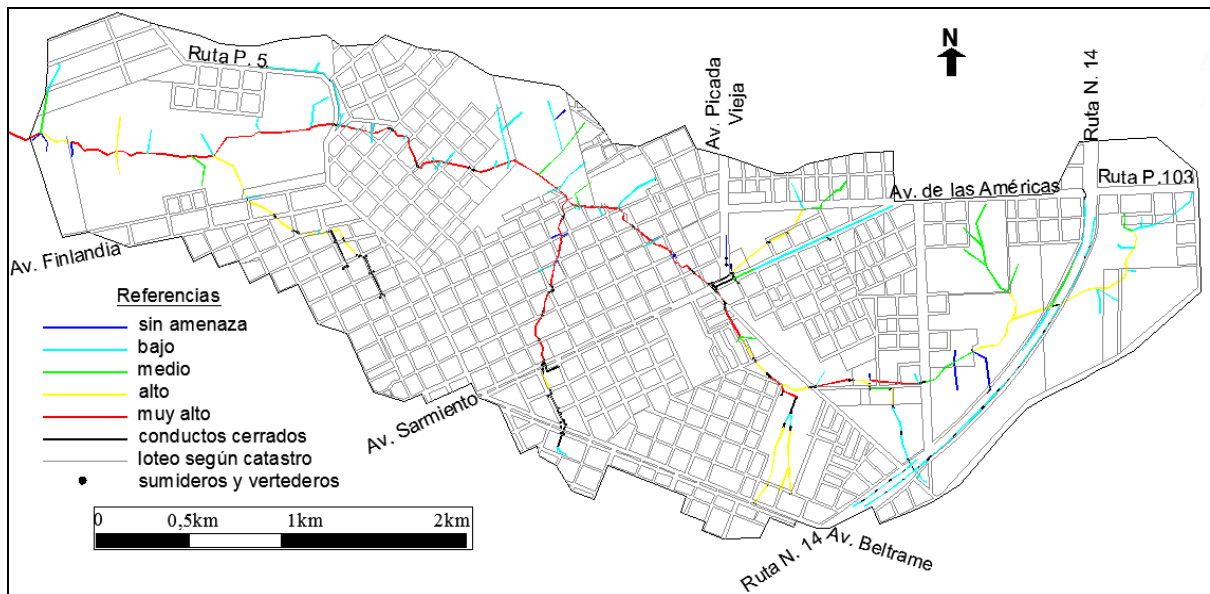
*Figura 5.18. Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.*



*Figura 5.19. Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia.*



*Figura 5.20. Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia.*



*Figura 5.21. Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 2 años de recurrencia.*

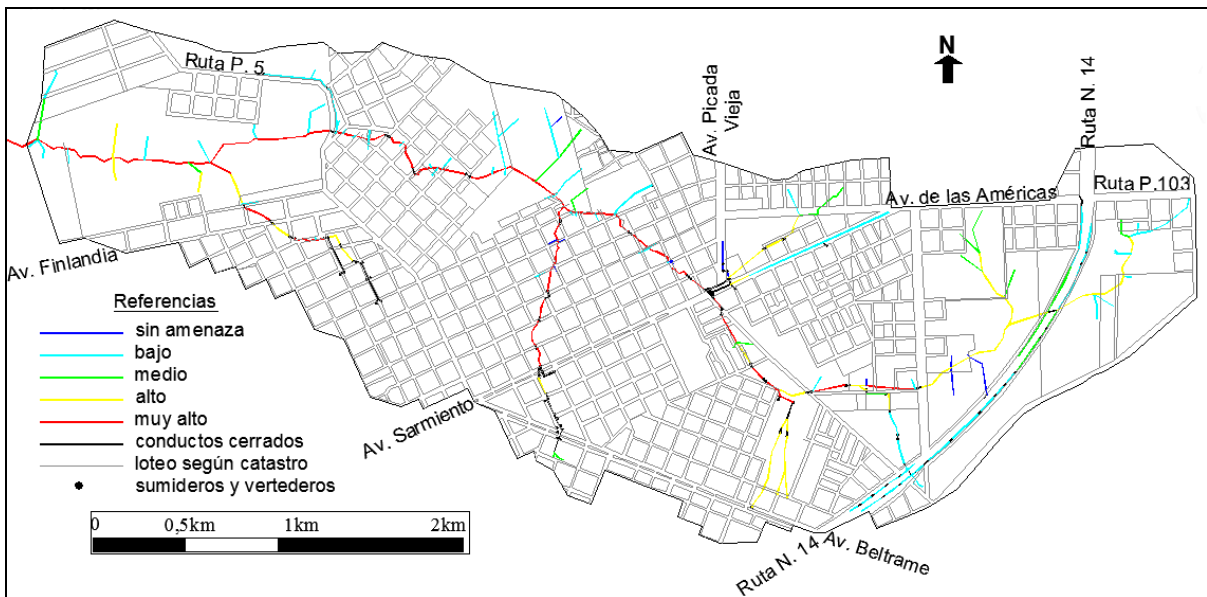


Figura 5.22. Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 5 años de recurrencia.

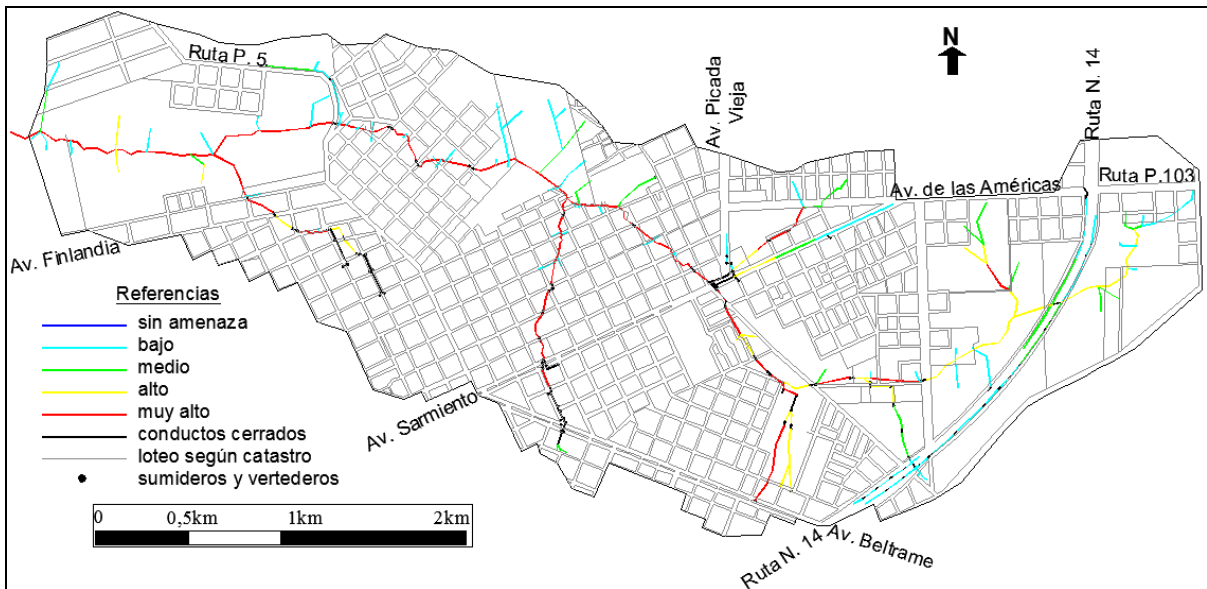


Figura 5.23. Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.

La Tabla 5.8 presenta los porcentajes de cauces con los distintos niveles de amenaza para las distintas recurrencias y escenarios.

Tabla 5.8. Amenaza por inundación en cauces naturales para humedad III, distintas recurrencias y escenarios.

Nivel de amenaza	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
Sin	27.3%	5.4%	-21.9%	26.3%	4.0%	-22.4%	18.2%	0.0%	-18.2%
Bajo	51.7%	37.0%	-14.8%	51.3%	34.1%	-17.3%	41.2%	32.6%	-8.6%
Medio	6.7%	13.7%	6.9%	6.9%	14.4%	7.6%	7.7%	17.6%	9.9%
Alto	13.2%	20.2%	7.0%	11.1%	21.1%	9.9%	20.3%	18.2%	-2.0%
Muy alto	1.1%	23.8%	22.7%	4.3%	26.4%	22.1%	12.6%	31.5%	18.9%

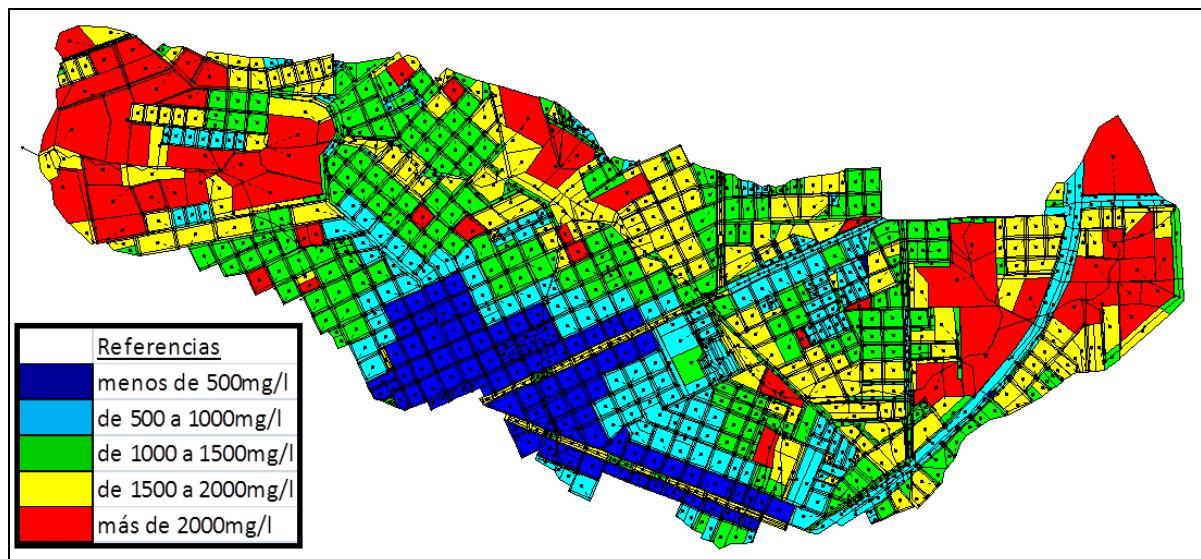
Para el escenario actual, el 72.7% de los cauces presenta amenaza de inundación para una recurrencia de 2 años y el 81.8% para 100 años, con altos porcentajes de cauces con niveles de amenaza alta y muy alta. Respecto al hipotético escenario futuro, el mismo presenta un aumento de los niveles de amenaza respecto del escenario actual, con un mayor aumento porcentual para recurrencia menores.

## 5.7. Vulnerabilidad a la erosión superficial

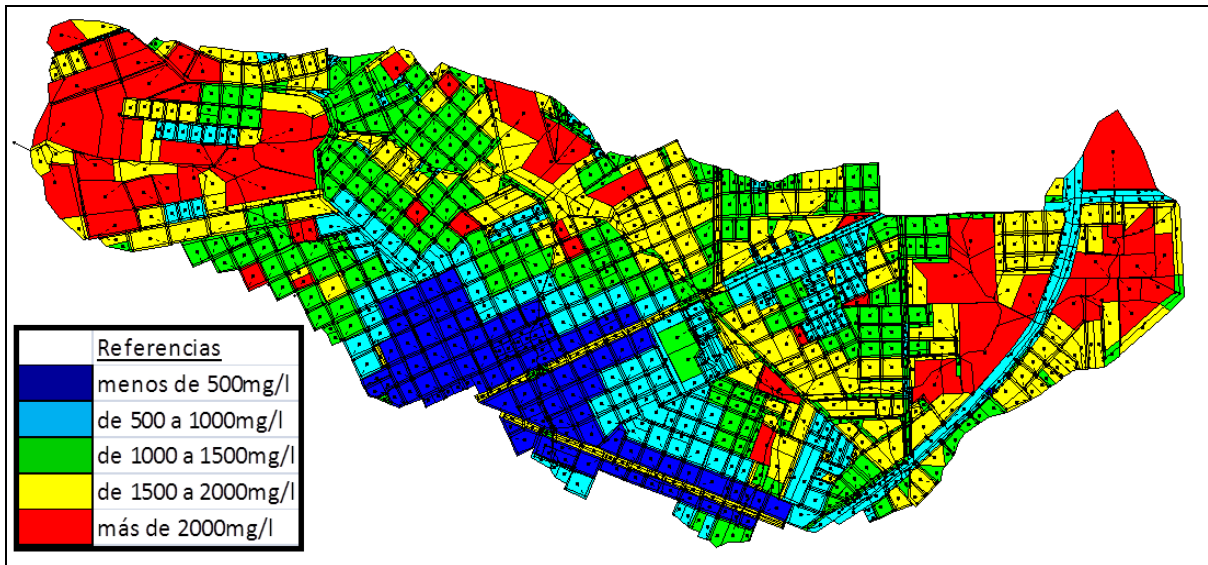
### 5.7.1. Erosión superficial mediante algoritmo del SWMM

Utilizando el algoritmo de producción de sedimentos del SWMM, el cual fue calibrado según lo desarrollado en el Capítulo 4, se procedió a confeccionar mapas de producción de sedimentos por erosión superficial en toda la cuenca Mbotaby.

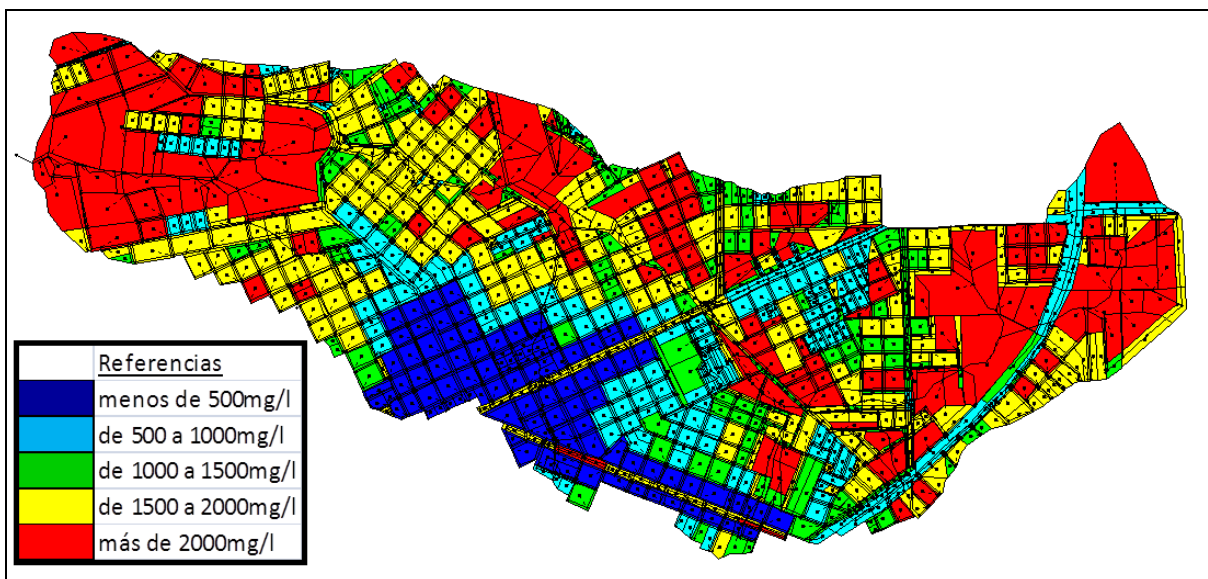
Las Figuras 5.24, 5.25 y 5.26 presentan, para el escenario actual, la producción máxima de sedimentos, determinada a través de la concentración de TSD en los caudales erogados por cada subcuenca, para las distintas recurrencias. Mientras que las Figuras 5.27, 5.28 y 5.29 los son para el hipotético escenario futuro.



