Facultad Cs. Médicas
Biblioteca
GMD
TFEM 2934



Autor Razzini, Agustín | **Tutora** Catelani, Bárbara Teresa | **Director** Cappa, Gustavo Alejandro

Caracterización de las Placas Carotídeas por AngioCT de Vasos de Cuello mediante el

Sistema Carotid Plaque-RADS y Subanálisis de Calcio

Experiencia unicéntrica

UNR Universidad Nacional de Rosario
FCM Facultad de Ciencias Médicas

Carrera de Especialización en Diagnóstico por Imágenes
Facultad de Ciencias Médicas – Universidad Nacional de Rosario
Hospital de Emergencias "Dr. Clemente Álvarez"

Carrera de Especialización en Diagnóstico por Imágenes
Facultad de Ciencias Médicas – Universidad Nacional de Rosario
Hospital de Emergencias "Dr. Clemente Álvarez"

Caracterización de las Placas Carotídeas por AngioCT de Vasos de Cuello mediante el Sistema Carotid Plaque-RADS y Subanálisis de Calcio

Experiencia unicéntrica

Autor Razzini, Agustín
Tutora Catelani, Bárbara Teresa
Director Cappa, Gustavo Alejandro

Glosario

ACV: accidente cerebrovascular.

AIT: ataque isquémico transitorio.

angio-TC: angiotomografía computada (angiografía por tomografía computada).

CSA (contact surface area): área de contacto superficie de placa–lumen (métrica 3D).

CT: tomografía computada (computed tomography).

CT Plaque-RADS: sistema Plaque-RADS aplicado a angio-TC (clasificación de fenotipo de placa carotídea).

ESUS: ACV embólico de fuente indeterminada (embolic stroke of undetermined source).

IA: inteligencia artificial.

ICH / IPH: hemorragia intraplaca (intraplaque hemorrhage).

κ (kappa): coeficiente de concordancia interobservador.

Loc: localización.

LRNC: núcleo necrótico rico en lípidos (lipid-rich necrotic core).

LV (lumen volume): volumen luminal (métrica 3D).

MWT: espesor máximo de pared (maximum wall thickness).

NASCET: criterio para cuantificación del porcentaje de estenosis carotídea.

Obs1 / Obs2: observador 1 / observador 2.

p: valor p (significancia estadística).

Plaque-RADS: Plaque Reporting and Data System (sistema de reporte/estratificación de placa).

PSPP: software estadístico utilizado para el análisis.

RM: resonancia magnética.

UH: unidades Hounsfield (atenuación en TC).

V de Cramér: tamaño de efecto para asociación en tablas de contingencia.

χ^2: estadístico chi-cuadrado.

gl: grados de libertad.

CAP-Net: sistema/modelo de segmentación de placa carotídea basado en angio-TC (según se menciona en el texto).

PRAEVAorta2: herramienta/software mencionada en el texto.

ResUNet / PSPNet: arquitecturas de redes neuronales mencionadas en el texto.

Índice

Índice **1**
Introducción **2**
Materiales y Métodos **3**
- Diseño del estudio 4
- Población y criterios de selección 4
- Adquisición de imágenes 4
- Procesamiento y visualización 4
- Variables registradas 6
- Análisis estadístico 6
- Consideraciones éticas 7

Marco Conceptual **8**
- Aterosclerosis carotídea y riesgo cerebrovascular 8
- Vulnerabilidad de la placa y mecanismos fisiopatológicos 8
- Discordancia entre estenosis y carga real de placa 8
- Biología molecular de la inestabilidad de la placa 9
- Rol del calcio: controversias, mecanismos y patrones 9
- Fundamentos técnicos de la angio-TC en la caracterización de placa carotídea 10
- Desarrollo del sistema Plaque-RADS: fundamentos, categorías, rol de la RM y limitaciones de la angio-TC 12
- Adaptación basada en angio-TC y aplicación en ESUS 14
- Aplicaciones de la inteligencia artificial en la caracterización de placas carotídeas mediante angiotomografía computada 14

Resultados **16**
- Características de la muestra 16
- Descripción angiográfica y morfológica 16
- Reproducibilidad interobservador 18
- Asociación de Edad y CT Plaque-RADS 18
- Asociación de Edad y NASCET 19
- Asociación de Edad y Tipos de Calcio 19
- Asociaciones entre Sexo y CT Plaque-RADS, NASCET y Tipo de Calcio 20
- Relaciones internas entre variables de imagen 20

Discusión **28**
- Interpretación de los hallazgos: por qué importa mirar la placa 28
- Subanálisis de calcio: del “presente/ausente” al patrón 28
- Localización: el territorio también habla 29
- Reproducibilidad e implicancias para la práctica 29
- Variables demográficas y fenotipo de placa 29
- Limitaciones 30
- Conclusión 31
- Bibliografía 32

INTRODUCCIÓN



Introducción

La enfermedad carotídea aterosclerótica es una de las principales causas de accidente cerebrovascular (ACV) isquémico y cumple un papel fundamental en la estratificación del riesgo vascular.[5,6] Durante muchos años, la evaluación del riesgo se basó predominantemente en el grado de estenosis luminal. Sin embargo, se ha demostrado que este parámetro no refleja de manera adecuada el riesgo real de sufrir un evento isquémico, dado que el riesgo también depende de mecanismos embólicos y de características intrínsecas de la placa.[5,6] En la última década, la morfología y la composición de la placa se han consolidado como factores pronósticos relevantes que proporcionan información complementaria y, en muchos casos, decisiva.[5,6]

Diversas técnicas de imagen no invasivas —la ecografía (US), la resonancia magnética (RM) y la tomografía computada (TC)— permiten detectar características asociadas a una mayor vulnerabilidad de la placa, como la ulceración, la presencia de trombo intraluminal, la hemorragia intraplaca (IPH) y la existencia de un núcleo necrótico rico en lípidos (LRNC).[6,7,8,5] La integración de estos hallazgos con el grado de estenosis permite una evaluación más global e integral del riesgo. No obstante, la aplicación uniforme de estos conceptos en la práctica clínica se ve limitada por la falta de un lenguaje estandarizado ampliamente difundido y por la heterogeneidad en las definiciones de rasgos de placa y desenlaces clínicos.[7,5]

Con el propósito de disminuir esta variabilidad, se desarrolló el sistema Carotid Plaque Reporting and Data System (Plaque-RADS), que estandariza criterios diagnósticos y propone un método estructurado para la clasificación del riesgo de las placas más allá del grado de estenosis arterial.[1] Recientemente, se ha propuesto una versión modificada del Plaque-RADS basada en angiotomografía computada (angio-TC), con el objetivo de mejorar su aplicabilidad en el contexto de la evaluación rutinaria del ACV.[2] En este sentido, la angio-TC adquiere especial relevancia, dado que constituye una herramienta ampliamente disponible y utilizada en la práctica clínica para el estudio de la patología aterosclerótica carotídea.[6] A pesar de su utilidad, la angio-TC presenta limitaciones inherentes para la identificación precisa de ciertas características clave —como el LRNC, la IPH o alteraciones sutiles de la cápsula fibrosa—, lo que ha motivado la necesidad de adaptar los sistemas de clasificación a las capacidades técnicas y de resolución espacial propias de esta modalidad.[6]

Paralelamente, muchos artículos científicos han comenzado a darle un papel cada vez más importante al componente cálcico. Aunque la calcificación fue durante mucho tiempo considerada un hallazgo incidental o incluso un marcador de estabilidad, la evidencia reciente demuestra que no todos los patrones de calcificación poseen el mismo significado clínico o pronóstico.[3,4] Configuraciones específicas, como el denominado “rim sign”, se han asociado con mayor probabilidad de eventos isquémicos, mientras que patrones de calcificación más densos o profundos podrían relacionarse con mayor estabilidad estructural.[3,4,8] La angio-TC constituye el método de referencia para la evaluación del calcio y la caracterización de sus configuraciones morfológicas, permitiendo un abordaje sistemático de los distintos patrones de calcificación en placas carotídeas.[3,4]

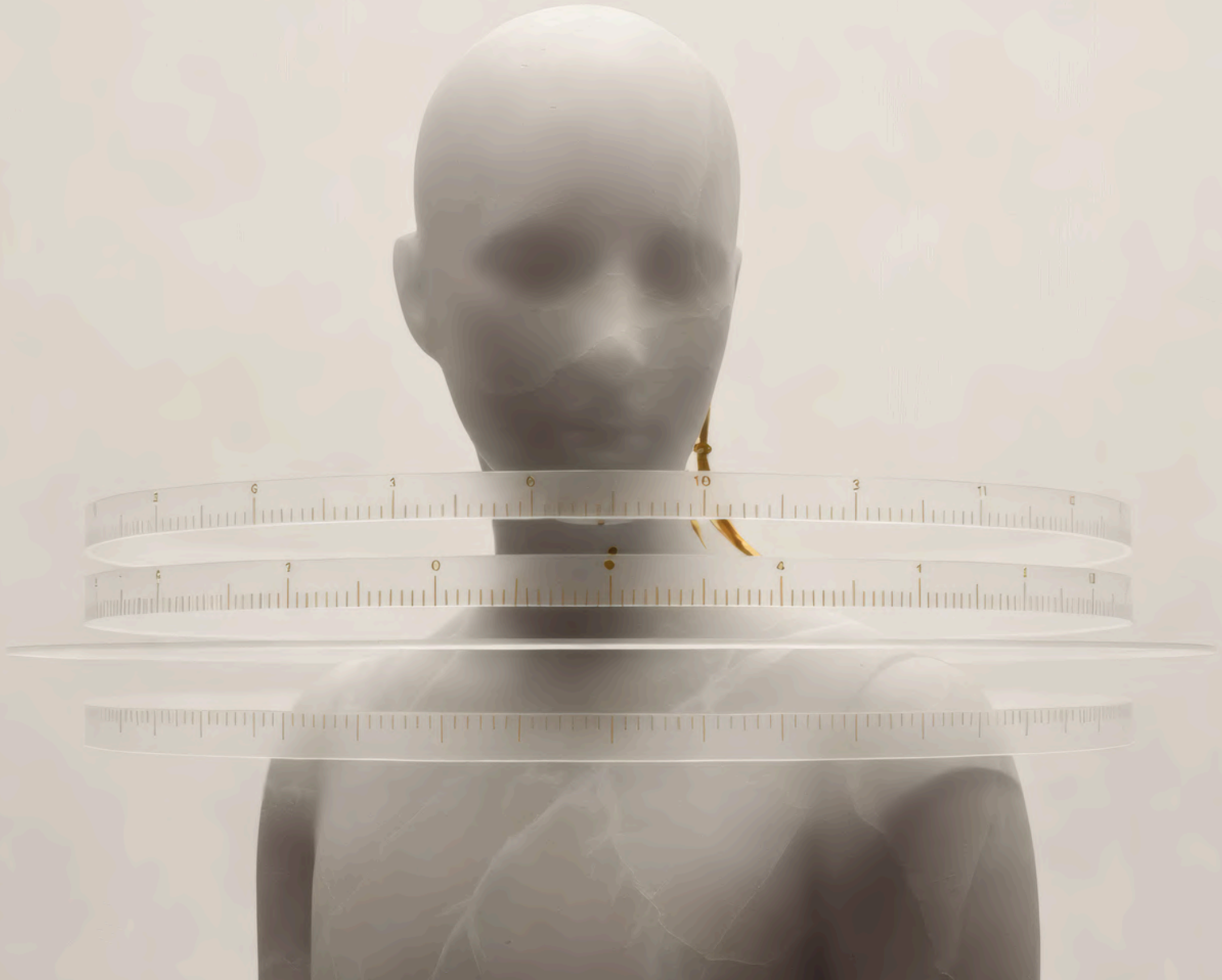
En este escenario de creciente complejidad en la caracterización morfológica de la placa, la aplicación de herramientas de análisis automatizado basadas en inteligencia artificial ha sido propuesta como un complemento potencial para mejorar la segmentación, cuantificación y reproducibilidad de mediciones en angio-TC.[13] Si bien los desarrollos de estas nuevas tecnologías muestran resultados prometedores, su incorporación sistemática en la práctica clínica aún requiere validaciones adicionales y demostración de impacto clínico en contextos reales.[13]

En nuestro medio, la descripción de las placas continúa siendo muy variable según cada radiólogo. En particular, la caracterización del calcio suele ser incompleta o no presenta una

descripción detallada de su patrón morfológico. Esta falta de estandarización puede conducir a la subestimación de hallazgos clínicamente relevantes y dificulta la correlación precisa con eventos cerebrovasculares posteriores. En consecuencia, el uso de un enfoque integrado que combine una clasificación estructurada tipo Plaque-RADS con una descripción sistemática de los patrones de calcificación podría representar un avance significativo en la calidad de los informes radiológicos y en la precisión de la estratificación del riesgo.

El objetivo principal de esta investigación fue caracterizar las placas carotídeas mediante angiotomografía computada de vasos del cuello, utilizando una versión adaptada del sistema Plaque-RADS complementada por un subanálisis de calcificación, en una cohorte de pacientes evaluados entre enero de 2023 y octubre de 2025.

MATERIALES Y MÉTODOS



Materiales y Métodos

Diseño del estudio

Se realizó un estudio observacional, retrospectivo y transversal, basado en la evaluación de angiotomografías de vasos de cuello obtenidas entre enero de 2023 y octubre de 2025 en un único centro.

Población y criterios de selección

Se incluyeron 47 pacientes mayores de 18 años que contaban con una angiotomografía de vasos de cuello indicada por sospecha de estenosis carotídea, antecedente de accidente cerebrovascular isquémico o hemorrágico, o accidente isquémico transitorio (AIT).

Los *criterios de inclusión* fueron individuos ≥ 18 años que cuenten con un estudio angiotomográfico de vasos de cuello realizado en el periodo establecido.

Se *excluyeron* estudios con mala calidad de imagen, definida como artefactos o fallas de adquisición que impidieran la evaluación adecuada de las placas carotídeas.

No se excluyeron estudios por antecedentes quirúrgicos o características anatómicas particulares, salvo cuando afectaran la interpretación de los hallazgos.

Adquisición de imágenes

Las imágenes fueron obtenidas en un tomógrafo multicorte *Philips Brilliance de 16 canales.*

Parámetros de adquisición

Los parámetros consignados en los metadatos DICOM incluyeron: kVp: 120, matriz: 512 × 512, espesor de corte: 2,0 mm, pixel spacing: 0,9375 × 0,9375 mm, modo de adquisición: helicoidal (axial helix)

Administración de contraste

La administración se realizó por vía intravenosa, mediante un catéter antecubital calibre 20. Se utilizó contraste iodado no iónico de 350 mg/mL, administrándose un volumen de 50–100 mL a un flujo de 4,5–5 mL/s. No se empleó *saline chaser*. La adquisición se disparó mediante bolus tracking, mediante un umbral de 100 UH para iniciar la fase arterial.

Los pacientes fueron posicionados en decúbito supino, cabeza primero.

Procesamiento y visualización

El procesamiento y la revisión de las imágenes se realizaron utilizando el visor DICOM WEASIS. Se evaluaron exclusivamente reconstrucciones en planos ortogonales (axial, coronal y sagital), empleando ventanas de partes blandas y, cuando fue necesario, ajustes de ventana para optimizar la evaluación del componente cálcico. No se efectuaron reconstrucciones curvilíneas (curved planar reformation, CPR) ni modelados tridimensionales, y no se realizaron mediciones en reconstrucciones volumétricas. La valoración de la placa se efectuó sobre el eje carotídeo correspondiente, priorizando la identificación del segmento con mayor compromiso ateroscleró tico para la medición del espesor máximo de pared (MWT) y la asignación de categorías del sistema de clasificación.

Lectura y análisis de las imágenes

Las angio-TC fueron interpretadas por dos observadores: un médico con formación completa en diagnóstico por imágenes y una médica neurorradióloga con tres años de experiencia específica. Ambos realizaron una lectura independiente y doble ciego, sin acceso a los resultados del otro observador ni a los registros de clasificación previos. Posteriormente, se realizó una instancia de consenso para resolver discrepancias en la asignación de categorías y en las mediciones.

La concordancia interobservador para la clasificación se evaluó mediante el coeficiente kappa (κ). Para el registro de datos se utilizó una base anonimizada con identificador numérico no trazable. La unidad de registro fue el paciente; para cada paciente se consignaron hallazgos para carótida derecha e izquierda. En caso de coexistir más de una placa en el mismo lado, se registró para el análisis la placa con mayor categoría de riesgo dentro del sistema de clasificación (es decir, el mayor puntaje CT-Plaque-RADS), a fin de evitar múltiples mediciones no independientes por lado y representar el fenotipo de mayor relevancia morfológica.

Sistema de Clasificación: CT Plaque-RADS

Se aplicó un esquema de clasificación basado en Plaque-RADS (sistema propuesto y desarrollado por Saba L., Cau R., Murgia A, et. al)[1], adaptado a las capacidades de la angio-TC. Dado que la angio-TC no permite evaluar de manera confiable la hemorragia intraplaca (IPH) ni el estado/grosor de la cápsula fibrosa, no se asignaron las categorías dependientes de dichos hallazgos (por ejemplo, 4A y 4B) ni se subclasificó de forma definitiva entre 3A y 3B. En consecuencia, se utilizó una categorización operativa registrando las siguientes categorías por lado:

- **CT-Plaque-RADS 1:** pared arterial normal, sin evidencia de placa.
- **CT-Plaque-RADS 2:** placa con **MWT < 3 mm**.
- **CT-Plaque-RADS 3A/B:** placa con **MWT ≥ 3 mm sin ulceración**, consignada como subtipo **indeterminado por angio-TC** (no distinguible de forma fiable entre 3A y 3B por limitaciones para caracterizar la cápsula).
- **CT-Plaque-RADS 3C: ulceración** de placa identificada en angio-TC (defecto de superficie con comunicación al lumen).
- **CT-Plaque-RADS 4C: trombo intraluminal**.

Como descriptores morfológicos adicionales, cuando se identificaron áreas marcadamente hipoatenuantes dentro de la placa, estas se registraron como hallazgo descriptivo (componente no calcificado/hipoatenuante) sin modificar la categoría CT-Plaque-RADS asignada, dado que la angio-TC no permite confirmar la naturaleza del componente intraplaca (por ejemplo, diferenciar de manera definitiva LRNC de IPH). En los casos en los que la caracterización intraplaca resultara clínicamente relevante, se dejó constancia interna de que la evaluación complementaria con RM de pared carotídea podría aportar información adicional.

Subanálisis de calcificación

Se realizó un subanálisis morfológico de la calcificación carotídea en angio-TC utilizando la clasificación de seis configuraciones propuesta para Angio-TC, basada en la topografía y el patrón del calcio dentro de la placa.

Tipos de configuración cálcica (1–6):

- **Tipo 1:** ausencia completa de calcificación en la placa.
- **Tipo 2:** calcificaciones intimales o superficiales.

- **Tipo 3:** calcificaciones profundas o voluminosas (*bulky*), definidas por un grosor >2 mm sin calcificación adventicial delgada asociada.
  Tipo 4: calcificaciones adventiciales con placa blanda interna <2 mm (*signo de borde negativo*).
  Tipo 5: patrón mixto con calcificaciones íntimales y voluminosas.
- **Tipo 6:** *signo de borde positivo*, definido por calcificación adventicial <2 mm con placa blanda interna ≥2 mm.

Para uniformar la evaluación, se adoptaron definiciones operativas de localización: se consideró superficial a la calcificación ubicada en la interfaz íntima–lumen o cercana al lumen, y profunda a la localizada hacia el borde media/adventicia o próxima a la adventicia. Asimismo, se definió calcificación voluminosa (bulky) como aquella de grosor >2 mm sin calcificación adventicial delgada asociada. La clasificación del tipo de calcificación se efectuó en planos ortogonales sobre el segmento carotídeo con mayor compromiso, seleccionando la placa representativa del lado correspondiente según el criterio predefinido del estudio.

Variables registradas

Demográficas: edad (años) y sexo (0 = varón; 1 = mujer).

Por carótida (derecha e izquierda)

- Localización de la placa (sin placa / bifurcación / bulbo / bulbo + bifurcación / carótida interna).
- Categoría **CT Plaque-RADS** (1, 2, 3A/B, 3C, 4C).
- Tipo de calcificación (1–6) según la clasificación morfológica de Saba et al.
- Estenosis por **NASCET** (categorías: <50%, 50–69%, ≥70%).
- Registro de “no evaluable” cuando correspondió (p. ej., oclusión o calidad insuficiente para caracterización).