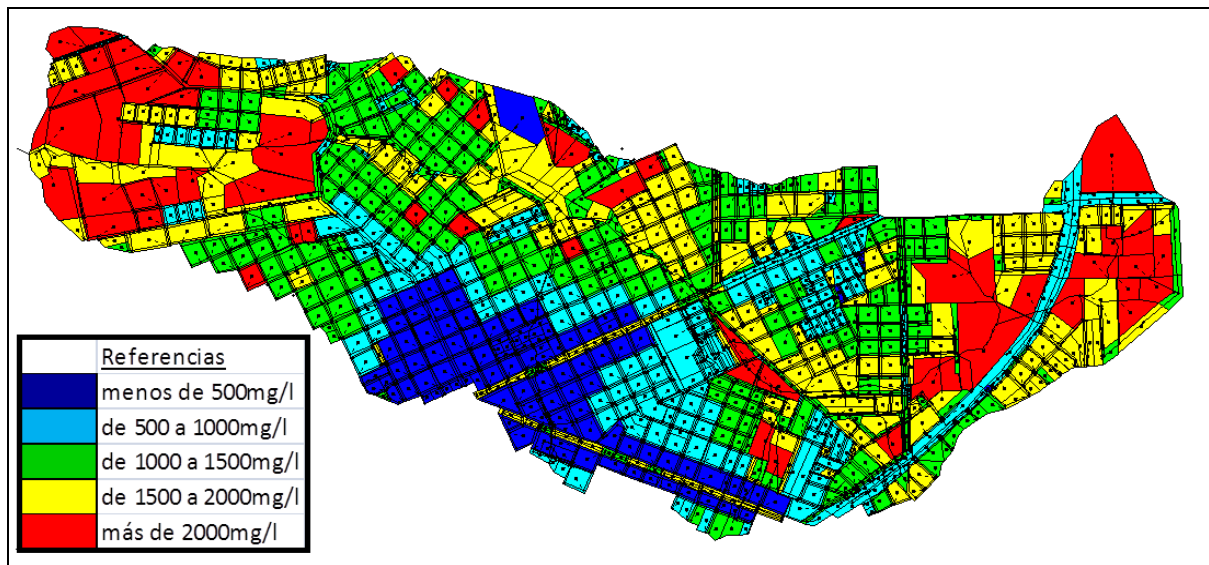
*Figura 5.24. TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.*



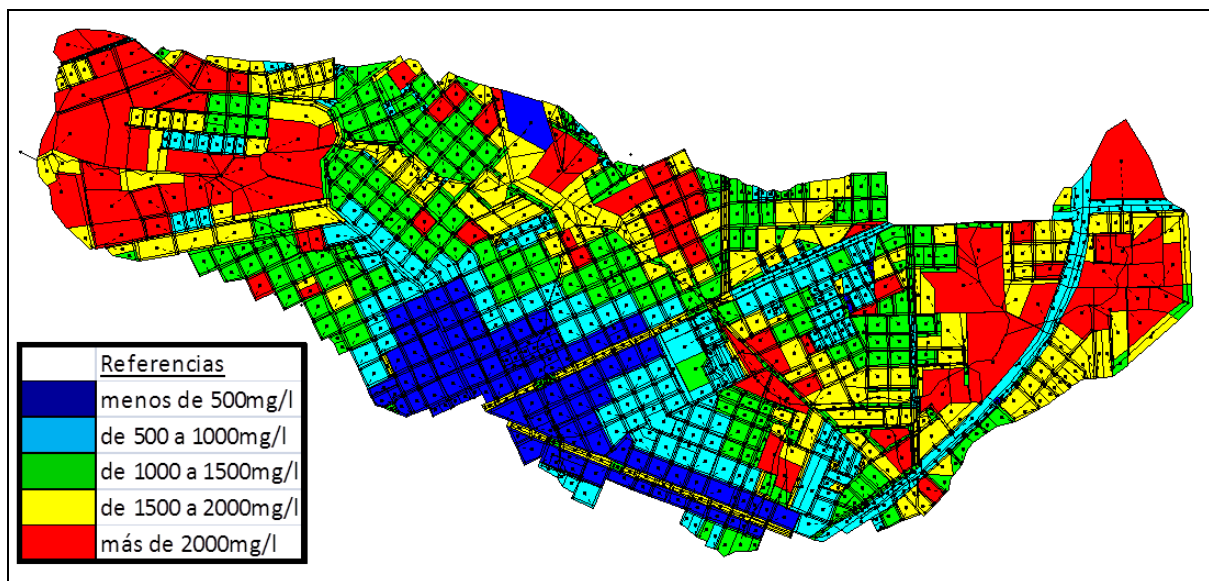
*Figura 5.25. TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia.*



*Figura 5.26. TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia.*



*Figura 5.27. TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario futuro y 2 años de recurrencia.*



*Figura 5.28. TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario futuro y 5 años de recurrencia.*

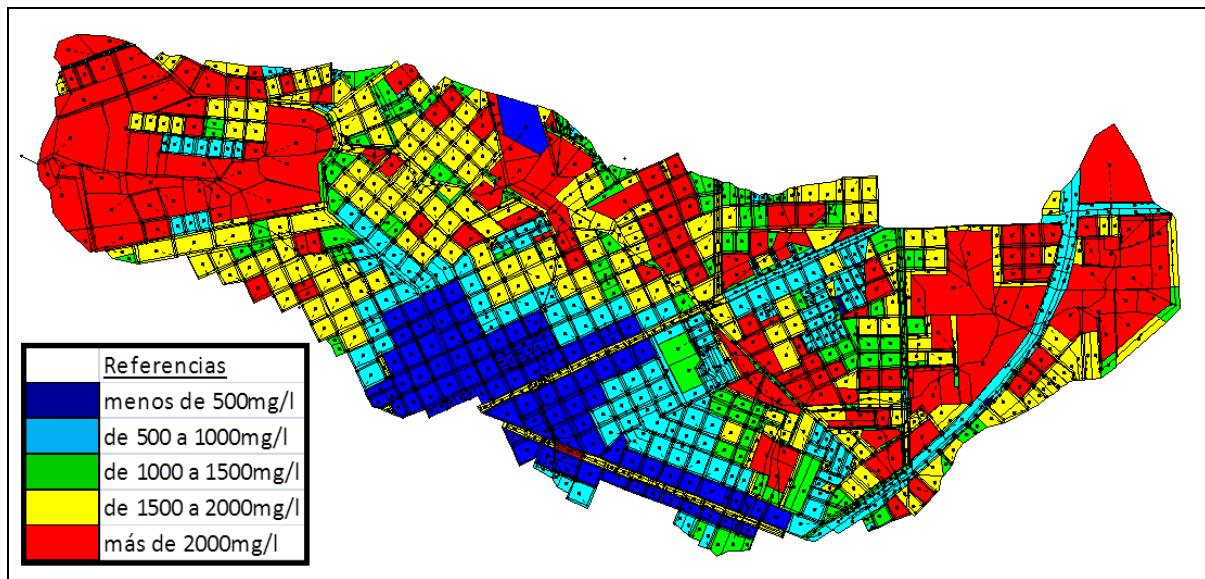


Figura 5.29. TSD máximos en el escurrimiento superficial por subcuencas para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.

Posteriormente, la integración de los polutogramas, en conjunto con los hidrogramas de salida de las diferentes subcuencas, permitió evaluar la producción total de sedimentos en función a las distintas zonificaciones. La Tabla 5.9 presenta las toneladas por hectárea promedio de producción de sedimentos para cada zonificación y las distintas recurrencias analizadas, tanto para el escenario actual como para el hipotético futuro, con una humedad antecedente III, evaluadas con el SWMM.

Tabla 5.9. Producción media de sedimentos por zonas para humedad III, distintas recurrencias y escenarios según SWMM [T/ha].

Zonas	Recurrencia 2 años			Recurrencia 5 años			Recurrencia 100 años		
	Precipitación total 99.9[mm]			Precipitación total 125.8[mm]			Precipitación total 201.2[mm]		
	Actual	Futuro	Diferencia	Actual	Futuro	Diferencia	Actual	Futuro	Diferencia
Distrito central	0.28	0.30	6.8%	0.30	0.32	6.2%	0.37	0.39	4.8%
Residencial de densidad alta	0.37	0.41	11.1%	0.45	0.49	8.7%	0.69	0.72	4.8%
Residencial de densidad media	0.54	0.59	9.9%	0.70	0.75	7.4%	1.18	1.23	3.9%
Residencial de densidad baja	0.69	0.78	13.5%	0.94	1.03	9.7%	1.71	1.79	4.8%
Loteos nuevos y zonas de intrusión	0.81	0.98	21.6%	1.13	1.32	16.2%	2.16	2.36	9.2%
Industrias	0.97	1.13	16.2%	1.33	1.49	11.8%	2.45	2.60	6.0%
Parques y canchas	0.90	0.90	0.0%	1.30	1.29	0.0%	2.55	2.54	0.0%
Plazoletas	0.85	0.85	0.0%	1.17	1.17	0.0%	2.20	2.20	0.0%
Reservas ecológicas	0.66	0.66	0.0%	0.96	0.96	0.0%	1.96	1.96	0.0%
Rutas asfaltadas	0.53	0.55	4.2%	0.69	0.71	2.3%	1.19	1.18	0.0%
Ruta de tierra	0.72	0.79	9.2%	0.98	1.04	6.6%	1.79	1.84	3.2%

La modelación de la producción de sedimentos por subcuencas permitió establecer que la zonificación con mayor tasa de producción de sedimentos es aquella con parques y canchas con 2.55T/ha para una humedad III y 100 años de recurrencia, mientras que el de menor

producción es el distrito central con 0.37T/ha, producciones que se ven incrementadas para el hipotético escenario futuro.

### 5.7.2. Erosión superficial mediante MUSLE

Si bien el SWMM permite evaluar la producción total de sedimentos por subcuencas, mediante la integración de los polutogramas e hidrogramas y generar mapas de producción máxima como los presentados anteriormente, para la evaluación de la producción total de sedimentos por subcuencas, resulta de mayor practicidad acoplar los resultados del modelo hidrológico-hidráulico con la MUSLE. En la Tabla 5.10 se exhiben las toneladas por hectárea promedio de producción de sedimentos para cada zonificación y las distintas recurrencias analizadas, tanto para el escenario actual como para el hipotético futuro, con una humedad antecedente III, evaluadas con la MUSLE.

**Tabla 5.10.** Producción media de sedimentos por zonas para humedad III, distintas recurrencias y escenarios según MUSLE [T/ha].

Zonas	Recurrencia 2 años			Recurrencia 5 años			Recurrencia 100 años		
	Precipitación total 99.9[mm]			Precipitación total 125.8[mm]			Precipitación total 201.2[mm]		
	Actual	Futuro	Diferencia	Actual	Futuro	Diferencia	Actual	Futuro	Diferencia
Distrito central	3.30	3.34	1.3%	3.99	4.03	1.0%	<b>6.11</b>	6.15	0.8%
Residencial de densidad alta	1.85	1.98	7.1%	2.27	2.40	5.7%	3.54	3.68	3.8%
Residencial de densidad media	1.30	1.46	12.6%	1.62	1.78	9.9%	2.60	2.76	6.3%
Residencial de densidad baja	0.93	1.14	22.6%	1.20	1.40	17.4%	1.99	2.20	10.9%
Loteos nuevos y zonas de intrusión	0.70	0.93	33.5%	0.92	1.15	25.1%	1.59	1.82	15.0%
Industrias	1.00	1.30	30.7%	1.30	1.61	24.0%	2.19	2.53	15.9%
Parques y canchas	0.81	0.81	0.2%	1.08	1.08	0.2%	1.90	1.90	0.3%
Plazoletas	1.31	1.34	2.3%	1.69	1.71	1.6%	2.81	2.84	1.0%
Reservas ecológicas	0.46	0.46	0.0%	0.64	0.64	0.0%	<b>1.19</b>	1.19	0.0%
Rutas asfaltadas	1.17	1.23	5.7%	1.48	1.54	4.5%	2.40	2.47	3.2%
Ruta de tierra	0.89	1.05	17.9%	1.15	1.31	13.8%	1.93	2.10	8.8%

En la Tabla 5.10 se aprecia que la zonificación con mayor tasa de producción de sedimentos para el escenario actual es el distrito central con 6.11T/ha para una humedad III y 100 años de recurrencia, mientras que la de menor producción son las reservas naturales con 1.19T/ha.

Además, se visualiza como, para todas las recurrencias, el escenario hipotético futuro exhibe un aumento de la producción de sedimentos, sobre todo en aquellas zonificaciones que presentan un significativo aumento de la impermeabilidad. En todas las zonas el aumento porcentual de los sedimentos es mayor para menores recurrencia.

Cabe remarcar aquí que, según los resultados expuestos en la Tabla 5.10, las rutas asfaltadas producen mayor cantidad de sedimento que las de tierra, lo que a priori podría evidenciarse

erróneo. Sin embargo no debe perderse de vista que la subcuenca referida a cada zonificación presenta una extensión territorial mayor a la exclusivamente destinada para la calzada, por lo que una mayor impermeabilización en la misma redundaría en mayores caudales sobre las superficies permeables a su alrededor, pudiéndose desarrollarse mayores erosiones en superficies y zanjas de tierra.

## 5.8. Vulnerabilidad a la erosión en cauces naturales

Utilizando los resultados de velocidades máximas en los cauces naturales del sistema mayor, arrojados por el modelo hidrológico-hidráulico, en combinación con los radios hidráulicos definidos mediante los niveles de agua asociados a las respectivas velocidades de dichos elementos se logró confeccionar mapas de tensiones de corte máximas, pudiendo visualizarse las zonas de mayor vulnerabilidad a la erosión de cauces para distintas recurrencias.

Para ello se utilizó la ecuación de tensión de corte en función a la velocidad citada en el Capítulo 2 según:

$$\tau = \gamma \frac{V^2 \eta^2}{R_h^{1/3}} \quad (2.39)$$

En las Figuras 5.30, 5.31 y 5.32 se visualizan las  $\tau_{\max}$  en los cauces naturales de la cuenca Mbotaby para el escenario actual, humedad antecedente III y distintas recurrencias. Mientras que las Figuras 5.33, 5.34 y 5.35 los son para el hipotético escenario futuro.