Regla de registro

En presencia de múltiples placas en una misma carótida, se consignó para ese lado la lesión con **mayor categoría CT Plaque-RADS**. Cuando una carótida no fue valorable para caracterización morfológica (p. ej., oclusión), se registró la estenosis por NASCET y se consignó “no evaluable” para las variables de placa y calcificación, según correspondiera.

Análisis estadístico

Los datos fueron almacenados en una base anonimizada mediante asignación de un identificador numérico no trazable. El análisis se realizó con el software PSPP. Se efectuó estadística descriptiva, informando las variables continuas como media ± desvío estándar y rango (mínimo–máximo), y las variables categóricas como frecuencias absolutas y porcentajes.

Para el análisis de asociaciones entre variables categóricas se utilizaron tablas de contingencia (crosstabs) y la prueba de chi-cuadrado de Pearson. En comparaciones entre variables ordinales se exploró adicionalmente la prueba de tendencia (linear-by-linear association). Se consideró estadísticamente significativo un valor de $p < 0,05$.

La concordancia interobservador se evaluó sobre lecturas independientes, utilizando el coeficiente kappa (κ) simple para: (1) la categoría CT Plaque-RADS y (2) el tipo de calcificación. La

unidad de análisis fue la carótida (derecha e izquierda), analizándose ambos lados por separado e informando el número de casos válidos para cada comparación.

No se realizaron modelos multivariados ni imputación de datos faltantes; los datos faltantes o no evaluables se reportaron como tales y se excluyeron del análisis correspondiente (análisis por casos válidos).

Consideraciones éticas

El estudio fue aprobado por el comité institucional correspondiente. Por tratarse de un análisis retrospectivo de imágenes previamente adquiridas, quedó exento de consentimiento informado. Se garantizaron la confidencialidad y anonimización de los datos mediante la eliminación de toda información identificatoria del paciente.


MARCO CONCEPTUAL

Marco Conceptual

Aterosclerosis carotídea y riesgo cerebrovascular

La aterosclerosis de la arteria carótida es altamente prevalente en la población general y constituye un factor de riesgo bien establecido para el ACV isquémico.[5] Se estima que la enfermedad carotídea es responsable de aproximadamente 18–25% de los eventos cerebrovasculares isquémicos.[5]

La deposición de calcio vascular puede ocurrir en la íntima o en la media de la pared arterial. La calcificación intimal se asocia con la deposición lipídica y la inflamación propias de la progresión aterosclerótica, mientras que la calcificación medial ocurre de manera más independiente de la aterosclerosis y se relaciona con comorbilidades como envejecimiento, enfermedad renal crónica y diabetes.[4]

Vulnerabilidad de la placa y mecanismos fisiopatológicos

El enfoque tradicional basado exclusivamente en el grado de estenosis luminal no es el mejor parámetro para predecir la estabilidad y vulnerabilidad de la placa ni su potencial para causar eventos cerebrovasculares.[5] Se han identificado diversas características de imagen asociadas con mayor riesgo de ruptura o complicación de placa, entre ellas: hemorragia intraplaca (IPH), núcleo necrótico rico en lípidos (LRNC), alteraciones de la cápsula fibrosa y trombo intraluminal.[5,6,8]

Por el contrario, una cápsula fibrosa gruesa se ha relacionado con menor riesgo de ruptura y, por ende, de ACV.[5] La IPH se considera un marcador distintivo de lesiones de alto riesgo y fue el hallazgo más frecuente en placas complicadas ipsilaterales al ACV isquémico agudo en el estudio CAPIAS.[2,4]

Discordancia entre estenosis y carga real de placa

La estratificación del riesgo cerebrovascular basada únicamente en el grado de estenosis (por ejemplo, mediante criterios NASCET) presenta limitaciones, dado que dicha medición se centra en el estrechamiento luminal y no incorpora información sobre la extensión longitudinal, la complejidad geométrica ni la carga global de placa. En este sentido, se ha señalado que el grado de estenosis no necesariamente se correlaciona con el volumen total de placa y que lesiones con distinta morfología pueden compartir porcentajes de estenosis similares, lo que contribuye a una discriminación subóptima del riesgo clínico.[5,6]

En los últimos años, la carga de placa y parámetros morfológicos tridimensionales se han propuesto como marcadores complementarios para caracterizar el fenotipo aterosclerótico y su potencial asociación con eventos. En un estudio que correlacionó la morfología de placa en angio-TC con perfiles transcriptómicos de especímenes de endarterectomía carotídea, las placas de pacientes sintomáticos mostraron mayor carga de placa y mayor LRNC en comparación con las de pacientes asintomáticos; además, los modelos basados en morfología resultaron superiores al grado de estenosis para predecir sintomatología.[9]

Desde una perspectiva cuantitativa, la medición de variables geométricas y composicionales (por ejemplo, volumen total de placa, estenosis por área/diámetro y volúmenes de calcio, LRNC e IPH) es factible en angio-TC mediante análisis semiautomatizado, con alta reproducibilidad intra e interobservador, lo que permite su aplicación en estudios longitudinales orientados a detectar cambios pequeños pero relevantes en carga de placa y sus componentes.[10] En línea con este enfoque, también se han propuesto métricas tridimensionales como el área de contacto flujo-placa (contact surface area, CSA) y el volumen luminal del segmento afectado (lumen volume, LV), con mejor desempeño discriminativo que NASCET en la predicción de riesgo de ictus en cohortes evaluadas con reconstrucción 3D.[11]

Biología molecular de la inestabilidad de la placa

Más allá de su expresión morfológica en las imágenes, la vulnerabilidad de la placa se vincula a procesos biológicos que incluyen inflamación, degradación de matriz extracelular y cambios en la estructura de la cápsula fibrosa, los cuales favorecen la inestabilidad y la posibilidad de fenómenos tromboembólicos. En este contexto, se ha planteado que los marcadores de composición y carga de placa observados por angio-TC pueden reflejar, al menos en parte, procesos biológicos subyacentes relevantes para la estabilidad o inestabilidad lesional.[9]

Un aporte particularmente relevante proviene de estudios que correlacionan la morfología de la placa en angio-TC con análisis moleculares de especímenes de endarterectomía carotídea. En este marco, las placas con mayor carga lesional y con componentes asociados a alto riesgo (por ejemplo, mayor LRNC, presencia de IPH y mayor componente de matriz) se han asociado con firmas transcriptómicas vinculadas a inflamación y degradación de matriz extracelular, procesos típicamente relacionados con inestabilidad.[9] En contraste, las placas con mayor componente cálcico se asociaron con un perfil molecular más compatible con estabilidad, con enriquecimiento de vías profibróticas y supresión relativa de señales inflamatorias.[9]

En conjunto, estos hallazgos respaldan que la caracterización avanzada de placa por angio-TC —centrada en carga de placa y composición— no solo aporta información morfológica, sino que puede tener correlato con procesos biológicos de estabilidad/inestabilidad. Esto refuerza la justificación de incorporar métricas de composición y configuración de placa en la estratificación de riesgo, especialmente en escenarios donde el grado de estenosis por sí solo no resulta suficiente para estimar el potencial embólico.[5,9]

Rol del calcio: controversias, mecanismos y patrones

Las calcificaciones están presentes en aproximadamente 50–60% de las placas carotídeas.[4] Sin embargo, el rol del calcio en la aterosclerosis es controvertido y la relación entre calcificación vascular y vulnerabilidad de la placa no está completamente aclarada.[4]

Por un lado, se ha descrito que las calcificaciones densas y nodulares pueden conferir mayor estabilidad mecánica a la placa y reducir el riesgo de embolización para un determinado tamaño de placa y grado de estenosis.[4] Por otro, otros trabajos sugieren que la presencia de calcio podría comportarse como un marcador independiente de estenosis luminal y de síntomas isquémicos.[3,4] Esta aparente contradicción se explica, al menos en parte, por la heterogeneidad de los patrones de calcificación: histológicamente, las calcificaciones laminares de mayor tamaño se observan con mayor frecuencia en placas estables, mientras que las microcalcificaciones y las calcificaciones puntiformes o fragmentadas son más habituales en lesiones inestables.[4]

Clasificaciones morfológicas de la calcificación

La angio-TC se considera el estándar de referencia para la cuantificación y caracterización de las calcificaciones carotídeas, dada la elevada atenuación del calcio a los rayos X.[3,4] Sobre esta base se ha propuesto una clasificación en seis tipos de configuraciones de calcio visibles en angio-TC, con el objetivo de relacionar dichos patrones con la prevalencia de eventos cerebrovasculares:[3]

- **Tipo 1:** ausencia completa de calcificación en la placa.
- **Tipo 2:** calcificaciones intimales o superficiales.
- **Tipo 3:** calcificaciones profundas o voluminosas (bulky), definidas por un grosor >2 mm sin calcificación adventicial delgada asociada.
- **Tipo 4:** calcificaciones adventiciales con placa blanda interna <2 mm (signo de borde negativo).

- **Tipo 5:** patrón mixto con calcificaciones intimales y voluminosas.
- **Tipo 6:** signo de borde positivo, definido por calcificación adventicial <2 mm con placa blanda interna ≥2 mm.

En dicha serie, la mayor prevalencia de síntomas se observó en el tipo 6, en el que cerca del 90% de las placas eran sintomáticas, mostrando además la mayor correlación con AIT, ACV e infarto ipsilateral.[3] El signo de borde positivo se ha vinculado a un mayor riesgo de ACV por su asociación con la presencia de IPH intraplaca.

Fundamentos técnicos de la angio-TC en la caracterización de placa carotídea

La angio-TC constituye una modalidad particularmente atractiva para la evaluación de la placa carotídea por su amplia disponibilidad, rapidez de adquisición, relativa independencia del operador y elevada resolución espacial, lo que permite valorar simultáneamente el grado de estenosis y múltiples características morfológicas de la placa.[6] En el contexto del ACV, la angio-TC de cabeza y cuello forma parte habitual del estudio etiológico y aporta información que va más allá del lumen, incluyendo rasgos de superficie (irregularidades/ulceración), presencia de trombo intraluminal y distribución del componente calcificado y no calcificado.[6,7,8]

Desde el punto de vista de la caracterización tisular, la angio-TC permite aproximarse a la composición de placa mediante la atenuación medida en unidades Hounsfield (UH), lo que habilita distinguir de forma práctica grandes componentes como placa calcificada y componentes no calcificados (“blandos”).[6] En escenarios de investigación y cuantificación, también se ha demostrado la factibilidad de medir de manera reproducible parámetros geométricos y de composición utilizando procedimientos de análisis semiautomatizados sobre angio-TC clínica, con alta concordancia intra e interobservador.[10]

Sin embargo, la angio-TC presenta limitaciones inherentes para la identificación precisa de algunas características consideradas de alto riesgo. En particular, la diferenciación fina de ciertos componentes blandos puede verse condicionada por la superposición de atenuaciones, la resolución de contraste y factores técnicos de adquisición y reconstrucción.[6] Por otra parte, la evaluación del calcio puede afectarse por fenómenos de blooming y efectos de volumen parcial, que pueden influir en la estimación del tamaño real del componente calcificado y en la apreciación de estructuras adyacentes.[6] Aun con estas limitaciones, la angio-TC se considera el método de referencia para la cuantificación y caracterización morfológica de la calcificación carotídea.[3,4]

Clasificaciones morfológicas de la calcificación

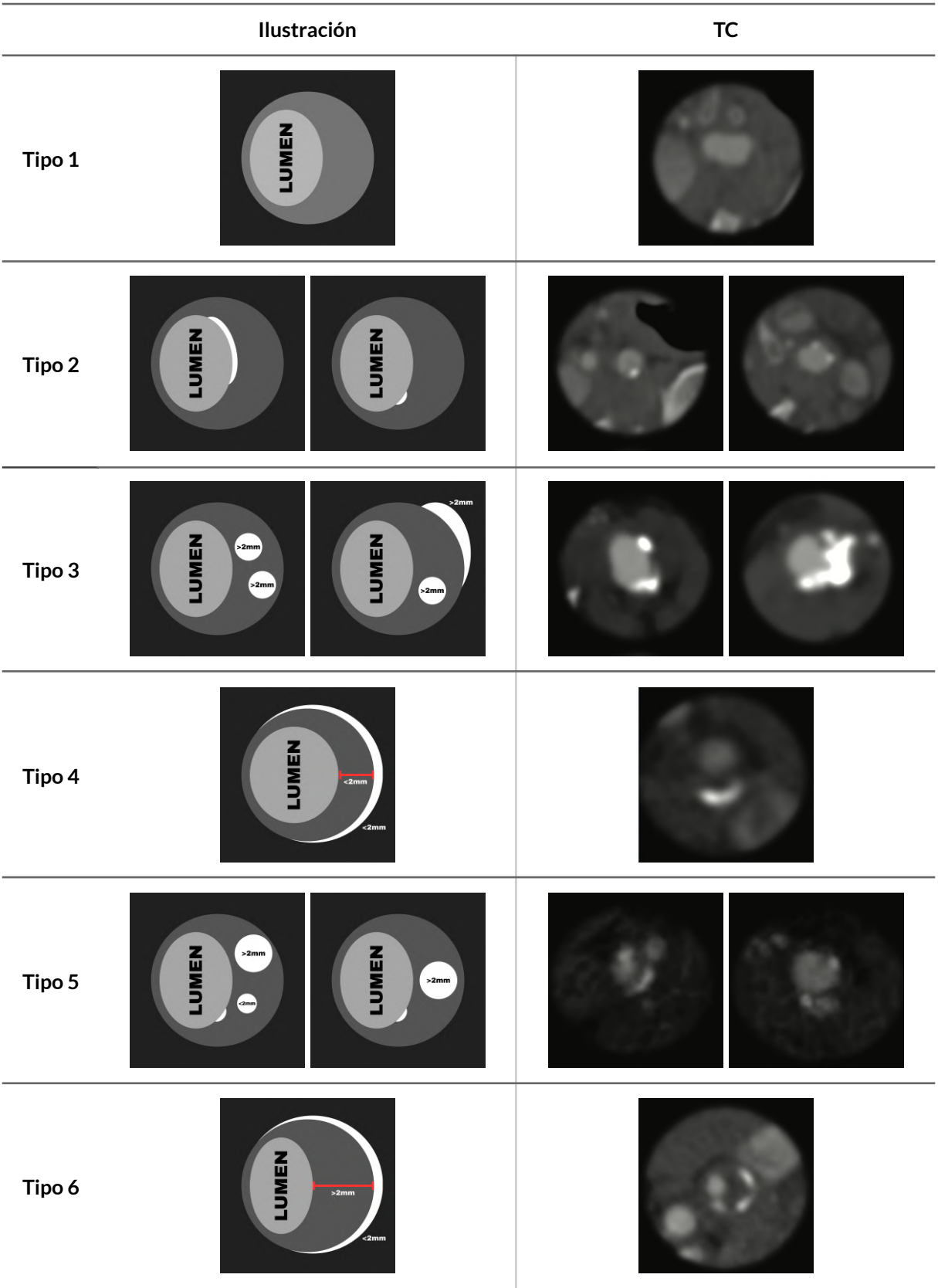


Figura 1. Representación esquemática de las configuraciones morfológicas de calcificación carotídea en angio-TC (Tipos 1–6) utilizadas para el subanálisis. *Elaboración propia.*

Desarrollo del sistema Plaque-RADS: fundamentos, categorías, rol de la RM y limitaciones de la angio-TC

La ausencia de un sistema unificado para describir y reportar las características de la placa carotídea motivó el desarrollo del sistema Plaque-RADS, destinado a estandarizar la terminología, el formato de los informes y la integración de composición y morfología de la placa más allá del simple grado de estenosis.[1] Plaque-RADS se concibe como un sistema multimodal aplicable a ultrasonido, angio-TC y resonancia magnética (RM), que se aplica por vaso y proporciona una evaluación morfológica complementaria a la cuantificación de la estenosis.[1]

En su estructura de puntuación, Plaque-RADS organiza el riesgo en categorías principales (1 a 4) y subtipos según rasgos de vulnerabilidad.[2] En términos operativos, se describen las siguientes categorías:

- **Plaque-RADS 1:** vaso/pared normal.[2]
- **Plaque-RADS 2:** espesor máximo de pared <3 mm.[2]
- **Plaque-RADS 3:** espesor máximo de pared >3 mm sin rasgos complejos, con subtipos:[2]
    - **3A:** placa >3 mm ***sin complejidad*** (sin rasgos complejos).[2]
    - **3B:** cápsula fibrosa delgada.[2]
    - **3C: ulceración**.[2]
- **Plaque-RADS 4:** placa ***complicada***, con subtipos:[2]
    - **4A:** hemorragia intraplaca (IPH).[2]
      4B: ruptura de la cápsula fibrosa.[2]
    - **4C:** trombo intraluminal.[2]

En este marco, las categorías **3 y 4** se consideran subtipos de **mayor riesgo**.[2]

Respecto de la RM, su rol es central porque varias de las características determinantes de las categorías de alto riesgo —en particular IPH, la integridad de la cápsula fibrosa (delgada o rota) y, según el caso, la evaluación detallada de rasgos de vulnerabilidad— se identifican de manera óptima mediante RM de pared vascular.[2,5] Por lo tanto, cuando la pregunta clínica o investigativa requiere confirmar o caracterizar con precisión estos rasgos (por ejemplo, para asignar subtipos 3B o 4A/4B), la RM resulta especialmente relevante.[2,5]

En contraste, la angio-TC ofrece ventajas prácticas (disponibilidad, rapidez y alta resolución espacial) para evaluar estenosis y rasgos morfológicos como la superficie/ulceración y la calcificación, pero presenta limitaciones para la caracterización fina de algunos componentes blandos por superposición de atenuaciones, y para la evaluación directa de la cápsula fibrosa; además, el calcio puede afectar la apreciación del lumen por fenómenos técnicos (p. ej., efecto de blooming), influyendo en la estimación de la estenosis.[5,6] Estas limitaciones han motivado propuestas de adaptación basada en angio-TC en contextos clínicos frecuentes (como el estudio etiológico del ACV), utilizando variables más operativas para estratificar riesgo cuando no se dispone de RM de pared de manera sistemática.

Clasificación Operativa CT-Plaque-RADS en Angio-TC

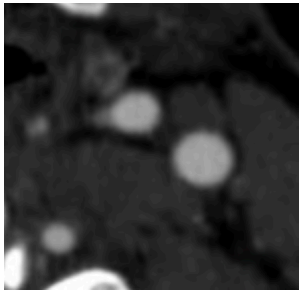
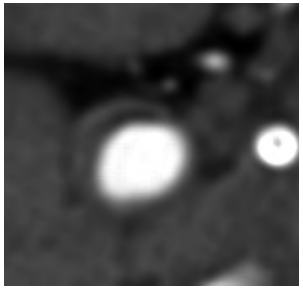
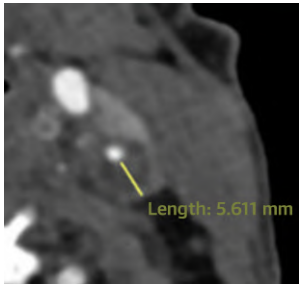
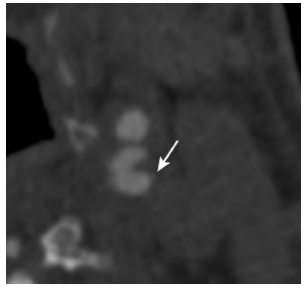
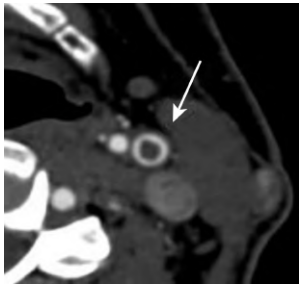
	CT Plaque-RADS 1	*CT Plaque-RADS 2*	*CT Plaque-RADS 3 A/B*	*CT Plaque-RADS 3C*	*CT Plaque-RADS 4C*
Ilustración					
Angio-TC					
Descripción	Sin placa. Pared arterial sin evidencia de placa aterosclerótica en el segmento evaluado (ausencia de engrosamiento focal y de componentes calcificados o no calcificados compatibles con placa).	Placa pequeña (<3 mm). Presencia de placa aterosclerótica con espesor máximo <3 mm (criterio de bajo espesor). Puede incluir componente calcificado y/o no calcificado, sin criterios de ulceración ni trombo intraluminal.	Placa ≥3 mm sin ulceración. Placa con espesor máximo ≥3 mm y sin ulceración evidente en la superficie luminal.	Placa ulcerada. Placa con ulceración, definida como un defecto/"cavidad" de la superficie de la placa que se comunica con el lumen, visible en planos ortogonales.	Trombo intraluminal. Presencia de trombo intraluminal asociado a la placa, identificado como defecto de repleción adyacente a la superficie luminal en fase arterial. Esta categoría se registra independientemente del espesor de la placa.