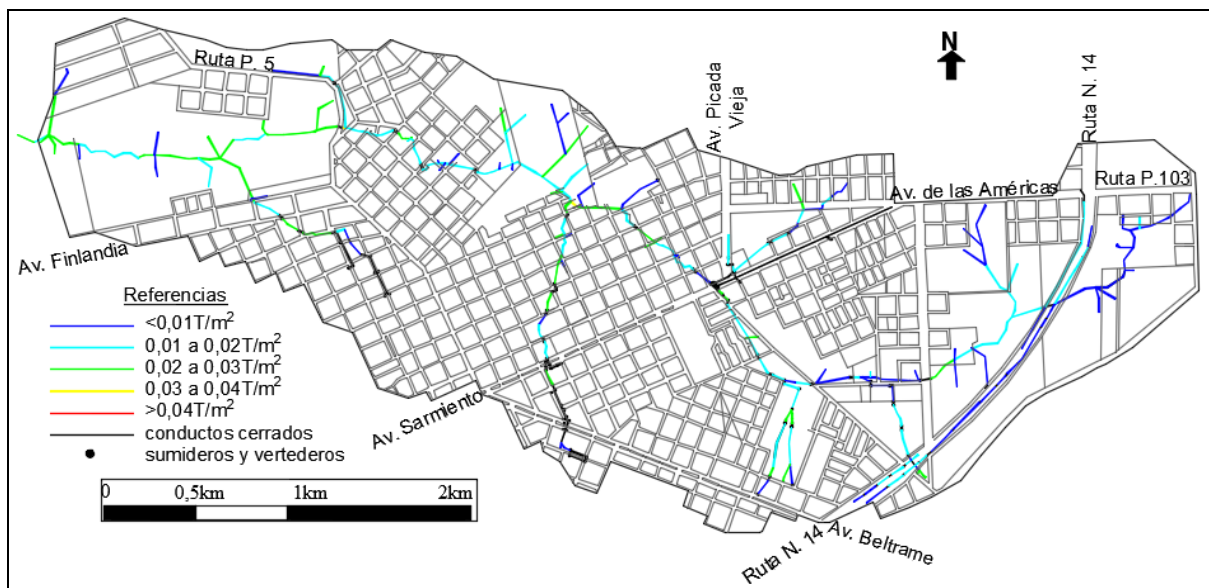
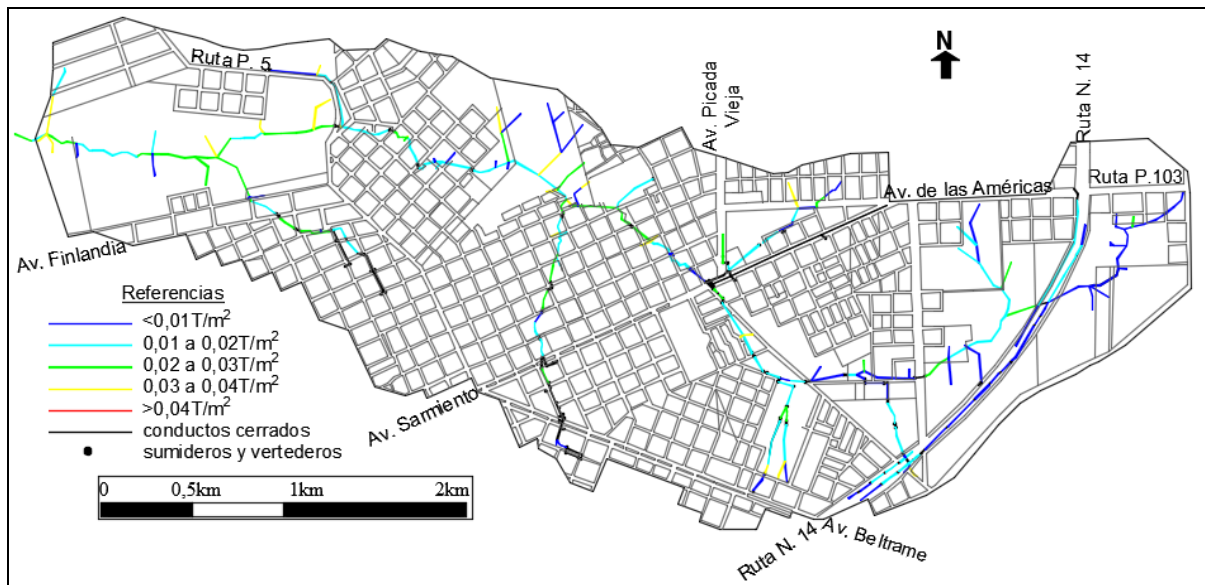
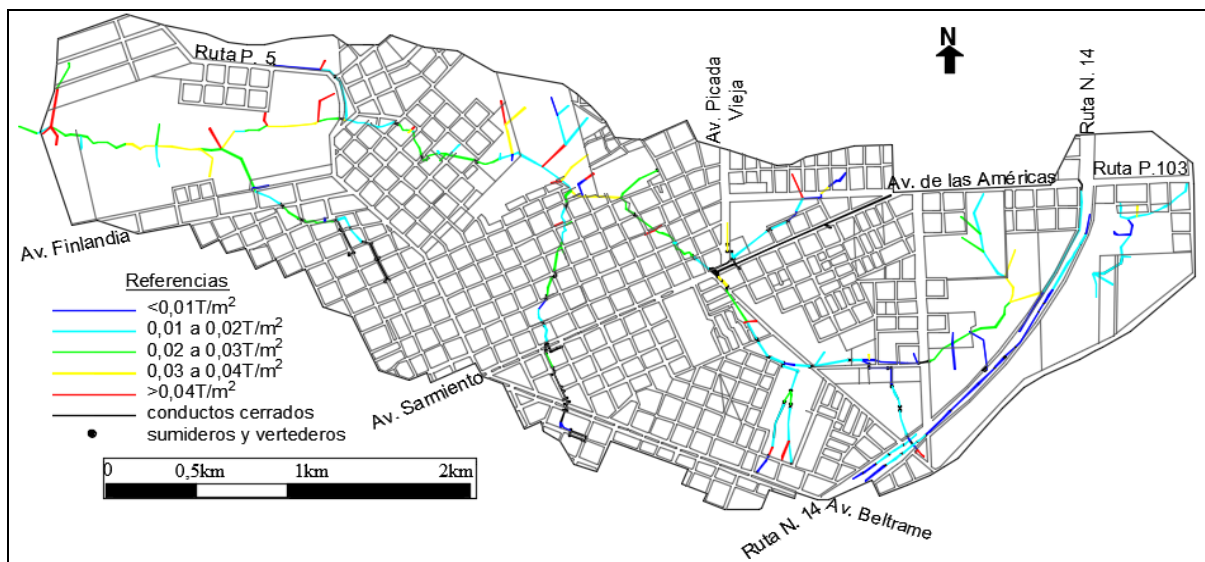


Figura 5.30. Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario actual y 2 años de recurrencia.



**Figura 5.31.** Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario actual y 5 años de recurrencia.



**Figura 5.32.** Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario actual y 100 años de recurrencia.

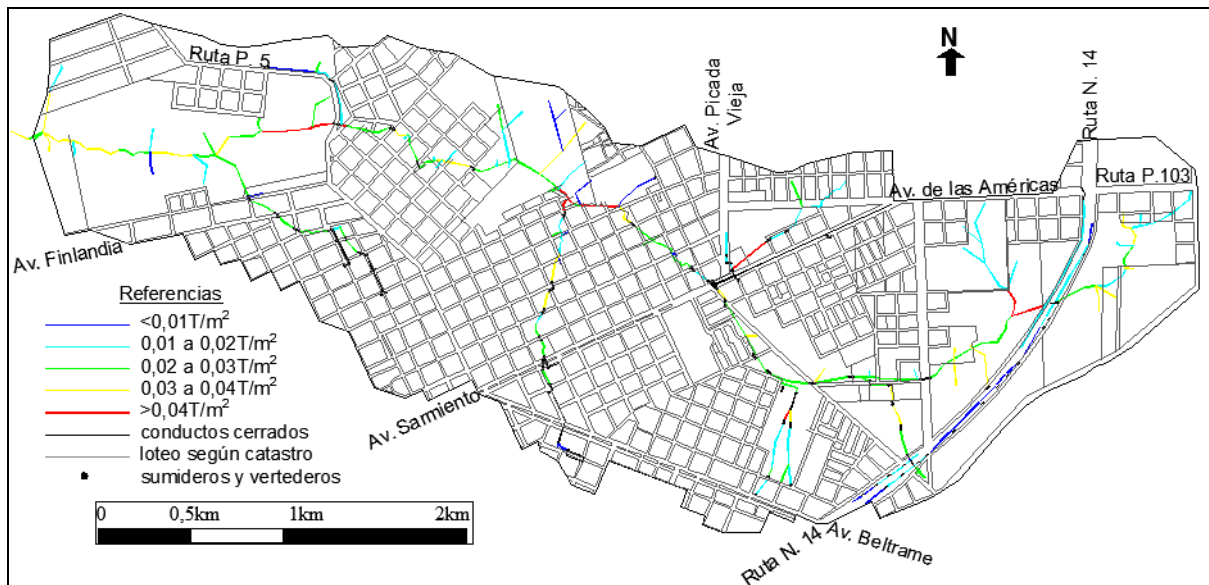


Figura 5.33. Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 2 años de recurrencia.



Figura 5.34. Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III escenario futuro y 5 años de recurrencia.

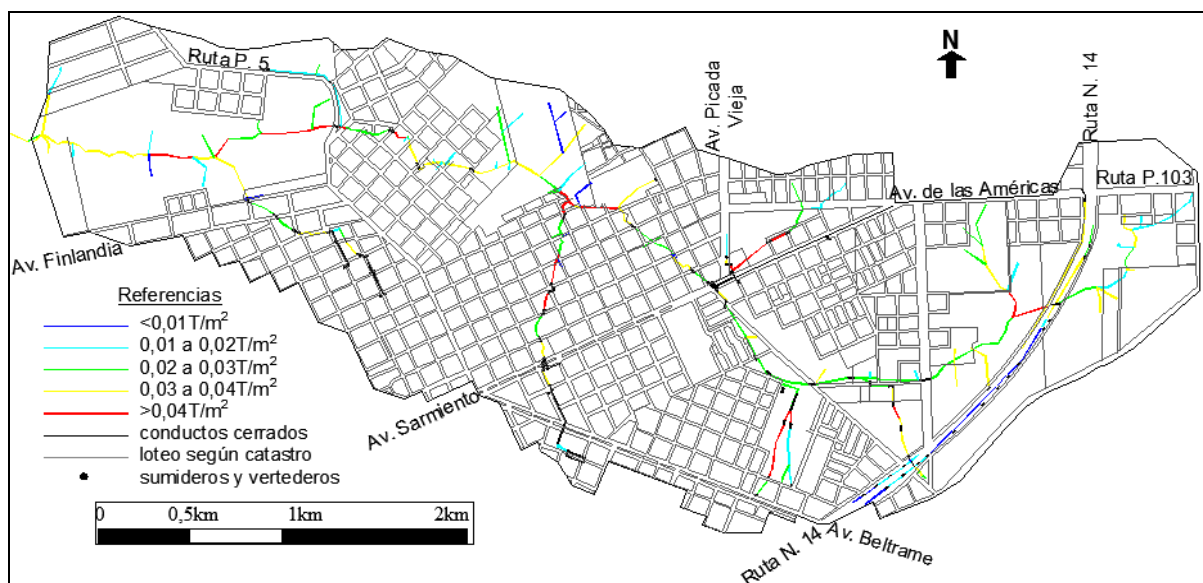


Figura 5.35. Tensiones de corte máximas en los cauces naturales para humedad III, escenario futuro y 100 años de recurrencia.

En la Tabla 5.11 se exhiben los porcentajes de cauces afectados por cada rango de tensión de corte máxima para los distintos escenarios y recurrencias.

Tabla 5.11. Tensión de corte máxima en cauces naturales para distintas recurrencias y escenarios.

Tensión de corte máxima	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
menos de $0,01 T/m^2$	36.7%	12.1%	-24.6%	33.1%	10.1%	-23.0%	18.8%	8.9%	-9.9%
de $0,01 a 0,02 T/m^2$	39.9%	32.2%	-7.7%	37.9%	21.8%	-16.1%	37.8%	18.7%	-19.1%
de $0,02 a 0,03 T/m^2$	23.1%	32.0%	8.8%	20.2%	37.1%	17.0%	22.5%	28.9%	6.4%
de $0,03 a 0,04 T/m^2$	0.3%	16.9%	16.7%	8.8%	22.3%	13.5%	12.3%	30.9%	18.6%
más de $0,04 T/m^2$	0.0%	6.8%	6.8%	0.0%	8.7%	8.7%	8.7%	12.6%	3.9%

La Tabla 5.11 demuestra lo que se puede vislumbrar en las figuras precedentes. Cauces en su mayoría con altos valores de tensión de corte para todas las recurrencias y un aumento en el escenario hipotético futuro respecto del actual. Nuevamente, el aumento porcentual es mayor a menores recurrencias.

### 5.9. Total de sedimentos erogados por evento de diseño

Para la estimación del total de sedimentos erogados por la cuenca Mbotaby, ante eventos pluviográficos de diseño, se modelaron en total 18 escenarios diferentes. Tanto para el escenario actual como para el hipotético futuro, se realizó la modelación con humedades antecedentes diferentes, y cada uno de ellos con eventos de 2, 5 y 100 de recurrencia según:

- Para los escenarios con humedad antecedente tipo I, se hizo correr el modelo con 23 días previos sin precipitación, el cual se presenta como el mayor periodo sin precipitaciones previas en los eventos utilizados para la calibración del modelo de producción de sedimentos, recordando que cuanto mayor es el número de días previos sin precipitación, mayores serán los sedimentos acumulados en las superficies impermeables, y mayor la cantidad de sedimentos esperada en ser lavado por el flujo hídrico.
- Mientras que para los escenarios con humedades antecedentes tipo II y III se hizo correr el modelo con 5 días previos sin precipitación, para alcanzar así la mayor cantidad de sedimentos acumulados en áreas impermeables, en el máximo periodo de tiempo propuesto por Chow (1994) para definir una humedad antecedente media o húmeda.

En la Figura 5.36 se presentan los polutogramas de TSD en la salida de la cuenca, para distintos escenarios y humedades antecedentes, para una tormenta de 2 años de recurrencia. Mientras que las Figuras 5.37 y 5.38 los son para 5 y 100 años de recurrencia respectivamente.

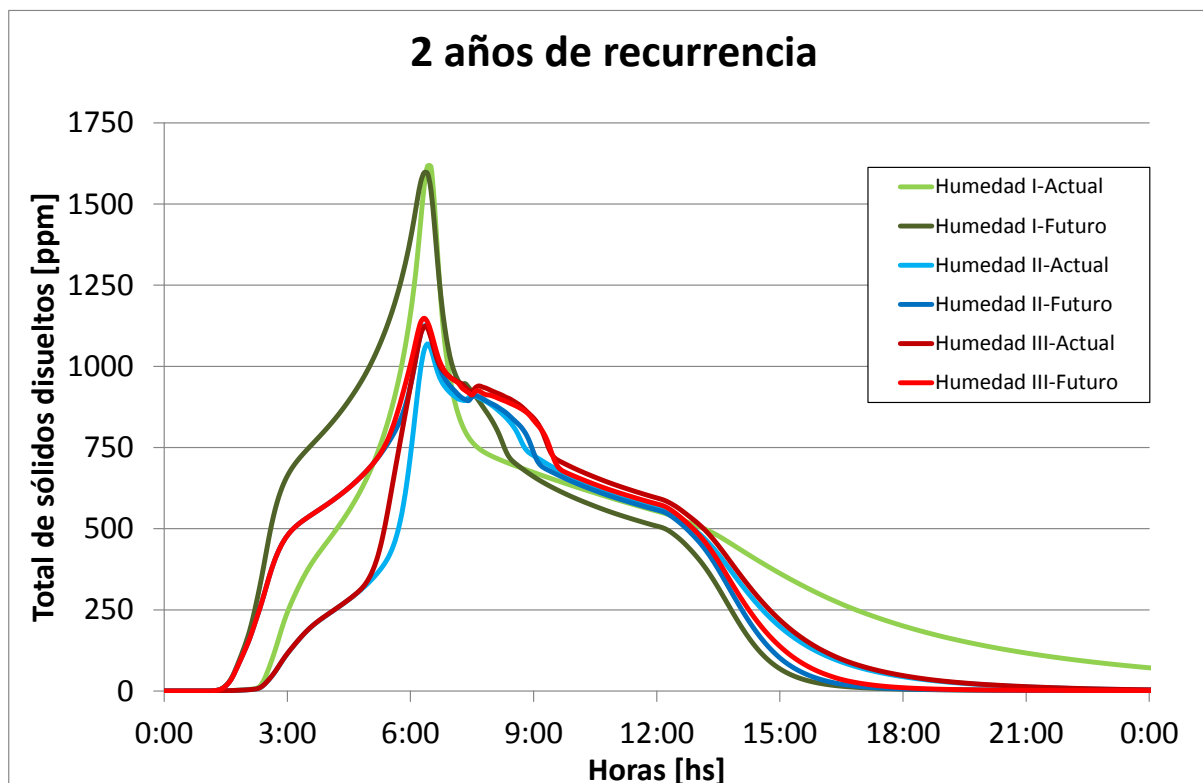


Figura 5.36. Polutograma en la salida de la cuenca para 2 años de recurrencia, distintas humedades y escenarios.

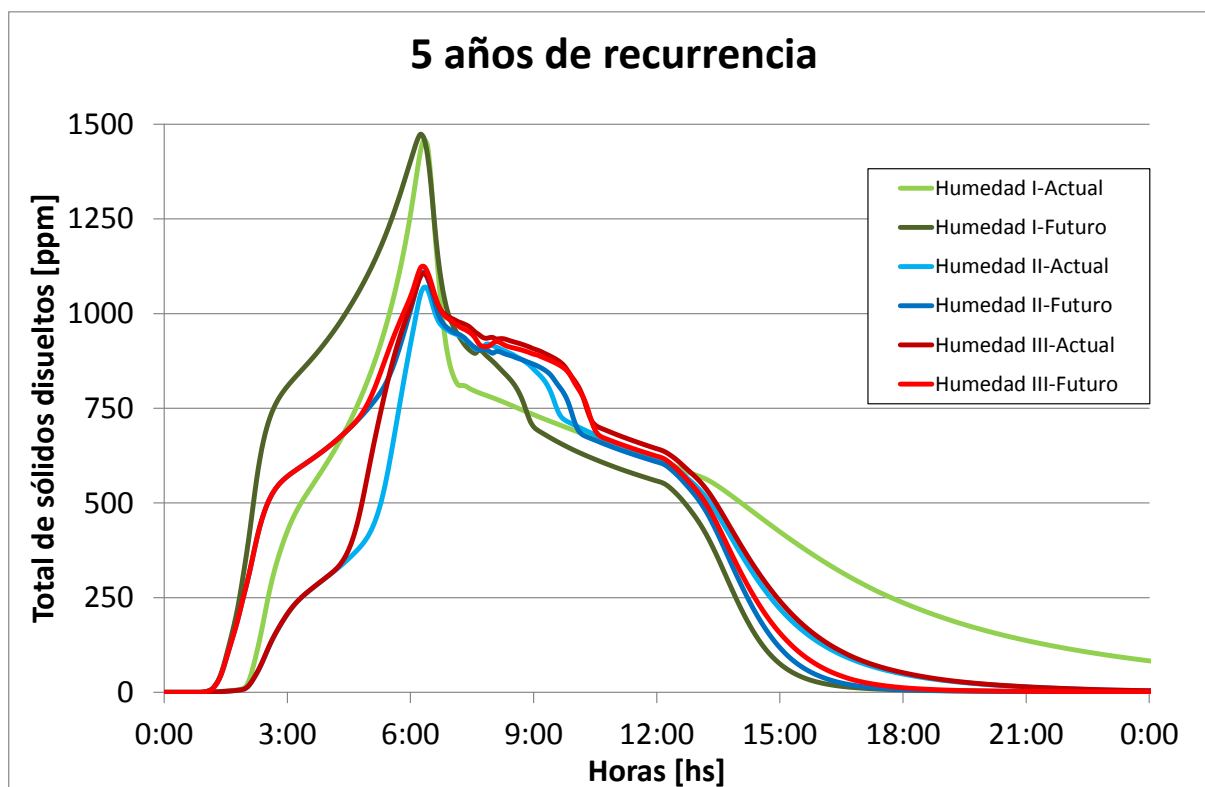


Figura 5.37. Polutograma en la salida de la cuenca para 5 años de recurrencia, distintas humedades y escenarios.

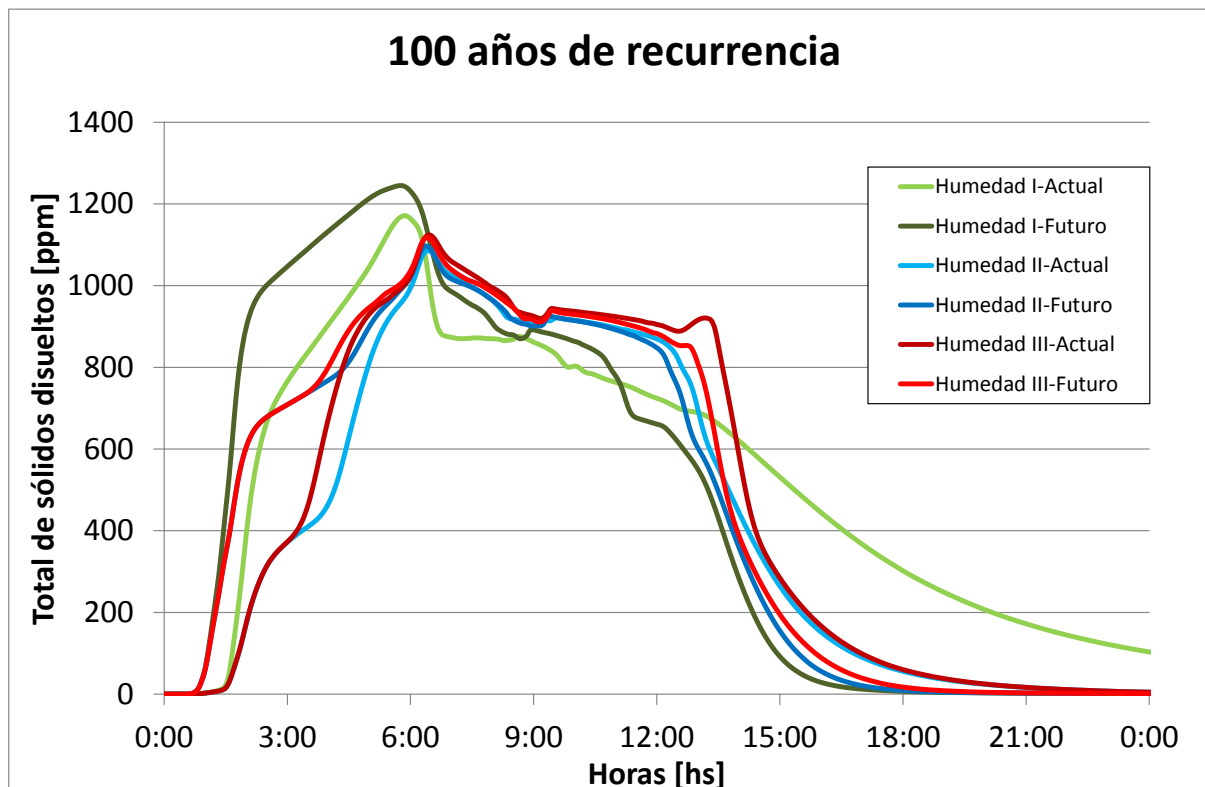


Figura 5.38. Polutograma en la salida de la cuenca para 100 años de recurrencia, distintas humedades y escenarios.

En las figuras presentadas anteriormente puede visualizarse como, para todas las humedades y escenarios modelados, a menores recurrencias mayores la concentración de sedimentos en

el flujo hídrico en el punto de control de la cuenca. Además, en general para todas las humedades antecedentes, los niveles máximos de TSD coinciden en el escenario actual y el hipotético futuro. Puede observarse también que, para todas las humedades y recurrencias, el escenario actual presenta una rama ascendente retrasada en el tiempo y una rama descendente más extensa respecto del escenario futuro.

La máxima concentración resulta para el escenario actual, 2 años de recurrencia y una humedad I, la cual asciende a 1600ppm. Fenómeno que coincide con la teoría del primer flujo descrito en el Capítulo 2.

En la Tabla 5.12 se exhiben los volúmenes de escurrimiento superficial y el total de sedimentos erogados determinados por integración del polutograma e hidrogramas del SWMM en el punto de control, para distintas humedades y escenarios. Mientras que la Tabla 5.13 presenta los valores calculados a partir de la MUSLE.

*Tabla 5.12. Total de sedimentos [T] erogados para distintas recurrencias, humedades y escenarios determinados por el SWMM.*

Humedad antecedente	Recurrencia 2 años			Recurrencia 5 años			Recurrencia 100 años		
	Precipitación total 99.9 [mm]			Precipitación total 125.8 [mm]			Precipitación total 201.2 [mm]		
	E. Actual	E. Futuro	Diferencia	E. Actual	E. Futuro	Diferencia	E. Actual	E. Futuro	Diferencia
I	271	592	118.1%	264	764	189.2%	847	1334	57.4%
II	486	625	28.6%	690	847	22.7%	1400	1565	11.8%
III	649	724	11.5%	863	966	12.0%	1664	1724	3.6%

*Tabla 5.13. Total de sedimentos [T] erogados para distintas recurrencias, humedades y escenarios determinados por la MUSLE.*

Humedad antecedente	Recurrencia 2 años			Recurrencia 5 años			Recurrencia 100 años		
	Precipitación total 99.9 [mm]			Precipitación total 125.8 [mm]			Precipitación total 201.2 [mm]		
	E. Actual	E. Futuro	Diferencia	E. Actual	E. Futuro	Diferencia	E. Actual	E. Futuro	Diferencia
I	182	509	180%	264	667	153%	585	1153	97%
II	506	685	35%	690	874	27%	1246	1449	16%
III	664	784	18%	863	981	14%	1453	1576	8%

La Tabla 5.14 presenta una comparación del total de sedimentos determinados por la MUSLE y el SWMM, para distintas recurrencias y humedades para el escenarios actual. Además, exhibe los valores de escurrimiento superficial para las distintas corridas. Seguidamente la Tabla 5.15 lo es para el hipotético escenario futuro.

**Tabla 5.14.** Comparación MUSLE-SWMM de producción total de sedimentos por eventos de diseño para distintas recurrencias y humedades del escenario actual.

Humedad antecedente	Recurrencia 2 años				Recurrencia 5 años				Recurrencia 100 años			
	Precipitación total 99.9 [mm]				Precipitación total 125.8 [mm]				Precipitación total 201.2 [mm]			
	Esc. Sup.	MUSLE	SWMM	Dif.	Esc. Sup.	MUSLE	SWMM	Dif.	Esc. Sup.	MUSLE	SWMM	Dif.
	[mm]	[T]	[T]	[%]	[mm]	[T]	[T]	[%]	[mm]	[T]	[T]	[%]
I	30.4	182	271	49.0	45.1	264	396	50.0	95.0	585	847.3	44.8
II	56.1	506	486	-4.0	78.2	690	699	1.3	146.5	1246	1400	12.4
III	71.0	664	649	-2.2	95.5	863	893	3.5	168.7	1453	1664	14.5

**Tabla 5.15.** Comparación MUSLE-SWMM de producción total de sedimentos por eventos de diseño para distintas recurrencias y humedades del escenario futuro.

Humedad antecedente	Recurrencia 2 años				Recurrencia 5 años				Recurrencia 100 años			
	Precipitación total 99.9 [mm]				Precipitación total 125.8 [mm]				Precipitación total 201.2 [mm]			
	Esc. Sup.	MUSLE	SWMM	Dif.	Esc. Sup.	MUSLE	SWMM	Dif.	Esc. Sup.	MUSLE	SWMM	Dif.
	[mm]	[T]	[T]	[%]	[mm]	[T]	[T]	[%]	[mm]	[T]	[T]	[%]
I	55.8	509	592	16.3	74.5	667	764	14.6	133.5	1153	1334	15.7
II	70.3	685	625	-8.8	93.5	874	847	-3.0	163.9	1449	1565	8.0
III	79.0	784	724	-7.6	103.9	981	966	-1.5	177.5	1576	1724	9.4

En las tablas anteriores puede apreciarse como tanto para la MUSLE como el SWMM, a mayores recurrencias y humedades antecedentes, mayores son los volúmenes totales de sedimentos erogados por la cuenca. Los dos modelos de producción de sedimentos presenta aumento del total de sedimentos para todas las humedades y recurrencias en el escenario hipotético futuro respecto del actual. En general, el SWMM presenta mayores volúmenes de sedimentos para una humedad antecedentes I y menores para humedades II y III, respecto de la MUSLE.

Si bien para menores recurrencias y humedad antecedente I las concentraciones son mayores, los mayores volúmenes totales de sedimentos erogados por la cuenca se presentan para mayores recurrencias y una humedad III. El máximo valor resultante para el escenario actual es de 1453T y 1664T según la MUSLE y el SWMM respectivamente. Valores que se ven incrementado ante un hipotético escenario futuro.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES

La modelación hidrológica-hidráulica de la cuenca Mbotaby en la ciudad de Oberá, Misiones, ha posibilitado avanzar en el estudio de la dinámica de los excedentes hídricos superficiales de cuencas urbanas de alta pendiente. Además, el acople del modelo de transformación lluvia-caudal con modelos de producción de sedimentos, permitió avanzar en la determinación de la producción de sedimentos por erosión hídrica en cuencas urbana de la zona serrana de Misiones.

A los efectos de establecer una evaluación de amenaza de inundación y vulnerabilidad a la erosión en un ambiente físico urbano donde convergen precipitaciones de elevados módulos pluviométricos y pendientes topográficas elevadas, se ha llevado a cabo el desarrollo y aplicación de una metodología basada en la simulación hidrológica-hidráulica de escurrimiento a superficie libre acoplado a modelo de producción de sedimentos.

Con resultados satisfactorios el SWMM, han demostrado ser una herramienta eficaz y de fácil aplicación para la modelación hidrosedimentológica de cuencas urbanas de altas pendientes, con suelos limo-arcillosos y sometidas a intensas precipitaciones. De manera similar, la aplicación de la USLE y la MUSLE, en combinación con el SWMM, han arrojado resultados satisfactorios para evaluar la erosión en cuencas urbanas, siendo que las mismas han sido diseñadas para parcelas rurales.

Se considera un logro metodológico que con herramientas de modelación de media complejidad y mediciones de escurrimiento líquido y de sedimentos durante 2 años se pueda establecer una satisfactoria descripción de los procesos estudiados.