Figura 2. Esquema operativo de clasificación CT-Plaque-RADS aplicado en angio-TC: categorías registradas (1, 2, 3A/B, 3C y 4C) y limitaciones técnicas para subtipos dependientes de morfología intraplaca (IPH/estado de cápsula). Elaboración propia.

Adaptación basada en angio-TC y aplicación en ESUS

Dado que la identificación de hemorragia intraplaca (IPH) y la evaluación detallada de la cápsula fibrosa se realizan de manera óptima mediante RM de pared arterial —y que la angio-TC presenta limitaciones para caracterizar con precisión estos componentes intraplaca en la evaluación visual convencional— se han propuesto adaptaciones del enfoque Plaque-RADS para su aplicación basada en angio-TC en escenarios de práctica habitual.[2,5]

En el estudio de **Song et al.**, realizado en pacientes con ACV embólico de fuente indeterminada (ESUS) y estenosis carotídea <50%, se aplicó una clasificación Plaque-RADS modificada basada en angio-TC con cuatro categorías: pared normal; espesor máximo de placa <3 mm; espesor ≥3 mm o placa ulcerada; e IPH >50 mm^3 independientemente del grosor [2]. Es importante destacar que, en ese trabajo, la IPH no se estableció por inspección visual aislada, sino mediante segmentación/cuantificación semiautomatizada en angio-TC utilizando un software comercial (Elucid Bioimaging, Boston, MA), con revisión posterior por un neurorradiólogo.[2]

Aplicaciones de la inteligencia artificial en la caracterización de placas carotídeas mediante angiotomografía computada

El uso de inteligencia artificial (IA) aplicada a la caracterización de placas carotídeas mediante angiotomografía computada se encuentra actualmente en una etapa avanzada de desarrollo, con múltiples estudios que demuestran su utilidad técnica, aunque todavía en proceso de validación clínica para su adopción rutinaria. En particular, los algoritmos basados en aprendizaje profundo han mostrado un desempeño elevado en la segmentación automática y cuantificación de los distintos componentes de la placa carotídea, incluyendo lumen, calcio y componentes blandos, con niveles de precisión y reproducibilidad superiores al análisis visual convencional[14–16,13].

Diversos trabajos han evidenciado que estos sistemas permiten diferenciar placas estables de placas consideradas de mayor riesgo, en función de su composición y morfología, superando el enfoque tradicional centrado exclusivamente en el grado de estenosis. En este sentido, herramientas específicas como PRAEVAorta2 han demostrado una alta concordancia con la segmentación manual para la cuantificación de calcio, trombo y volumen total de placa, facilitando la identificación de placas asociadas a mayor riesgo de eventos cerebrovasculares, incluso en pacientes asintomáticos[14].

Entre las principales aplicaciones clínicas propuestas de la IA en este contexto se destaca la estratificación de riesgo. La identificación automatizada de placas con alto contenido de componentes blandos, bajo grado de calcificación y mayor volumen total se ha asociado con un mayor riesgo de eventos isquémicos, lo que podría influir en la selección de pacientes para tratamiento quirúrgico o endovascular, particularmente en escenarios donde la estenosis es leve o moderada[14–16]. Asimismo, la automatización del análisis permite reducir de manera significativa el tiempo de evaluación y la variabilidad interobservador, aportando mediciones más objetivas y reproducibles[14,15].

Otra ventaja relevante de la IA frente al análisis visual convencional es su capacidad para cuantificar de manera precisa los distintos componentes de la placa y evaluar características morfológicas complejas, como irregularidades de la superficie, ulceraciones y volumen total de placa[13,16]. Estudios recientes han mostrado altos niveles de concordancia intra e interobservador para estas mediciones, con coeficientes cercanos a la unidad en la cuantificación de volumen de placa y calcificación[14,15]. Además, los modelos basados en IA han demostrado una mayor sensibilidad y especificidad para la detección de placas vulnerables en comparación con la evaluación visual, con valores de sensibilidad y especificidad elevados en metaanálisis recientes[19].

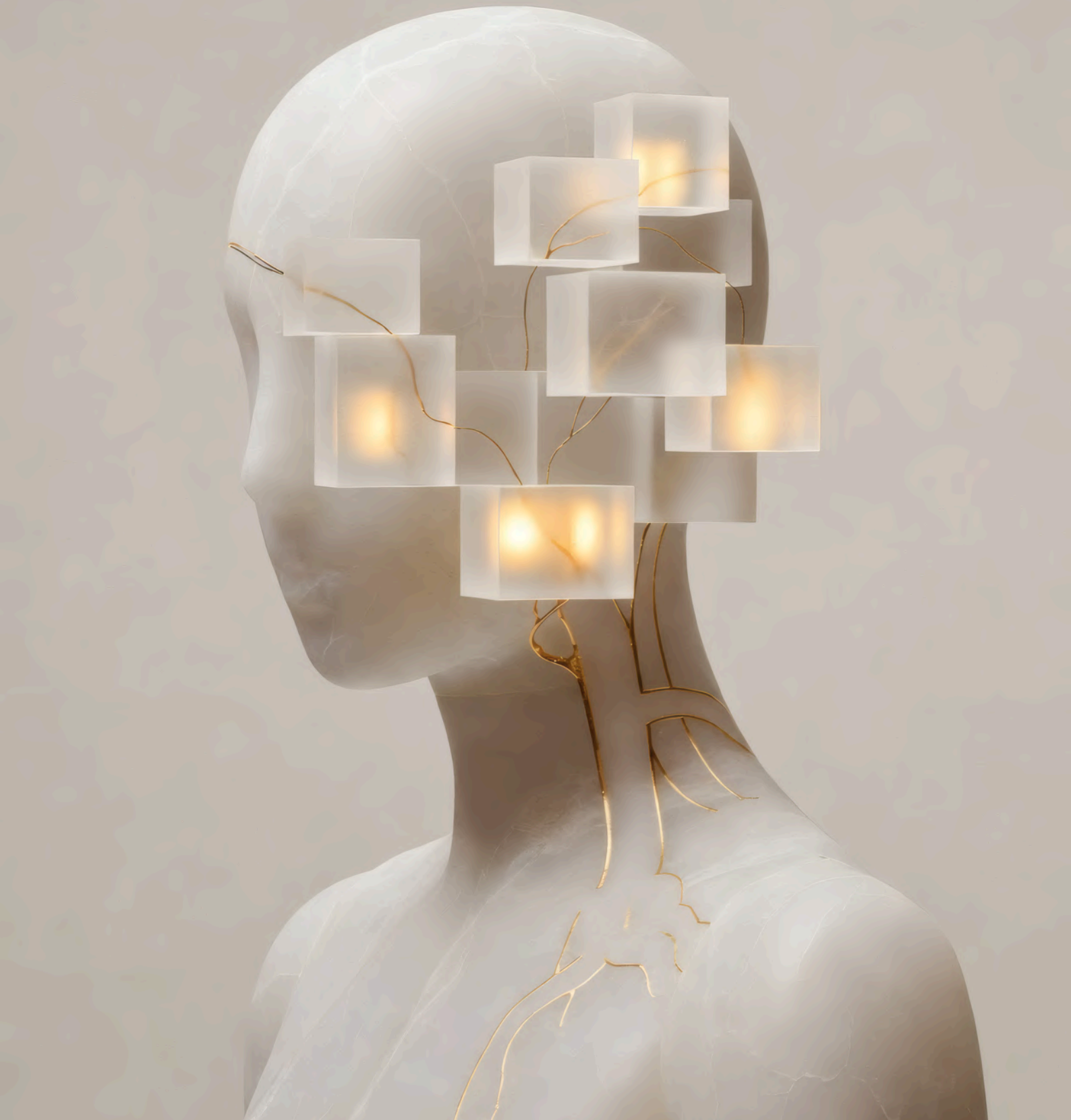
Las características de la placa carotídea más frecuentemente evaluadas mediante algoritmos de IA en estudios basados en angio-TC incluyen la composición tisular (calcio, núcleo lipídico, hemorragia intraplaca y matriz), la carga y distribución de la calcificación, el remodelado vascular expresado como espesor y volumen de pared, la morfología superficial y el análisis de textura mediante técnicas radiómicas[14–19]. En particular, la cuantificación automática de componentes blandos y la evaluación de la heterogeneidad de atenuación han mostrado asociación con inestabilidad de la placa y mayor riesgo de eventos neurológicos[13,17,18].

En los últimos años, también se han propuesto estrategias para integrar la IA con sistemas estandarizados de clasificación, como Plaque-RADS, en estudios basados en Angio-TC. Algoritmos capaces de segmentar automáticamente las características fundamentales del sistema Plaque-RADS permiten asignar categorías de riesgo de forma reproducible y eficiente, reduciendo la variabilidad interobservador y facilitando su aplicación en cohortes amplias y multicéntricas[14–16]. Esta integración resulta particularmente relevante en pacientes con estenosis no severas, donde la composición y morfología de la placa adquieren un papel central en la toma de decisiones clínicas.

En cuanto a las plataformas disponibles, distintos software y modelos basados en IA han sido validados para el análisis automatizado o semiautomatizado de placas carotídeas en Angio-TC. Entre ellos se encuentran soluciones comerciales como PRAEVAorta2, así como plataformas académicas como CAP-Net y modelos basados en arquitecturas ResUNet y PSPNet, que han demostrado alta precisión para la detección, segmentación y caracterización composicional de la placa[14–16,21,22].

A pesar de estos avances, la literatura coincide en señalar que la implementación clínica generalizada de la IA en la caracterización de placas carotídeas aún requiere validaciones externas adicionales, estudios multicéntricos y una mejor comprensión de la explicabilidad de los modelos, antes de su incorporación definitiva en la práctica clínica habitual[15,16].

RESULTADOS



Resultados

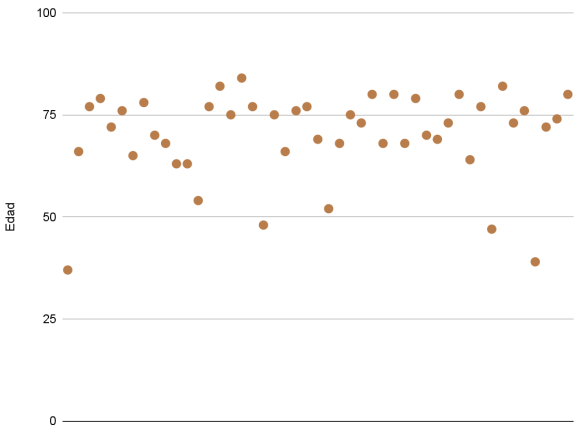
Características de la muestra

Se incluyeron 47 pacientes, con una edad media de 70,06 ± 10,88 años (rango 37–84). La distribución por sexo fue 26 (55,3%) varones y 21 (44,7%) mujeres.

		f	%
Sexo	**Hombre**	26	55.3%
	Mujer	21	44.7%
Total		47	100.0%

Tabla 1. Distribución por sexo de la cohorte (frecuencia y porcentajes).