La evidencia física comprobada durante eventos lluviosos acerca de paulatinos aumentos de niveles de agua en calle, velocidades y caudales, como así también de procesos erosivos asociados, en cuencas con la dinámica hídrica como la estudiada, indica la necesidad de estudiar detalladamente los mecanismos del escurrimiento superficial en esta cuencas cuando, históricamente, no han sido objeto de estudio prioritario, por poseer una aparente gran capacidad de producir pérdidas al escurrimiento y un sistema natural de veloz concentración y erogación de los excedentes hídricos superficiales

---

Para describir el escurrimiento fue necesario un modelo que permita una constitución con alto nivel de detalle, debido a la gran influencia que poseen las pendientes de las calles en la dinámica del escurrimiento superficial. El modelo ha demostrado un aceptable desempeño para la estimación de parámetros del flujo necesarios para la evaluación de erosión hídrica en cuencas urbanas. De la diferencia entre los volúmenes registrado y modelado, tanto de escurrimiento superficial como de sedimentos, y el valor de todos los parámetros de bondad ajuste utilizados se infiere que los modelos implementados presentan un aceptable ajuste.

Se comprueba que en cuencas como la de estudio, la evaluación por amenaza de inundación no está dictada por la combinación de niveles de agua alcanzados y su permanencia, dado que la topografía facilita la salida de los caudales permitiendo el pronto retorno de los evacuados a sus viviendas. Tal evaluación se rige por la combinación de niveles y velocidades alcanzados simultáneamente, situación que facilita el arrastre de personas y animales, como la destrucción parcial de vehículos y construcciones.

Respecto al total de sedimentos erogados por la cuencas calculados a partir de una extrapolación a un año medio de las mediciones realizadas, se determinó que la misma presenta valores semejantes a los máximos calculados por aplicación de la USLE, lo que hace inferir que, de todas aquellas teóricas evaluadas referentes a los distintos parámetros de la USLE, la región presenta un comportamiento más cercano a aquellas que arrojan mayores volúmenes de sedimentos.

La erogación anual de sedimentos para toda la cuenca Mbotaby, mediante aplicación de la USLE, se encuentra en un rango de entre 1.62 y 6.44T/ha (2.14 y 8.47T/ha para áreas permeables). Dichos valores se enmarcan dentro de la clase de erosión “baja”, según la clasificación propuesta por Ligier et al. (2004), la cual se establece para pérdidas de suelo menores a 40T/(ha año), sin perder de vista que dicha clasificación hace referencia a un máximo potencial de erosión, es decir suelos desnudos sin prácticas de conservación.

En lo que respecta a erogación de sedimentos por tormenta o tipificada en este trabajo como producción neta, se verifica una incipiente tendencia lineal entre la lluvia neta de cada evento y la erogación total de sedimentos en un rango de lluvias totales de hasta 160mm con duración de 12 horas. Se entiende de suma utilidad esta relación hallada para diseños expeditivos de estructuras de control de flujo líquido y concentración de sedimentos en ambientes urbanizados con semejanza climática, morfológica e hidrosedimentológica como la de la cuenca en estudio.

Del total de escenarios modelados, el rango de precipitaciones netas vario entre 30.4 y 177.5mm, produciendo sedimentos, según la MUSLE entre 0.19 y 1.61T/ha; y según algoritmos del SWMM entre 0.28 y 1.77T/ha.

Se ha demostrado que, en caso de mantenerse las tendencias de expansión urbanística y aumento de superficies impermeables, tanto la amenaza por inundación como los procesos de erosión se verán incrementados, sobre todo para eventos frecuentes, agudizando las afectaciones negativas de las numerosas tormentas ocurrentes en la región.

Los resultados obtenidos demuestran la necesidad de, para una adecuada gestión del sistema de desagüe pluvial, evaluar tormentas en todo el rango de recurrencias, con distintas humedades antecedentes, ya que cada escenario presenta condiciones desfavorables para los distintos fenómenos necesarios a contemplar en la planificación del desagüe pluvial y la conservación de la cuenca. Se estima que los mapas resultantes de este estudio serán un importante aporte para avanzar en la construcción de un plan director de gestión integrada de los recursos hídricos superficiales hoy inexistente en la ciudad de Oberá.

Como recomendaciones del presente trabajo, surge la necesidad de continuar con los registros durante los eventos pluviográficos a fin de alcanzar la máxima variedad de tormentas posibles de ser evaluadas, considerando la variación de los parámetros de respuesta del sistema en función tanto de la lámina total precipitada como de la distribución temporal de la misma. Un mayor número de tormentas evaluadas permitirá mejorar la calibración-validación de los modelos implementados.

Si bien este análisis realizado para la cuenca Mbotaby, resulta factible de proyectar a otras cuencas urbanas de la ciudad de Oberá y localidades con características fisiográficas y de usos del suelo similares, es menester monitorear y calibrar modelos hidrosedimentológicos de otras cuencas pilotos, con el objetivo de comparar resultados y evaluar la influencia de las características fisiográficas de las cuencas en la respuesta del sistema. La medición sistemática de diferentes cuencas piloto en la región, permitiría la formulación de una ecuación que rijan las relaciones entre las características físicas de las cuencas y los coeficientes empíricos de respuesta hidrosedimentológica de los distintos modelos.

Aunque la zona céntrica de la ciudad presenta un alto grado de impermeabilidad (85%), el total de áreas impermeables de la cuenca es de solo 23.9%, lo que favorece la adopción de medidas estructurales y, sobretudo, no estructurales, para controlar y mitigar los impactos por

inundación. Necesitándose para ello continuar las investigaciones acerca de la respuesta actual del sistema y su comportamiento ante posibles escenarios futuros.

### **Lineas de trabajo a futuro cercano**

Avanzar en el mejoramiento de la determinación de los campos de velocidades del escurrimiento superficial dentro del dominio espacial de la cuenca, para lo cual se estima la técnica PIV (Particle Image Velocimetry) como pertinente para la medición simultánea dentro del dominio espacial de trabajo y en la condiciones de borde.

Si bien los trabajos de mediciones de producción de sedimentos han sido numerosos e inéditos en la región, se necesita proseguir con tales mediciones dentro del dominio espacial, específicamente en puntos de control internos representativos de los distintos usos y ocupaciones del suelo.

Avanzar hacia una sistematización de las mediciones de escurrimiento líquido y sólido en conjunto con otros organismos universitarios y gubernamentales a fin de aportar más certeza a la descripción de los mecanismos hidrosedimentológicos dominantes.

Se pretende en el mediano plazo avanzar en la aplicación de modelos hidrosedimentológicos de base física que contemplen mecanismos tanto de generación, movilización y removilización de sedimentos, como así también de transporte de los mismos en los cursos de agua de mayor jerarquía.

Incorporar a mediano plazo estimaciones de series anuales de producción de escurrimiento y sedimentos contemplando predicciones de cambio climático.

## CAPÍTULO 7

### BIBLIOGRAFÍA

ABT S., WITTLER R. y TAYLOR A. (1989). "Predicting Human Instability in Flood Flows". Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, New York. 70-76.

ALVAREZ DÍAS C. (1996) "Aportaciones metodológicas al estudio de la contaminación litoral originada por vertidos y alivios procedentes de redes de saneamiento urbano". Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria Santander, España.

ALMOROX ALONSO J., LÓPEZ BERMÚDEZ F. y RAFAELLI S. (2010). "La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación". Ed.: Ediciones de la Universidad de Murcia (edit.um). ISBN 978-84-8371-626-7. 384p.

ARANDES R. (1992). "Planteamiento urbanístico y drenaje urbano". En "Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España.

ARNOLD J., WILLIAMS J., NICKS A. y SAMMONS N. (1989). "SWRRB, a basin scale simulation model for soil and water resources management". Texas A&M Press, College Station, Texas, US.

ARNOLD J., SRINIVASAN R., MUTTIAH R. y WILLIAMS J., (1998). "Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. Journal of American Water Resources Association, N°34(1), 73-89.

ARON G. (1993). "Modeling of infiltration and other losses". En CAO C., YEN B. y BENEDINI M. "Urban storm drainage". Waters Resources Publications. Colorado, US. 143-154.

ASCE y WEF (American Society of Civil Engineers y Water Environment Federation) (1992), "Design and construction of urban stormwater management systems", ASCE Manuals and reports of engineering practice N° 77, WEF Manual of practice FD-20. New Nork, US.

BACCHIEGA D., BERTONI C. y MAZA J. (2006). "Modelación matemática hidrológica de las crecidas de 1998, 2003 y 2005". Pericia hidráulica del expediente N° 1341/2003, Poder Judicial de provincia de Santa Fe, Anexo VI. Santa Fe. 34p.

BASILE P. (2004). "Geomorfología e hidráulica fluvial". Libro electrónico. CURIHAM, FCEIA-UNR. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar>.

BASILE P. (2008). "Propagación de ondas de crecidas". En ORSOLINI H., ZIMMERMANN E. y BASILE P. "Hidrología, procesos y métodos". 2da edición. UNR Editora. Rosario. Santa Fé. 54p.

BASILE P. (2018). "Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales". UNR Editora. Rosario. Santa Fé. 455p.

BASILE P. y RICCARDI G. (2008). "Procesos hidrológicos urbanos" En ORSOLINI H., ZIMMERMANN E. y BASILE P. "Hidrología, procesos y métodos". 2da edición. UNR Editora. Rosario. Santa Fé. 28p.

- BASILE P. A., RICCARDI G. A., STENTA H. R. y ZIMMERMANN E. D. (2007). "Water and sediment yield simulation at basin scale by coupling a hydrologic-hydraulic model with MUSLE" (in spanish). XXI Congreso nacional del agua. Tucumán.
- BASILE P. A., RICCARDI G. A., STENTA H. R. y ZIMMERMANN E. D. (2008a). "Desarrollo y aplicación del modelo EROSUP-U para evaluación de la producción de sedimentos a escala de cuenca". En "Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura". Ed. UNR Editora. ISBN 978-950-673-691-0. Rosario. 199-215.
- BASILE P. A., RICCARDI G. A., STENTA H. R. y ZIMMERMANN E. D. (2008b). "Modelo de simulación de procesos hidro-sedimentológicos a escala de cuenca CTSS8-SEDMU". En "Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura". Ed. UNR Editora. ISBN 978-950-673-691-0. Rosario. 216-233.
- BASILE P. A., RICCARDI G. A., STENTA H. R. y ZIMMERMANN E. D. (2008c). "Modelo CTSS8-SED para simulación físicamente basada y espacialmente distribuida de procesos hidrológicos y erosión-sedimentación en cuencas de llanura". En "Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura". Ed. UNR Editora. ISBN 978-950-673-691-0. Rosario. 234-252.
- BASILE P., RICCARDI G., ZIMMERMANN E. y STENTA H. (2010). "Simulation of erosion-deposition processes at basin scale by a physically-based mathematical model" Intern. Journal of sediments research ISSN: 1001-6279; Pekin, China, 25, 91-109.
- BASILE P., GARCIA M. y RICCARDI G. (2011). "Calibración de funciones para desagregar en vertical velocidad y concentración de sedimentos en suspensión en el Río Paraná". Memorias del Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de ríos. Santiago del Estero, Argentina. ISBN 978-987-1780-05-1 (Libro + CD-ROM).
- BEASLEY D., MONKE E. y HUGGINS L. (1977). "ANSWERS: A model for watershed planning". Purdue Agricultural Experiment Station Journal Paper, 7083, 34p.
- BERTONI C., PEDRAZA R., COLLINS J., MACOR J., PUSINERI G., OCAMPO C., MAZA J. y SECCHI A. (1995). "Apuntes del curso: Sistemas de drenaje urbano". Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina. 300p.
- BERTONI C., MAZA J., y PAOLI C. (2002), "Gestión de crecidas en áreas urbanas en América del Sur, programa asociado de gestión de crecidas, proyecto: Mejoramiento de las prácticas de gestión de crecidas en sudamérica". World meteorological organisation global water partnership.
- BERTONI R., AMBROSINO S., BARBEITO O., DANIELE A., MAZA J., PAOLI C. y SERRA J. (2004). "Inundaciones urbanas en Argentina". Córdoba, Argentina. 254p.
- BORAH D. y BERA M. (2003) "Watershed-scale hydrologic and nonpoint –source pollution models: Review of mathematical bases". Transactions of the ASAE. 46 (6), 1553-1566.
- BUFFINGTON, J. M. (1999). "The Legend of A.F. Shields". Journal of Hydraulic Engineering, 125 (4), 376-387.
- BURGOS V. (2007). "Desarrollo Urbano de Bajo Impacto hidrológico (DUBI): Pautas hacia una cultura hidrológica en Mendoza". XXI Congreso Nacional del Agua, Tucumán. 33p.

- BURGOS V. y VARGAS ARANIBAR A. (2008). "Estudio hidrológico aluvional urbano-rural de loteo en piedemonte, Mendoza-Argentina" XXII Congreso latinoamericano de hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia. 15p.
- CARTA (Compañía Argentina de Relevamiento Topográfico y Aerofotogramétrico) (1964). "Hoja 2754-25-2D3". Buenos Aires, Argentina.
- CCRFC (Clark County Regional Flood Control District) (1999). "Hydrologic Criteria and Drainage Design Manual". Clark City, NV.
- CELO (Cooperativa Eléctrica Limitada Oberá) (2013). "Comunicación interna".
- CHAVES H. (1996). "Modelagem matemática da erosão hídrica: Passado, presente e futuro". En "O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado". S. Bras. de Ciencia do Solo, Viçosa. 731-750.
- CHAVES H. (2010). "Aplicación de la USLE en presencia de incertidumbre: Consecuencias y mitigaciones". En "Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas" Vol 1. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe (PHI-LAC), 22, 22-35.
- CHOW V. (1994). "Hidráulica de canales abiertos". Ed. Mc Graw-Hill. Colombia. 667p.
- CHOW V., MAIDMENT D. y MAYS L. (1994). "Hidrología aplicada". Ed. Mc Graw-Hill. Colombia. 584p.
- CHU T. y SHIRMOHAMMADI A. (2004). "Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland". Trans. ASAE 47(4), 1057-1073.
- CIMA (Centro de Investigación del Mar y la Atmósfera) (2015). "Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones". Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Coordinadores: BARROS V. y VER C.
- CISNEROS J., CHOLAKY C., CANTERO GUTIÉRREZ A., GONZALEZ J., REYNERO M., DIEZ A. y BERGESIO L. (2012). "Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo". Ed UniRío editora-UNRC. ISBN 978-987-688-024-4. 287p.
- COLLINS J., BERNAL G. y MACOR J. (2005). "Evaluación de la calidad del agua en desagues pluviales". XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza.
- CP-BES (City of Portland - Bureau of Environmental Services) (2008). "City of Portland stormwater management manual". Revision 4. Acceso on-line 5 de mayo de 2012. <http://www.portlandonline.com/bes/index.cfm?c=47952&>.
- CROKE B., ANDREWS F., SPATE J. y CUDDY S. (2005). "IHACRES User Guide". Technical Report 2005/19. Segunda edición. iCAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University, Canberra. Acceso on-line 15 de febrero de 2018. <http://www.toolkit.net.au/ihacres>
- DA SILVA A. (2004). "Rainfall erosivity map for Brazil". Journal CATENA, ELSEVIER. 57, 251-259.
- DELETIC A. (1998). "The first flush load of urban surface runoff". Water Resource, 32, 2462-2470.
- DEPETTRIS C., ROHRMANN H. y RUBERTO A. (2011). "Estudio de la hidrología urbana del nordeste argentino". Ed. Hanne. Salta. 246p.

- DE ROO A., WESSELING C. y RITSEMA C. (1996). "LISEM: A single-event physically-based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output". *Hydrological Processes*, 10, 1107-1117.
- DE SALVO O. (1990). "El Perfil de Meteorización de las Rocas Basálticas y su Importancia en la Ingeniería de Fundaciones". *Revista Técnica de las Asociaciones Paraguayas de Estructuras y Geotecnia (APE y APG)*. Ediciones y Arte SRL. 1 (1).
- DICKIE M. y CORONEL A. (2016). "Cambio climático, breve historia y tendencias en la Región Húmeda". *Informe INTA EEA Oliveros*. 54, 207-211.
- DI PASQUO M., MARTÍNEZ M. y FREIJE H. (2006). "Primer registro palinológico de la Formación Sauce Grande (Pennsylvaniano-Cisuraliano) en las Sierras Australes, provincia de Buenos Aires, Argentina". *Scientific electronic library on-line*. Acceso on-line 10 de julio de 2012. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S000270142008000100005](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S000270142008000100005)
- DOTTO C. (2006). "Avaliação e balanço de sedimentos em superfícies asfálticas em área urbana de Santa Maria - RS". *Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSM. Santa Maria-RS, Brasil*. 126p.
- DOTTO C., PAIVA E. y SILVA L. (2007). "Acumulação e balanço de sedimentos em superfícies asfálticas em área urbana de Santa Maria - RS". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12, 1-11.
- EBY (Entidad Binacional Yacyreta) (2018). "Posadas Oeste: Arroyo Mártires RN12 hasta Pte Av. Chacabuco. Años 2014-2004". Acceso on-line 15 de febrero de 2018. <http://www.eby.org.ar/index.php/17-plan-de-terminacion-de-yacyreta/172-posadas-oeste-arroyo-martires-rn12-hasta-pte-av-chacabuco-anos-2014-2004>.
- ENGELUND F. y HANSEN E. (1967). "A monograph on sediment transport in alluvial streams". *Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark Technologic University, Hydraulic Lab*.
- FERNANDEZ R., CASTELLO L. y O' LERY H. (1989). "Estimación de la erosionabilidad de los suelos del norte de la provincia de Misiones". *Revista Ciencia del Suelo*, 7 (1-2), 73-79.
- FERNANDEZ R., SOSA A., PAHR N., VON WALLIS A., BARBARO S. y ALBARRACIN FRANCO S. (2015). "Erosión y degradación de los suelos, provincia de Misiones". En "El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina". Tomo II, Parte 7, Pag. 187-199. ISBN: 978-950-9149-40-3.
- FI-UNaM (Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Misiones) (2016). Datos de la estación meteorológica.
- FONTANA J. (2001). "Apuntes de cátedra de Introducción a la Ecología". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura - UNNE. Acceso on-line 5 de junio de 2013. <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2001/6-Biologicas/B-033.pdf>
- FONTANA J. (2014). "La vegetación reófila del Nordeste argentino. Las comunidades vegetales con Podostemaceae de la Provincia de Misiones". *Bol. Sociedad Argentina de Botanica*. 49 (1), 115-136.
- FORGIARINI F. (2010). "Incentivos económicos à sustentabilidade da drenagem urbana: O caso de Porto Alegre - RS". *Tesis doctoral, IPH-UFRGS. Porto Alegre-RS*. 227p.
- FOSTER G. y MEYER L. (1972). "A closed-form soil erosion equation for upland áreas". *Sedimentation: Symposium to Honor prof. H.A. Einstein, Fort Collins, CO, Colorado State University*.

- FOSTER G. y LANE L. (1987) "User requirements UDSA - Water Erosion Prediction Project (WEPP)". NSERL Report N° 1, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN. 43p.
- FOSTER G., McCOOL D., RENARD K. y MOLDENHAUER W. (1981). "Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units". Journal of Soil and Water Conservation. N°36, Pag: 355-359.
- FOSTER G., WEESIES G., McCOOL D., YODE D. y RENARD K. (1999). "Revised Universal Soil Loss Equation User's Manual". US-GPO (US – Government Publishing Office). Washington, DC. 48p.
- FOURNIER F. (1972). "Soil conservation". Nature and environment series. Council of Europe. 194 p.
- GARAT E. (2017). "Impacto de las fuentes de incertidumbre en la información básica para el dimensionado de una red de macrodrenaje urbano". Tesis doctoral. Doctorado en Ingeniería, Escuela de Posgrado y Educación Continua, FCEIA, UNR. Rosario.
- GARCIA-CHEVESICH P. (2008). "Procesos y control de la erosión". Outskirts Press Inc. Arizona, Estados Unidos. 292p.
- GARCIA-CHEVESICH P. (2010). "Factores que afectan la erosión y la sedimentación". En "Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas" Vol 1. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe (PHI-LAC). N°22, 9-22.
- GENTILI C. y RIMOLDI H. (1979). "Mesopotamia". En: Geología Regional Argentina, 2° Simposio. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba. I, 185-224.
- GMMF (Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo) (2005). "Manual del usuario del SWMM 5.0 Ve". Universidad Politècnica de Valencia. 244p.
- GOMEZ P. y DIAS DE PAIVA E. (2010). "Acumulação e transporte de sedimentos na microdenagem: Monitoramento e modelagem". Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 15 (4), 45-55.
- GÓMEZ VALENTIN (2007). "Hidrología urbana". Instituto FLUMEN-UPCyCIMNI. Barcelona. 331p.
- GOOGLE EARTH® (2013). Imagen de 3 de mayo de 2010. Acceso on-line 12 de mayo de 2013. [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com).
- GROSS BRAUN E. (1979). "Informe final sobre suelos del proyecto para el desarrollo integral de la provincia de Misiones". Secretaría de Planificación y Control.
- GUPTA H., SOROOSHIAN S. y YAPO P. (1999). "Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration". J. Hydrologic Eng. 4(2), 135-143.
- GVOZDENOVICH J., BARBAGELATA P. y LÓPEZ G. (2015). "Erosión Hídrica - USLE/RUSLE Argentina". Software, Versión 2.0. EEA Paraná, INTA. <http://www.inta.gob.ar/parana>.
- HAUSEN J. (1919). "Contribución al estudio de la petrografía del territorio nacional de Misiones". Ministerio de agricultura de la nación, Dirección general de minas, geología e hidrografía. Boletín N° 21, Serie B (geología). Buenos Aires. 39p.

- HERRERA A. (2016). “Clasificación de suelos: taxonomía de suelos”. Acceso on-line 20 de junio de 2016. <https://www.slideshare.net/madrededios1/clasificacion-de-suelos-taxonomia-de-suelos>.
- HOFFMANS G. y VERHEIJ, H. (1997). “Scour Manual”. Balkema, Rotterdam.
- HORTON R. (1939). “Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity”. *Earth & Space Science News*, 20 (4), 693–711.
- HUK J. y MERCANTI J. (1999). “Medidas estructurales y no estructurales de control hidrológico aplicadas a una cuenca urbana de la ciudad de Posadas, Misiones (Argentina)”. Trabajo final del Curso de posgrado en hidrología urbana, Facultad de ingeniería, UNNE, Resistencia, Chaco. 20p.
- ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) (2016). “Parque Nacional da Serra Geral”. Ministerio do Medio Ambiente, Brasil. Acceso On-line 16 de abril de 2016. <http://www.icmbio.gov.br>.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) (2014). “Resultados del Censo 2001 y 2010”. acceso on-line 12 de noviembre de 2014. <http://www.indec.mecon.ar>.
- INTA (2013). “Comunicación Interna”. Estación Experimental Agropecuaria – INTA, Cerro Azul, Misiones.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change ) (2013). “Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional”. Capítulo 10 en “The Physical Science Basis” Working Group I. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPS-UFRGS (Instituto de Pesquisas Hidráulicas-Universidade Federal do Rio Grande do Sul) (2004). “IPHS1: Manual do usuário. Versão 2.11”. Porto Alegre, Rio grande do Sul, Brasil. 45p.
- JHA A., BLOCH R. y LAMOND J. (2011). “Cities and flooding. A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century”. The Word Bank, Washington DC, US. 638p.
- JUAREZ BADILLO E. y RICO RODRÍGUEZ A. (2004). “Mecánica de suelos”. Vol 1 Ed. Limusa, México DF.
- JULIEN P. y ROJAS R. (2002). “Upland Erosion Modeling with CASC2D-SED”. *International Journal of Sediment Research*, ISSN 1001-6279, 17(4), 265-274.
- KHARIN V. y ZWIERS F. (2007). “Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the IPCC Ensemble of Global Coupled Model Simulations”. In: *Journal of Climate*. American Meteorological Society. 20,1419–1444.
- KHARIN V., ZWIERS F., ZHANG X. & WEHNER M. (2013). “Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble” In *Climatic Change*. Springer 2013(119), 345–357.
- KILINC M. y RICHARDSON E. (1973). “Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall”. *Hidrology Paper*. Fort Collins, CO, Colorado State University. 54p.
- KIRKBY M. y MORBAN R. (1980). “Erosión de suelos”. Ed. Limusa, México. 375p.
- KOHLI S., SCIOLI C. y ZUCARELLI G. (2014). “Evaluación de moelos paramétricos basados en la ecuación universal de perdida de suelo en el sistema hidrológico del río Tapanagá”. En libro electrónico “Memorias del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras”. ISBN 978-987-692-039-1. Santa Fe. 10p.

- LANE L., SHIRLEY E. y SINGH V. (1988). "Modeling erosion on hillslopes". En "Modelling Geomorphological Systems". Chapter 10, 287-308.
- LASSERRE S. y RIOS M. (1983). "Evaluación de los recursos del suelo del área de frontera de la provincia de Misiones". EERA-INTA Corrientes. 70p.
- LAURENCE A, MARSALEK J., ELLIS J. y URBONAS B. (1996). "Stormwater detention & BMPs". Journal of Hydraulic Research. 34(6), 799-814.
- LEGATES D. y McCABE G. (1999). "Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation". Water Resources Res. 35(1), 233-241.
- LI L., YIN C., HE Q. y KONG L. (2007). "First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China". Journal of Environmental Sciences, 19, 295-299.
- LIGIER H., MATTEIO H., POLO I. Y ROSSO J. (1990). "Provincia de Misiones". En "Atlas de suelos de la República Argentina". Secretaría de Agricultura, Ganadería Pesca. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de investigaciones de Recursos Naturales, Buenos Aires. II, 107-154.
- LIGIER H., MATTEIO H. y POLO I. (2004). Erosión hídrica potencial en la provincia de Misiones. Revista on-line Agro Sitio. Acceso on-line 20 de junio de 2015. <http://www.agrositio.com/vertext/vertext.asp?id=38783&se=1000>.
- LITWIN C. y FRANCO P. (1987). "Estudio hidrológico e hidráulico de tributarios del río Paraná en el tramo comprendido entre el Río Iguazú y la sección Encarnación-Posadas". Informe para la comisión mixta argentino-paraguaya (COMIP). CABA, 245p.
- LLORET RAMOS C. (1995). "Erosão urbana e produção de sedimentos em drenagem urbana". TUCCI C., LAINA PORTO R. y BARROS M. Editores. Editora de UFRGS, ABRH, 241-270.
- LOPEZ ALONSO R. (2007) "Método racional en zona urbana. Bases conceptuales y aplicación en medio urbano". En GÓMEZ VALENTIN (2007). "Hidrología urbana". Instituto FLUMEN-UPCyCIMNI. Barcelona. 83-110.
- MAKSIMOVIC C. (2001). "Urban drainage in specific climates". Vol 1. International Hydrological Programme-UNESCO. Paris.
- MAKSIMOVIĆ Č., TODOROVIĆ Z. y BRAGA B. Jr. (1993). "Urban drainage problems in the humid tropics". IAHS, 216.
- MARTINEZ CROVETTO R. (1963). "Esquema fitogeográfico de la provincia de Misiones". Revista Bonplandia, Instituto de Botánica del Nordeste. 1 (3), 171-223.
- MAZA J., FORNERO L., LITWIN C. y FERNANDEZ P. (1996). "Modelo AR-HYMO, Manual del usuario". INA-CRA, Mendoza. 71p.
- MAZA J., LOPEZ P. y BURGOS V. (2012). "Delimitación de áreas de riesgo hídrico en El Rodeo, Departamento Ambato-Catamarca". INA-CRA. Publicación Interna 145, 107p.
- MENDEZ G. (2012). "Sedimentos en el drenaje urbano. Estudio caso: ciudad de Resistencia (Chaco-Argentina)". Tesis de maestría. FI-UNNE. Resistencia. 163p.
- MENÉNDEZ A. y RE M. (2009). "Códigos numéricos para la hidráulica urbana" Apuntes del "Curso de especialización en Hidráulica Urbana". FIUBA-INA.
- MERNR (Ministerio de Ecología y Recursos No Renebables (2014). "Mapa hipsométrico de la provincia de Misiones". Acceso on-line 14 de enero de 2014. <http://www.ecologia.misiones.gov.ar>.

- MERRIT W., LETCHER R. y JAKEMAN A. (2003). "A review of erosion and sediment transport models." *Environmental Modelling & Software*, 18, 761-799.
- MIRTSKHOULAVA, T. (1997). "Erosion of cohesive materials". IHP-V. Technical Documents in Hydrology N° 10. UNESCO, París.
- MISIONES LIDER (2012). "Temporal afecto a más de 300 familias en Obera". Acceso on-line 3 de diciembre de 2012. <http://www.misioneslider.com.ar/?modulo=extendido&id=19260>.
- MISIONES LIDER (2014). "Inundaciones afectaron a varios barrios de Montecarlo". Acceso on-line 13 de enero de 2014. <http://www.misioneslider.com.ar/?modulo=extendido&id=24604>.
- MORGAN R. (2005). "Soil erosion and conservation". National Soil Resources Institute. Cranfield University. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK. 304 p.
- MORIASI D., ARNOLD J., VAN LIEW M., BINGNER R., HARMEL R. y VEITH T. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50(3), 885-900. ISSN 0001-2351.
- MUÑOZ COUTO (2009). "Uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales municipales en el entorno de la Laguna de Tamiahua, Veracruz". Tesis de grado en Ingeniería Civil Universidad de las Américas Puebla, México.
- NANÍA L. (1999). "Metodología numérico-experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles". Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- NASH J. y SUTCLIFFE J. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles". *J. Hydrology*. 10(3), 282-290.
- OBERAONLINE (2015). "Inundaciones: hay 200 evacuados y comenzó una cruzada solidaria". Acceso on-line 13 de noviembre de 2015. <http://oberaonline.com.ar/index.php/2015/11/12/inundaciones-hay-200-evacuados-y-comenzo-una-cruzada-solidaria/>.
- OLINUK J. (1998). "El clima en la localidad de Cerro Azul, período 1967–1996". Estación experimental agropecuaria INTA Cerro Azul. Informe técnico N° 68, ISSN 0326-0135. Posadas, Misiones. 73p.
- O'LOUGHLIN G., HUBER W. y CHOCAT B. (1996). "Rainfall-runoff processes and modeling". *Journal of Hydraulic Research*, 34(6), 733-752.
- ORSOLINI H., ZIMMERMANN E. y BASILE P. (2008). "Hidrología, procesos y métodos". 2da edición. UNR Editora. Rosario. Santa Fé. 414p.
- PERALES MOMPARTLER S. y ANDRÉS DOMÉNECH I. (2007). "Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: Una alternativa a la gestión del agua de lluvia". V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil, Sevilla, España. 15p.
- PILAR J., ROHRMANN H., VARGAS R., BURGOS J. (2002). "Modelo de apoyo a la decisión multiobjetivo para la elección de la traza de una defensa para el Gran Resistencia". XIX Congreso Nacional del Agua, Carlos Paz - Córdoba, Argentina. Anales.
- PIZARRO R., MORALES C., VEGA L., OLIVARES C., VALDÉS R. y BALOCCHI F. (2009). "Propuesta de un modelo de estimación hídrica para la región de Coquimbo, Chile". Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe (PHI-LAC). 18, 94p.