Gráfico 1. Distribución individual de la edad



	N	Media	DE	Min	Max
Edad	47	70.06	10.88	37	84

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de la edad (años) de la cohorte.

Descripción angiográfica y morfológica

Según NASCET, en la **carótida derecha** predominó la estenosis <50% (41; 87,2%), seguida por 50–69% (3; 6,4%) y ≥70% (3; 6,4%). En la **carótida izquierda** también predominó <50% (40; 85,1%), seguida por 50–69% (4; 8,5%) y ≥70% (3; 6,4%).

		f Derecha	% Derecha	f Izquierda	% Izquierda
NASCET	**<50%**	41	87.2%	40	85.1%
	50–69%	3	6.4%	4	8.5%
	≥70%	3	6.4%	3	6.4%
Total		47	100.0%	47	100%

Tabla 3. Distribución del grado de estenosis por NASCET (carótida derecha e izquierda).

La localización de la placa en el **lado derecho** fue: sin placa 4 (8,5%), bifurcación 17 (36,2%), bulbo 9 (19,1%), bulbo + bifurcación 15 (31,9%) y carótida interna 2 (4,3%). En el **lado izquierdo** se observó: sin placa 5 (10,6%), bifurcación 8 (17,0%), bulbo 13 (27,7%), bulbo + bifurcación 19 (40,4%) y carótida interna 1 (2,1%), con 1 caso (2,1%) no evaluable.

		f Derecha	% Derecha	f Izquierda	% Izquierda
Loc	Sin Placa	4	8.5%	5	10.6%
	Bifurcación	17	36.2%	8	17.0%
	Bulbo	9	19.1%	13	27.7%
	Bulbo + Bifurcación	15	31.9%	19	40.4%
	Carótida interna	2	4.3%	1	2.1%
	No Evaluable	-	-	1	2.1%
Total		47	100.0%	47	100.0%

Tabla 4. Distribución de la localización de la placa (carótida derecha e izquierda). *Loc*: localización.

En la **carótida derecha** (observador 1), las categorías de CT Plaque-RADS fueron: 1: 8 (17,0%), 2: 23 (48,9%), 3A/B: 11 (23,4%) y 3C: 5 (10,6%). En la **carótida izquierda** (observador 1), las categorías fueron: 1: 6 (12,8%), 2: 16 (34,0%), 3A/B: 18 (38,3%) y 3C: 6 (12,8%), con 1 caso (2,1%) no evaluable.

		f Derecha	% Derecha	f Izquierda	% Izquierda
CT Plaque RADS	1	8	17.0%	6	12.8%
	2	23	48.9%	16	34.0%
	3A/B	11	23.4%	18	38.3%
	3C	5	10.6%	6	12.8%
No Evaluable		-	-	1	2.1%
Total		47	100.0%	47%	100.0%

Tabla 5. Distribución de categorías CT Plaque-RADS (Observador 1) por lado (derecha e izquierda).

En el **lado derecho** (observador 1), los subtipos de calcio se distribuyeron en: tipo 1: 14 (29,8%), tipo 2: 9 (19,1%), tipo 3: 12 (25,5%), tipo 4: 4 (8,5%), tipo 5: 7 (14,9%) y tipo 6: 1 (2,1%). En el **lado izquierdo** (observador 1), se observaron: tipo 1: 9 (19,1%), tipo 2: 4 (8,5%), tipo 3: 17 (36,2%), tipo 4: 3 (6,4%), tipo 5: 7 (14,9%) y tipo 6: 6 (12,8%), con 1 caso (2,1%) no evaluable.

		f Derecha	% Derecha	f Izquierda	% Izquierda
Tipo de Calcio	1	14	29.8%	9	19.1%
	2	9	19.1%	4	8.5%
	3	12	25.5%	17	36.2%
	4	4	8.5%	3	6.4%
	5	7	14.9%	7	14.9%
	6	1	2.1%	6	12.8%
No Evaluable				1	2.1%
Total		47	100.0%	47	100.0%

Tabla 6. Distribución de subtipos de calcio (Observador 1) por lado (derecha e izquierda).

Reproducibilidad interobservador

La concordancia interobservador fue muy alta para el tipo de calcio (**derecha κ=0,95; n=47**; **izquierda κ=0,94; n=46**) y alta para CT Plaque-RADS (**derecha κ=0,83; n=47**; **izquierda κ=0,87; n=46**).

	κ	n
Tipo de Calcio D	0.95	47
Tipo de Calcio I	0,94	46
CT Plaque-RADS D	0,83	47
CT Plaque-RADS I	0,87	46

Tabla 7. Concordancia interobservador (κ) para CT Plaque-RADS y tipo de calcio, por lado (derecha e izquierda).

Asociación de Edad y CT Plaque-RADS

Al estratificar por edad (<70 vs ≥70 años), no se observó asociación estadísticamente significativa con CT Plaque-RADS **derecha** (**p=0,149;** n=47). En CT Plaque-RADS **izquierda** se observó una **asociación estadisticamente significativa** (**p=0,020**; n=46). En ≥70 años se observó una mayor proporción de categorías 3A/B–3C en la carótida izquierda, mientras que en <70 predominó la categoría 2.

			CT Plaque-RADS - Carotida Izquierda				Total
			1	2	3 A/B	3C	
Cat. Edad	<70 años	Count	5	8	4	2	19
		Row %	26.3%	42.1%	21.1%	10.5%	100.0%
	≥70 años	Count	1	8	**14**	4	27
		Row %	3.7%	29.6%	**51.9%**	14.8%	100.0%
Total		Count	6	16	18	6	46
		Row %	13.0%	34.8%	39.1%	13.0%	100.0%

Tabla 8. Asociación entre edad (categorizada) y variables de imagen (CT Plaque-RADS, NASCET y tipo de calcio), por lado.

Asociación de Edad y NASCET

En **carótida derecha**, al estratificar por edad (<70 vs ≥70 años), **no se observó asociación global** entre edad y categorías NASCET (χ^2 de Pearson, p=0,097; n=47). **Sin embargo, la prueba de tendencia** (linear-by-linear) fue significativa (p=0,044), consistente con mayor proporción de estenosis ≥50% en el grupo ≥70 años (21,4%) respecto de <70 años (0%).

En **carótida izquierda**, **no se observó asociación** entre edad y categorías NASCET (p=0,767; n=47), ni tendencia lineal significativa (p=0,573).

*** Dado el bajo número de casos en las categorías de estenosis moderada/severa (≥50%), los resultados de los cruces estratificados por edad deben interpretarse con prudencia. La ausencia de casos ≥50% en el grupo <70 años genera celdas con recuentos pequeños (incluyendo ceros), lo cual puede afectar la robustez de las pruebas de asociación.

Asociación de Edad y Tipos de Calcio

Al estratificar por edad (<70 vs ≥70 años), en la **carótida derecha** se observó una **tendencia significativa** hacia tipos de calcificación de mayor categoría en el grupo ≥70 años (linear-by-linear: p=0,034; n=47), aunque la asociación global no fue significativa (chi-cuadrado de Pearson: p=0,262). Descriptivamente, en <70 años predominó el calcio tipo 1 (42,1%), mientras que en ≥70 años aumentaron los tipos 3 y 5 (32,1% y 21,4%, respectivamente).

En la **carótida izquierda**, se observó una **tendencia significativa** entre edad y tipo de calcificación (linear-by-linear: p=0,038; n=46), sin asociación global significativa (chi-cuadrado de Pearson: p=0,177). Descriptivamente, el grupo ≥70 años presentó menor frecuencia de calcio tipo 1 (7,4% vs 36,8%) y mayor proporción de calcio tipo 6 (18,5% vs 5,3%) respecto de <70 años.

Asociaciones entre Sexo y CT Plaque-RADS, NASCET y Tipo de Calcio

No se observaron asociaciones entre sexo y CT Plaque-RADS (derecha p=0,836; n=47; izquierda p=0,909; n=46), ni entre **sexo y NASCET (**derecha p=0,510; izquierda p=0,634; n=47), ni entre **sexo y tipo de calcio** (derecha p=0,796; n=47; izquierda p=0,507; n=46).

Relaciones internas entre variables de imagen

Asociación entre NASCET y CT Plaque-RADS

Se observó asociación entre la categoría de estenosis NASCET **derecha** y CT Plaque-RADS **derecha** (p=0,007; n=47). La **prueba de tendencia también fue significativa** (p tendencia=0,008), compatible con mayor severidad morfológica en categorías de estenosis más altas. Descriptivamente, las categorías de estenosis moderada/severa (50–69% y ≥70%) se concentraron en categorías más altas de CT Plaque-RADS (predominantemente 3A/B–3C), mientras que en estenosis <50% predominó CT Plaque-RADS 2.