- POPOLIZIO E. (1996). "Las unidades geomorfológicas del NEA". Instituto Correntino de Agua y Ambiente. Acceso on-line 5 de abril de 2014. <http://www.icaa.gov.ar/trabajosinv/Las%20unidades%20geomorfológicas%20del%20NEA.pdf>.
- PORTO M. F. (2001). "Water quality of overland flow in urban áreas". En "Urban drainage in specific climates". Volume I - Urban drainage in humid tropics. Technical Documents in Hydrology. N. 40. IHP. UNESCO. Paris.
- PORTO R., ZAHED K., TUCCI C. y BIDONE F. (1995). "Drenagem urbana". En "Hidrologia ciencia e aplicacao". Editora da UFRS. Porto Alegre, Brasil. 805-847.
- POUEY N. (1998): "Erosión hídrica en cursos de llanura sobre lechos cohesivos". UNR Editora. Rosario. 164p.
- PRIMERA EDICIÓN WEB (2015). "Temporal en Misiones: La inundación en imágenes". Acceso on-line 13 de noviembre de 2015. <http://www.primeraedicion.com.ar/nota/207145/la-inundacion-en-imagenes.html>.
- RAMOS VERNIERI F. (2013). "Evaluación del desempeño de un dispositivo de detención extendida de espectro completo en distintos escenarios de cuenca urbana del Noroeste Argentino". Tesis de maestría, FICH-UNL, Santa Fe. 179p.
- RED DE MEDIOS DELMERCOSUR. (2014). "Derechos humanos envía ayuda a damnificados por la inundación en Andresito". Acceso on-line 5 de mayo de 2014. <http://mediosdelmercosur.com/derechos-humanos-envia-ayuda-a-damnificados-por-la-inundacion-de-andresito/>.
- REINERT H. (2007). "Caracterización geotécnica de suelos grises del departamento de Oberá-Misiones". Tesis de maestría, FCFN-UNC. Córdoba. 293p.
- RELIEF MAP (2016). Acceso on-line 5 de febrero de 2016. <https://maps-for-free.com>.
- RENARD K., FOSTER G., WEESIES G. y PORTER J. (1991). "RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation". Journal of Soil and Water Conservation. N°46(1), Pag. 30-33.
- RENARD K., FOSTER G., WEESIES D. y YODER D. (1997). "Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)". US-GPO (US – Government Publishing Office). Washington, DC. 384p.
- RICCARDI G. (2001). "Un sistema de simulación hidrológica-hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos". Tesis doctoral, FCEF y N, UNC, Córdoba.
- RICCARDI G. (2004). "Hidrología en medios antropizados". Libro electrónico. CURIHAM, FCEIA-UNR. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar>.
- RICCARDI G., BASILE P., STENTA H., RIESCO G. y BAGLIETTO P. (2005), "Ajuste Regional de predictores de erosión de suelos cohesivos", XX Congreso nacional del agua, Mendoza, Argentina. CD-Rom.
- RICCARDI G., BASILE P., ZIMMERMANN E., STENTA H., SCUDERI C., RENTERÍA J. y GARCIA M. (2008). "Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura". UNR Editora, Rosario.
- RICCARDI G., ZIMMERMANN E., MANCINELLI A., SCUDERI C., BASILE P., RENTERÍA J. y GARCIA P. (2009). "Rehidrología y modelo de simulación a tiempo real en sistema de alerta hidrológico en las cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo". Informe de Avance 4. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. FCEIyA. UNR.

RICCARDI G., ZIMMERMANN E., BASILE P., STENTA H., SCUDERI C. y RENTARIA J. (2010), “Experiencias de simulación físicamente basada de escurrimiento superficial en cuencas de llanura en ambientes rurales y urbanos. Hacia la gestión integrada de recursos hídricos”. Ed. Martin, Mar del Plata. 163-170.

RODRIGUEZ BAYON J., RODRIGUEZ HERNÁNDEZ J., GÓMEZ-ULLATE FUENTE E. y CASTRO FRESCO D. (2005). “Sistemas urbanos de drenaje sostenible. SUDS”. Publicaciones del Colegio de Ingenieros de caminos, Canales y Puertos del País Vasco. Acceso on-line 25 de noviembre de 2016. <http://www.caminospaisvasco.com/Profesion/Publicaciones%20de%20nuestros%20colegiados/suds>.

RODRIGUEZ T. (2014). “Calibración de modelo hidrológicos en ambientes urbanos de la provincia de Misiones”. Tesis de maestría, FCEIA-UNR. Rosario. 200p.

RODRIGUEZ T. y RICCARDI G. (2014) “Evaluación del riesgo por inundación en calles de una cuenca urbana de alta pendiente del centro de Misiones”. Cuadernos del CURIHAM, Rosario. 20, 23p.

RUBERTO A., DEPETTRIS C., ROHRMANN H. y PILAR J. (2013). “Estudio de casos en hidrología urbana”. Ed. Cospel, Resistencia Chaco. ISBN 978-987-26195-9-6. 201p.

RUFINO R., BISCAIA R. y MERTEN G. (1993). “Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná através da pluviometria: terceira aproximação”. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 17, 439–444.

SANCHES OLIVEIRA P., WENDLAND E. y NEARING M. (2012). “Rainfall erosivity in Brazil: A review”. Journal CATENA, ELSEVIER. 100, 139-147.

SCUDERI C., RICCARDI G. y ZIMMERMANN E. (2015). “Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente” 34, 11-20, Buenos Aires.

SECO I. (2014). “In-sewer organic sediment transport”. Tesis Doctoral. UPC. Barcelona, España. 214p.

SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino) (2006). “Provincia de Misiones – clima y meteorología”. Ministerio de Energía y Minería. Acceso on-line 6 de junio de 2012. <http://www.mineria.gov.ar/estudios/irn/misiones/m-1.asp>.

SHIELDS A. (1936). “Application of Similitude Mechanics and the Research on Turbulence to Bed Form Movement” (en Alemán). Mitt. Preuss. Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, Berlín.

SIHH-UPC (Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica-UPC) (2001). “Definición de Criterios de Riesgo para el Flujo en Calles. Análisis del espaciamiento para rejillas e imbornales utilizados en la Ciudad de Barcelona”. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. España.

SINGH V. y WOOLISHER D. (2002). “Mathematical modeling of watershed hydrology” Journal of hydrologic engineering, 7 (4), 270-292.

SINGH J., KNAPP H. y DEMISSIE M. (2004). “Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT”. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey. Acceso on-line 8 de septiembre de 2005. [www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2004-08.pdf](http://www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2004-08.pdf).

SMN (Servicio Meteorológico Nacional) (2012). “Estadísticas meteorológicas”. Acceso on line 3 de diciembre de 2012. <http://www.smn.gov.ar/?mod=clima&id=30&provincia=Misiones&ciudad>.

- SOARES CRUZ (2004). "Optimização do controle da drenagem em macrobacias urbanas". Tesis doctoral, IPH-UFRGS. Porto Alegre – RS, Brasil. 190p.
- SPRINGALL R. (1980). "Hidrología. Primera parte". Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM. D.F. México. 210p.
- SRTM (2009), The Shuttle Radar Topography Mission. NASA.
- STENTA H., RENTERÍA J. y RICCARDI G. (2005). "Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica hidráulica del escurrimiento superficial". XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza. ISBN 987-22143-0-1. CD-ROM, Capítulo Hidrología, 74, 1-13.
- STHELI P., WEBER J. y VESTENA L. (2014). "Revisión del estado del arte y estrategias en al modelación hidrológica distribuida en cuencas urbanas". II Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Buenos Aires. 15p.
- SUN H., CORNISH P. y DANIELL T. (2002). "Contour-based digital elevation modeling of watershed erosion and sedimentation: Erosion and sedimentation estimation tool (EROSSET)". Water Resources Research, 38(11), 1-10.
- TÉMEZ J. (1992). "Control del desarrollo urbano en las zonas inundables". En "Inundaciones y redes de drenaje urbano". Monografías del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid. 10, 105-115.
- TERRITORIO DIGITAL. (2011). "Misterioso deslizamiento de tierra en Colonia Aurora". Acceso on-line 16 de mayo de 2012. <http://www.territorioidigital.com/nota2.aspx?c=5415417505160138>.
- TERRITORIO DIGITAL. (2012). "Lluvia récord dejó a Posadas bajo el agua y en alerta por nuevo diluvio". Acceso on-line 22 diciembre 2012. <http://www.eltterritorio.com.ar/nota4.aspx?c=7346730353751046>.
- TERRITORIO DIGITAL. (2014). "Extraño deslizamiento puso en alerta a Aristóbulo del Valle". Acceso on-line 10 de mayo de 2014. <http://www.eltterritorio.com.ar/nota4.aspx?c=0617604614285033>.
- TERRITORIO DIGITAL. (2015). "Hallaron sin vida al hombre que se arrojó a un arroyo para salvar a un niño". Acceso on-line 3 de enero de 2015. <http://www.eltterritorio.com.ar/nota4.aspx?c=4024127195111977>
- TORREY B. (2004). "La urbanización: una fuerza ambiental considerable". Population Reference Bureau. Acceso on-line 24 de octubre de 2016. <http://www.prb.org/SpanishContent/2004/LaUrbanizacionUnaFuerzaAmbientalConsiderable.aspx>.
- TUCCI C. (2007). "Gestión de inundaciones urbanas". WMO OMM. Porto Alegre, Brasil. 315p.
- TUCCI C., LA LAINA PORTO R. y DE BARROS M. (1995). "Drenagem urbana". ABRH, UFRGS. Porto Alegre, Brasil.
- UDFCD (Urban Drainage and Flood Control District's) (1984). "Urban storm drainage criteria manual". Denver, Colorado, US.
- UDFCD (Urban Drainage and Flood Control District's) (2001). "Urban drainage design manual". Vol 1, 2 y 3. Denver, Colorado, US.
- US-ACE (US - Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center). (2005). "HEC-RAS River Analysis System (version 3.13)".

- US-ACE (US - Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center). (2006). "HMS Hydrological Model System (version 3.1.0)".
- US-DA (1979). "Sediment sources, yields, and delivery ratios" (Section 3, Chapter 6). National Engineering Handbook.
- US-DI (US - Department of the Interior, Bureau of Reclamation). (2006). "Erosion and sedimentation manual". Denver, Colorado. 620p.
- US-DT-FHWA (US - Department of Transportation - Federal Highway Administration) (2001). "Urban drainage design manual". Hydraulic engineering circular N°22, second edition, publication N° FHWA-NHI-01-021.
- US-SCS (US-Soil Conservation Service). (1975). "Urban hydrology for small watersheds". Technical release No. 55, SCS-US-DA, Washington, D.C.
- VAN DE VEN F. (1990). "Water balance of urban areas, en hydrological processes and water management in urban areas" Editors Massing, Packman y Zuidema, IHAS N° 198, Pag. 21-32.
- VANONI V. (1975). "Sedimentation Engineering". ASCE Manual 54.
- VAZQUEZ-AMÁBILE G. y ENGEL B. (2005). "Use of SWAT to compute groundwater table depth and streamflow in the Muscatatuck River watershed. Trans. ASAE 48(3), 991-1003.
- VINEY N. y SIVAPALAN M. (1999). "A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia". Hydrological Processes, 13, 727-743.
- WALTON R. y HUNTER H. (1996). "Modelling water quality and nutrient fluxes in the Johnstone River Catchment, North Queensland". 23rd Hydrology and Resources Symposium, Sydney, Australia.
- WATSON F., RAHMAN J. y SEATON S. (2001). "Deploying environmental software using the Tarsier modelling framework". En "Proceedings of the Third Australian Stream Management Conference". Brisbane, Australia. 2, 631-637.
- WILLIAMS J. y BERNDT H. (1972). "Sediment yield computed with universal equation". J. Hydraul. Div. ASCE 98 (HY12), 2087-2098.
- WILLIAMS J. y NICKS A. (1985). "SWRRB, a simulator for water resources in rural basins: an overview". En: D.G. DeCoursey(ed), Proc. of Natural Resources Modelling Symp., Pingree Park, CO, USDA-ARS-30, 17-22.
- WISCHMEIER W. y SMITH D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning". En "Agriculture Handbook" N° 537. US-DA. Washington D.C. 58p.
- WOOLISHER D., SMITH R. y GOODRICH D. (1990). "KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model:Documentation and User Manual". US-DA. Report ARS-77, Fort Collins, Colorado.
- WOOLHISER D. (1996). "Search for physically based runoff model—a hydrologic El Dorado" Journal of Hydraulic Engineering – ASCE, 122, 122-129.
- WRIGHT-McLAUGHLIN (1969). "Urban Storm Drainage Criteria Manual". Urban Drainage and Flood Control District, Denver.
- YALIN M. (1963). "An expression for bed-load transportation". Journal of Hydraulic Engineering Division. ASCE, 89, 221-250.

YANG C. (1973). "Incipient motion and sediment transport." Journal of Hydraulic Engineering Division. ASCE, 99(10), 1679-1704.

YOUNG R., ONSTAD C., BOSCH D. y ANDERSON W. (1987). "AGNPS: Agricultural Non-Point Source pollution model: A large watershed analysis tool". USDA, ARS Conservation Research Report. 35, 77p.

YU M. y LIU Y. (2015) "The posible impact of urbanization on a heavy rainfall event in Beijing". Journal of Geophysical Research. Acceso on-line 25 de octubre de 2016. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JD023336>.

ZAMBRANO NAJERA J. (2015). "Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basado en SIG". Tesis doctoral, Universidad Politècnica de Cataluña, Barcelona, España. 272p.

ZAMBRANO NAJERA J. y GÓMEZ VALENTÍN M. (2015). "Modelo de base física para determinar zonas de producción y sedimentación en cuencas urbanas de cabecera". IV Jornadas de ingeniería del agua, la precipitación y los procesos erosivos. Córdoba, España. 11p.

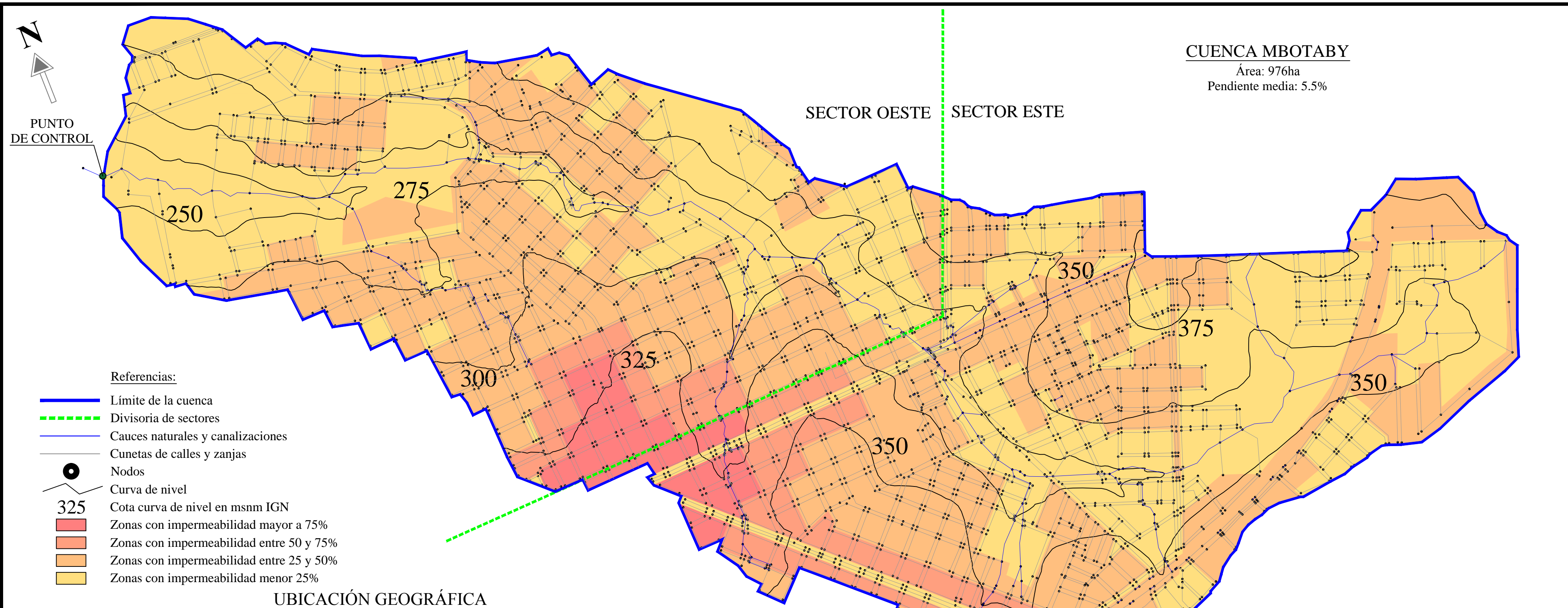
ZAPATA HERNÁNDEZ R. (2006). "Química de los procesos pedogenéticos". Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 358p.

ZIMMERMANN E. (2008). "Análisis de sistemas hidrológicos". Libro electrónico. CURIHAM, FCEIA-UNR. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar>.



## **ANEXOS**

- **Plano N°1: Ubicación geográfica, curvas de nivel y zonificaciones de la cuenca Mbotaby**
- **Plano N°2: Pendientes de conductos modelizados**
- **Plano N°3: Conductos, sumideros, vertederos y nodos sector Este**
- **Plano N°4: Conductos, sumideros, vertederos y nodos sector Oeste**

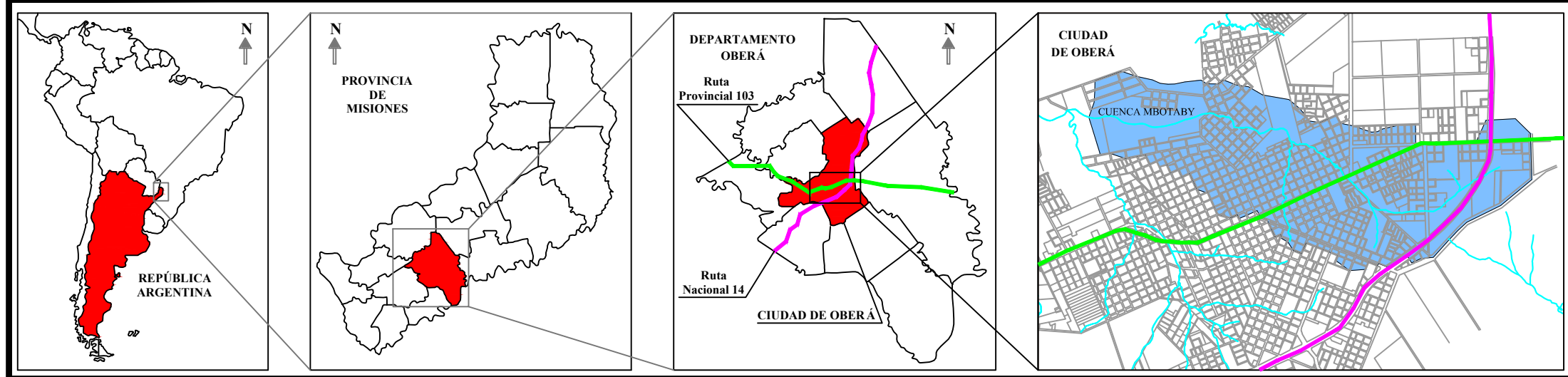


**CUENCA MBOTABY**  
 Área: 976ha  
 Pendiente media: 5.5%

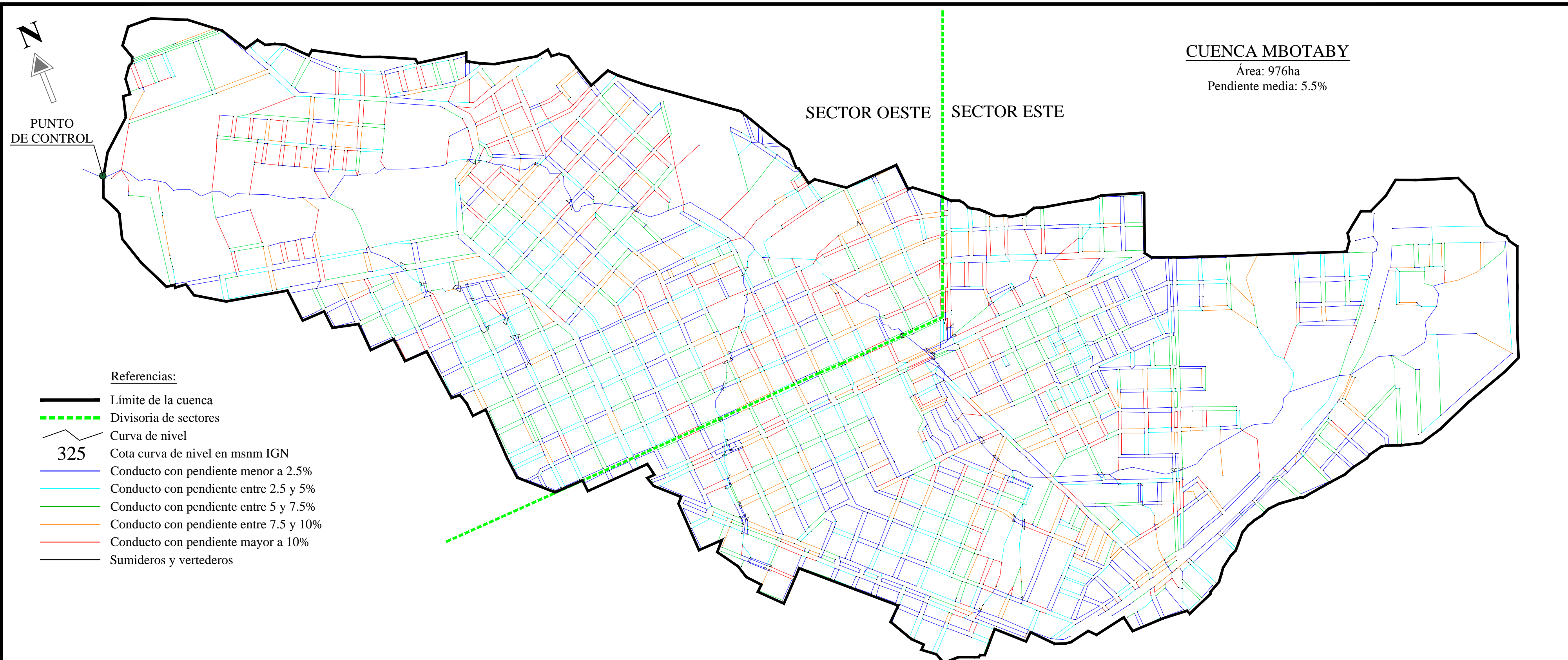
SECTOR OESTE    SECTOR ESTE

- Referencias:**
- Límite de la cuenca
  - Divisoria de sectores
  - Cauces naturales y canalizaciones
  - Cunetas de calles y zanjas
  - Nodos
  - Curva de nivel
  - 325 Cota curva de nivel en msnm IGN
  - Zonas con impermeabilidad mayor a 75%
  - Zonas con impermeabilidad entre 50 y 75%
  - Zonas con impermeabilidad entre 25 y 50%
  - Zonas con impermeabilidad menor 25%

**UBICACIÓN GEOGRÁFICA**



Tesis doctoral: "Estudio de dinámica de los excedentes hídricos superficiales en cuencas urbanas de alta pendiente y sus implicancias en los procesos erosivos. Caso de estudio región urbana de la ciudad de Oberá, Misiones"			UNR
FCEIA			
Plano: <b>Ubicación geográfica, curvas de nivel y zonificación de la cuenca Mbotaby</b>			<b>Nº1</b>
Darío Tomás Rodríguez	Junio de 2018	Escala: 1:750	



**CUENCA MBOTABY**  
 Área: 976ha  
 Pendiente media: 5.5%

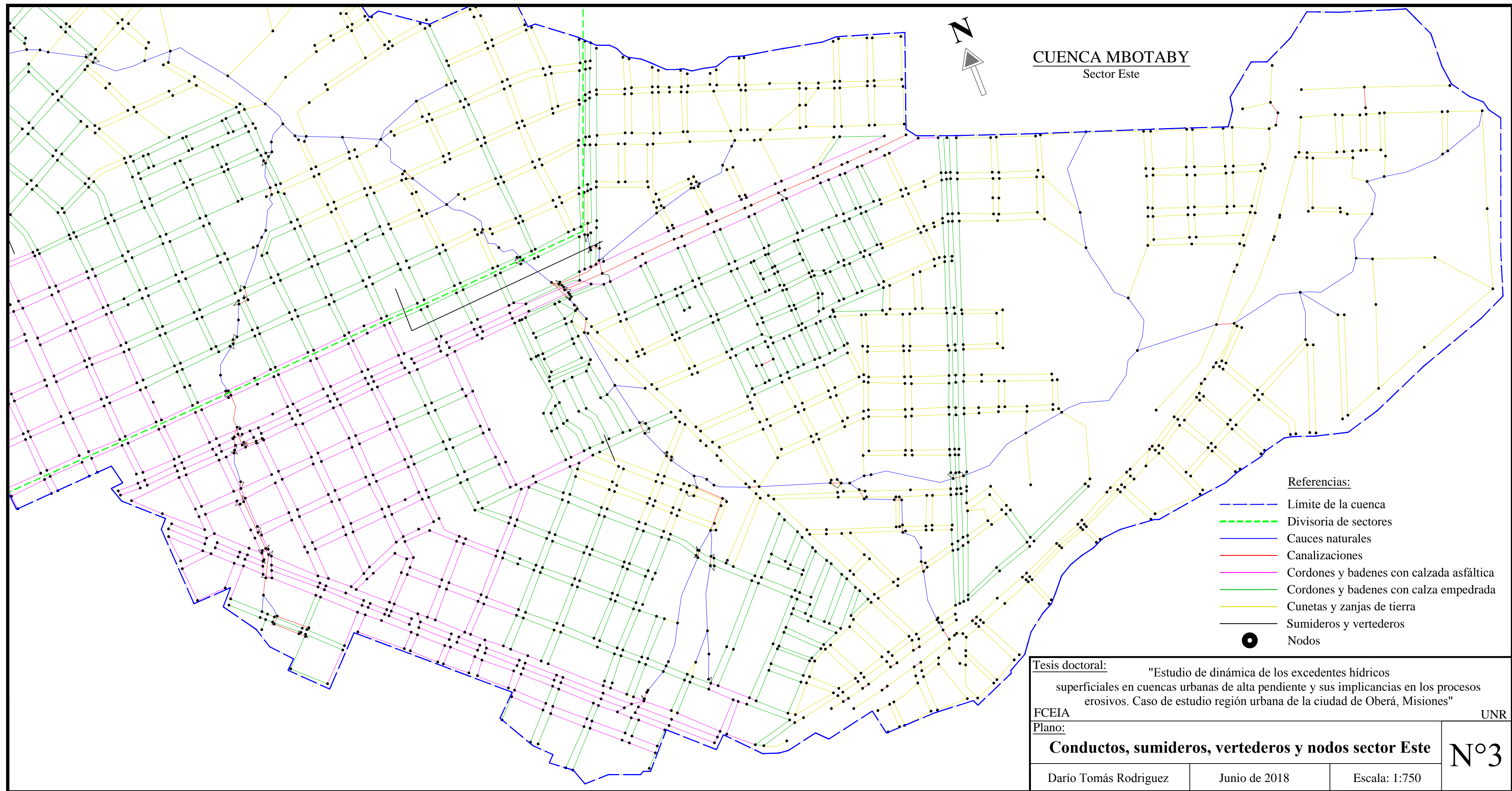
SECTOR OESTE    SECTOR ESTE

PUNTO DE CONTROL

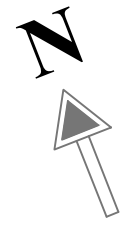
Referencias:

- Límite de la cuenca
- Divisoria de sectores
- Curva de nivel
- 325 Cota curva de nivel en msnm IGN
- Conducto con pendiente menor a 2.5%
- Conducto con pendiente entre 2.5 y 5%
- Conducto con pendiente entre 5 y 7.5%
- Conducto con pendiente entre 7.5 y 10%
- Conducto con pendiente mayor a 10%
- Sumideros y vertederos

Tesis doctoral: "Estudio de dinámica de los excedentes hídricos superficiales en cuencas urbanas de alta pendiente y sus implicancias en los procesos erosivos. Caso de estudio región urbana de la ciudad de Oberá, Misiones"		UNR
FCEIA		
Plano: <b>Pendientes de conductos modelizados</b>		<b>Nº2</b>
Darío Tomás Rodríguez	Junio de 2018	Escala: 1:750



**CUENCA MBOTABY**  
Sector Este












- Referencias:**
- - - Límite de la cuenca
  - - - Divisoria de sectores
  - Cauces naturales
  - Canalizaciones
  - Cordones y badenes con calzada asfáltica
  - Cordones y badenes con calza empedrada
  - Cunetas y zanjas de tierra
  - Sumideros y vertederos
  - Nodos

Tesis doctoral:		"Estudio de dinámica de los excedentes hídricos superficiales en cuencas urbanas de alta pendiente y sus implicancias en los procesos erosivos. Caso de estudio región urbana de la ciudad de Oberá, Misiones"	
FCEIA		UNR	
Plano:		<b>Conductos, sumideros, vertederos y nodos sector Este</b>	
Darío Tomás Rodríguez	Junio de 2018	Escala: 1:750	<b>Nº3</b>



**CUENCA MBOTABY**  
Sector Oeste

PUNTO  
DE CONTROL

- Referencias:**
-  Límite de la cuenca
  -  Divisoria de sectores
  -  Cauces naturales
  -  Canalizaciones
  -  Cordones y badenes con calzada asfáltica
  -  Cordones y badenes con calza empedrada
  -  Cunetas y zanjas de tierra
  -  Sumideros y vertederos
  -  Nodos

Tesis doctoral:		"Estudio de dinámica de los excedentes hídricos superficiales en cuencas urbanas de alta pendiente y sus implicancias en los procesos erosivos. Caso de estudio región urbana de la ciudad de Oberá, Misiones"	
FCEIA		UNR	
Plano:			
<b>Conductos, sumideros, vertederos y nodos sector Oeste</b>		<b>N°4</b>	
Darío Tomás Rodríguez	Junio de 2018	Escala: 1:750	