			CT Plaque RADS Carótida Derecha				Total
			1	2	3 A/B	3C	
NASCET	<50%	Count	8	23	6	4	41
		Row %	19.5%	56.1%	14.6%	9.8%	100.0%
	50–69%	Count	0	0	3	0	3
		Row %	.0%	.0%	100.0%	.0%	100.0%
	≥70%	Count	0	0	2	1	3
		Row %	.0%	.0%	66.7%	33.3%	100.0%
Total		Count	8	23	11	5	47
		Row %	17.0%	48.9%	23.4%	10.6%	100.0%

Tabla 9. Asociación entre el grado de estenosis por NASCET y CT Plaque-RADS en carótida derecha (Ob1)

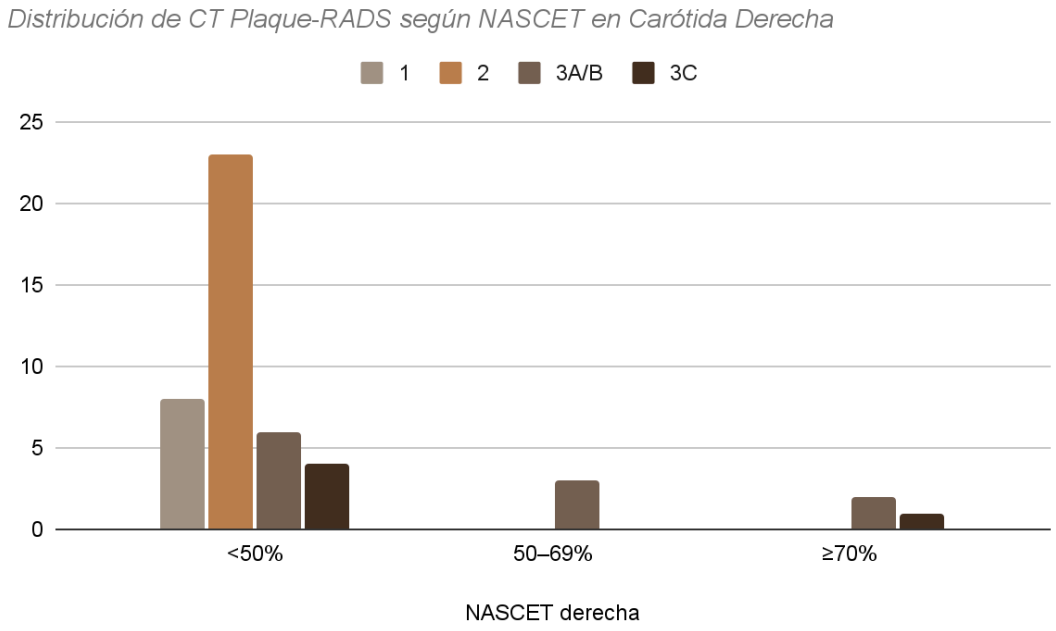


Gráfico 2. Distribución de CT Plaque-RADS según estenosis NASCET (carótida derecha).

En la **carótida izquierda**, **no se observó asociación global** entre la categoría de estenosis por NASCET y la categoría de CT Plaque-RADS (**p=0,116**; n=46). Sin embargo, la **prueba de tendencia fue significativa (p=0,044**), lo que sugiere un patrón compatible con incremento de la severidad morfológica a medida que aumentan las categorías de estenosis.

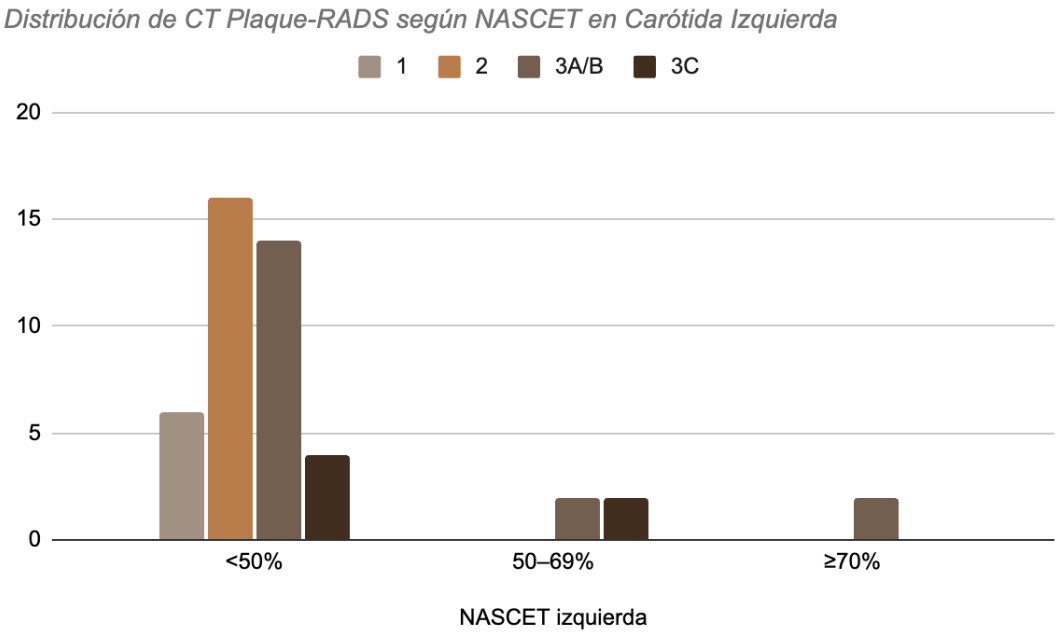


Gráfico 3. Distribución de CT Plaque-RADS según estenosis NASCET (carótida izquierda).

Asociación entre CT Plaque-RADS y Tipo de Calcio

Se observó **asociación global** entre CT Plaque-RADS y el tipo de calcio en carótida derecha (**p=0,008**; n=47), **sin** evidencia de **tendencia lineal** (**p=0,127**), lo que sugiere una distribución de subtipos de calcificación **heterogénea** entre categorías de placa.

En carótida izquierda, se observó **asociación global** (**p=0,001**; n=46) y además una **tendencia lineal significativa** (**p<0,001**), compatible con un **gradiente ordenado** en la distribución de los tipos de calcificación a medida que aumenta la categoría de CT Plaque-RADS.

***Algunos cruces presentaron celdas con recuentos bajos, por lo que los valores de p deben interpretarse con cautela y las comparaciones por subgrupos se consideran exploratorias.

			TIpo de Calcio - Carótida Derecha						Total
			1	2	3	4	5	6	
CT Plaque RADS Derecha	1	Count	7	0	0	0	1	0	8
		Row %	87.5%	.0%	.0%	.0%	12.5%	.0%	100.0%
	2	Count	5	7	4	2	5	0	23
		Row %	21.7%	30.4%	17.4%	8.7%	21.7%	.0%	100.0%
	3 A/B	Count	1	0	6	2	1	1	11
		Row %	9.1%	.0%	54.5%	18.2%	9.1%	9.1%	100.0%
	3C	Count	1	2	2	0	0	0	5
		Row %	20.0%	40.0%	40.0%	.0%	.0%	.0%	100.0%
Total		Count	14	9	12	4	7	1	47
		Row %	29.8%	19.1%	25.5%	8.5%	14.9%	2.1%	100.0%

Tabla 10. Asociación entre CT Plaque-RADS y tipo de calcio en carótida derecha (Observador 1).

			Tipo de Calcio - Carótida Izquierda						Total
			1	2	3	4	5	6	
CT Plaque RADS Izquierda	1	Count	6	0	0	0	0	0	6
		Row %	100.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	100.0%
	2	Count	2	3	7	1	3	0	16
		Row %	12.5%	18.8%	43.8%	6.3%	18.8%	.0%	100.0%
	3A/B	Count	1	1	7	1	3	5	18
		Row %	5.6%	5.6%	38.9%	5.6%	16.7%	27.8%	100.0%
	3C	Count	0	0	3	1	1	1	6
		Row %	.0%	.0%	50.0%	16.7%	16.7%	16.7%	100.0%
Total		Count	9	4	17	3	7	6	46
		Row %	19.6%	8.7%	37.0%	6.5%	15.2%	13.0%	100.0%

Tabla 11. Asociación entre CT Plaque-RADS y tipo de calcio en carótida izquierda (Observador 1).

Asociación entre NASCET y Tipo de Calcio

En **carótida derecha** se observó una **asociación global** entre NASCET y tipo de calcio (**χ^2 de Pearson p=0,032; n=47**). No obstante, la **prueba de tendencia** no fue significativa (**p=0,451**), por lo que el patrón no sugiere un incremento monotónico. Dado el **bajo número de casos** en las categorías 50–69% y ≥70% (n=3 cada una), estos resultados deben interpretarse con cautela.

			Tipo de Calcio - Carótida Derecha						Total
			1	2	3	4	5	6	
NASCET Derecho	<50%	Count	12	9	10	3	7	0	41
		Row %	29.3%	22.0%	24.4%	7.3%	17.1%	.0%	100.0%
	50–69%	Count	1	0	1	1	0	0	3
		Row %	33.3%	.0%	33.3%	33.3%	.0%	.0%	100.0%
	≥70%	Count	1	0	1	0	0	1	3
		Row %	33.3%	.0%	33.3%	.0%	.0%	33.3%	100.0%
Total		Count	14	9	12	4	7	1	47
		Row %	29.8%	19.1%	25.5%	8.5%	14.9%	2.1%	100.0%

Tabla 12. Asociación entre el grado de estenosis por NASCET y tipo de calcio en carótida derecha (Observador 1).

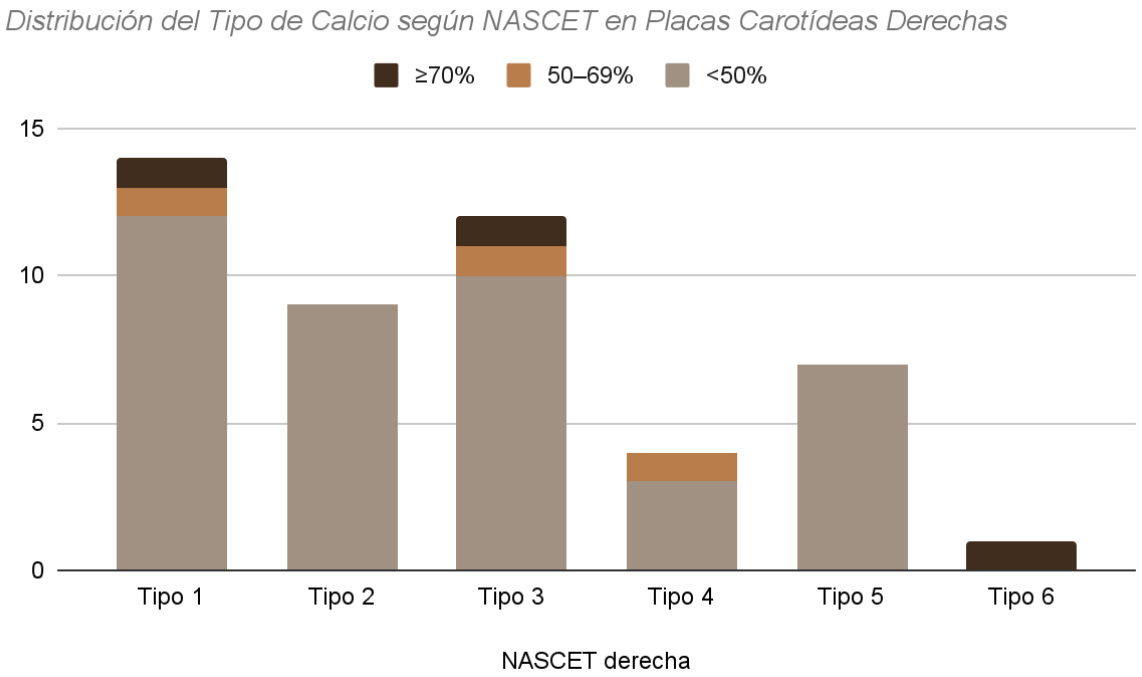


Gráfico 4. Distribución de tipos de calcio según estenosis NASCET (carótida derecha).

En **carótida izquierda** se observó **asociación global** entre NASCET y tipo de calcio (**p<0,001; n=46**) y una **tendencia lineal significativa** (**p<0,001**). Descriptivamente, en estenosis ≥50% se concentraron subtipos de calcio de mayor jerarquía, destacándose el **tipo 6** (50–69%: 75%; ≥70%: 100%).

			Tipo de Calcio - Carótida Izquierda						Total
			1	2	3	4	5	6	
NASCET Izquierdo	<50%	Count	9	4	17	2	7	1	40
		Row %	22.5%	10.0%	42.5%	5.0%	17.5%	2.5%	100.0%
	50–69%	Count	0	0	0	1	0	**3**	4
		Row %	.0%	.0%	.0%	25.0%	.0%	75.0%	100.0%
	≥70%	Count	0	0	0	0	0	**2**	2
		Row %	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	100.0%	100.0%
Total		Count	9	4	17	3	7	6	46
		Row %	19.6%	8.7%	37.0%	6.5%	15.2%	13.0%	100.0%

Tabla 13. Asociación entre el grado de estenosis por NASCET y tipo de calcio en carótida izquierda (Observador 1).

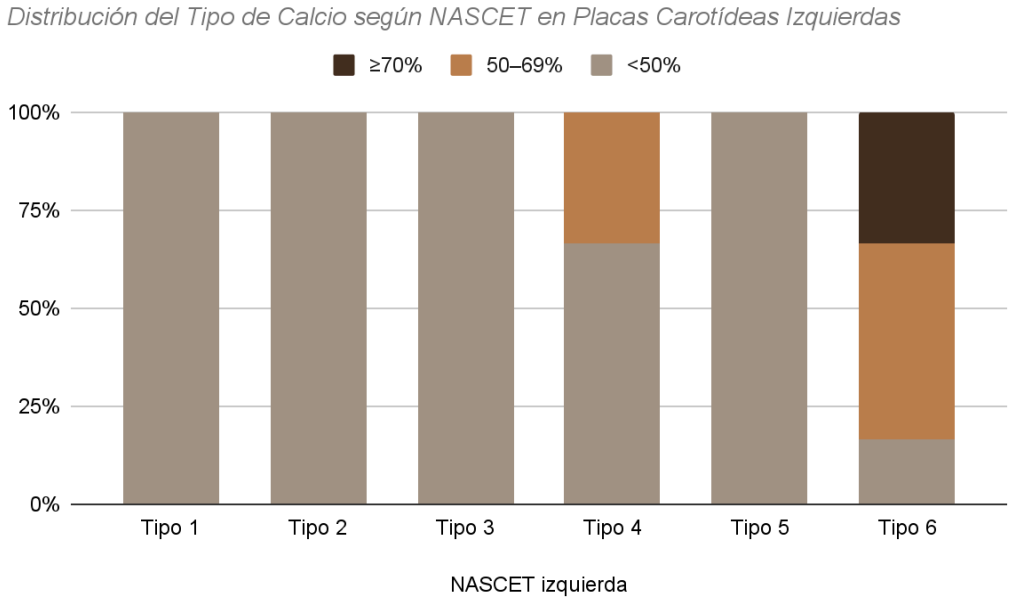


Gráfico 5. Distribución de tipos de calcio según estenosis NASCET (carótida izquierda).

Localización y CT Plaque-RADS

Se observó una **asociación estadísticamente significativa** entre la localización segmentaria de la placa y la categoría CT Plaque-RADS en ambos lados (derecha: **p<0,001;** n=47; izquierda: **p<0,001**; n=46). En **carótida derecha,** las placas localizadas en *bifurcación* se clasificaron predominantemente como CT Plaque-RADS 2 (70,6%), mientras que en el *segmento bulbo + bifurcación* predominó CT Plaque-RADS 3A/B (53,3%). En **carótida izquierda**, en *bulbo y bulbo + bifurcación* predominó CT Plaque-RADS 3A/B (46,2% y 52,6%, respectivamente), mientras que en *bifurcación* predominó CT Plaque-RADS 2 (50%). Las categorías de baja frecuencia (p. ej., carótida interna) deben interpretarse con cautela.

			CT Plaque RADS - Derecha				Total
			1	2	3 A/B	3 C	
Localización	Sin Placa	Count	4	0	0	0	4
		Row %	100.0%	.0%	.0%	.0%	100.0%
	Bifurcación	Count	3	12	0	2	17
		Row %	17.6%	70.6%	.0%	11.8%	100.0%
	Bulbo	Count	1	4	2	2	9
		Row %	11.1%	44.4%	22.2%	22.2%	100.0%
	Bulbo + Bifurcación	Count	0	6	8	1	15
		Row %	.0%	40.0%	53.3%	6.7%	100.0%
	Carótida interna	Count	0	1	1	0	2
		Row %	.0%	50.0%	50.0%	.0%	100.0%
Total		Count	8	23	11	5	47
		Row %	17.0%	48.9%	23.4%	10.6%	100.0%

Tabla 14. Asociación entre la localización de la placa y CT Plaque-RADS en carótida derecha (Observador 1).

			CT Plaque-RADS - Izquierda				Total
			1	2	3 A/B	3C	
Localización	Sin Placa	Count	5	0	0	0	5
		Row %	100.0%	.0%	.0%	.0%	100.0%
	Bifurcación	Count	1	4	1	2	8
		Row %	12.5%	50.0%	12.5%	25.0%	100.0%
	Bulbo	Count	0	5	6	2	13
		Row %	.0%	38.5%	46.2%	15.4%	100.0%
	Bulbo + Bifurcación	Count	0	7	10	2	19
		Row %	.0%	36.8%	52.6%	10.5%	100.0%
	Carótida interna	Count	0	0	1	0	1
		Row %	.0%	.0%	100.0%	.0%	100.0%
Total		Count	6	16	18	6	46
		Row %	13.0%	34.8%	39.1%	13.0%	100.0%

Tabla 15. Asociación entre la localización de la placa y CT Plaque-RADS en carótida izquierda (Observador 1).

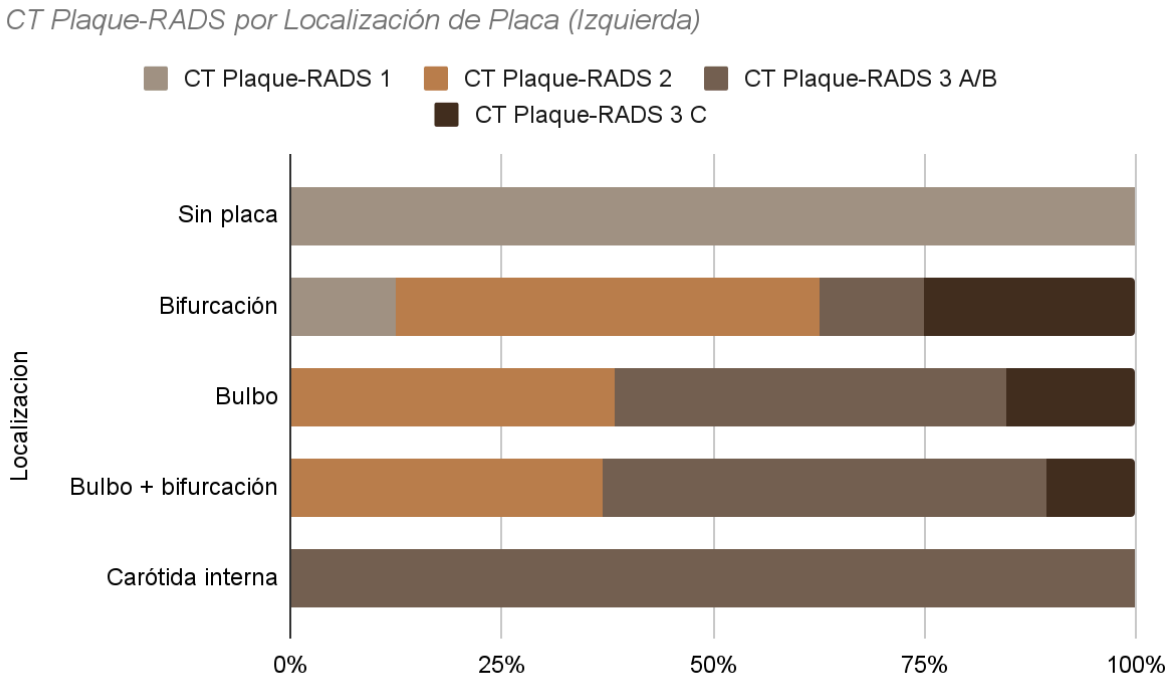


Gráfico 6. Distribución de CT Plaque-RADS según localización de la placa (carótida izquierda)

Localización y Tipo de Calcio

Se observó una **asociación estadísticamente significativa** entre la localización de la placa y el tipo de calcio en la **carótida derecha** (**p<0,001**; n=47). Descriptivamente, la bifurcación y el segmento bulbo+bifurcación concentraron una mayor proporción de subtipos de calcio intermedios/altos (tipos 3–5), mientras que en el bulbo se observó una distribución más heterogénea de subtipos. Dado que

algunas combinaciones localización–subtipo tuvieron recuentos bajos (por ejemplo, carótida interna), la interpretación de patrones finos debe realizarse con cautela.

En la **carótida izquierda también se observó asociación** entre localización y tipo de calcio (**p=0,002**; n=46). Descriptivamente, el bulbo y el segmento bulbo+bifurcación mostraron una mayor presencia de subtipos de calcio intermedios/altos (particularmente tipos 3–6). Las categorías con baja frecuencia (p.ej., carótida interna) y las celdas con recuentos pequeños pueden influir en la estabilidad de las proporciones, por lo que estos hallazgos se interpretan de manera descriptiva.

DISCUSIÓN



Discusión

El presente trabajo se propuso desplazar el foco desde una evaluación carotídea centrada casi exclusivamente en el porcentaje de estenosis hacia una lectura más integral en la angio-TC de vasos de cuello, incorporando la morfología y composición de la placa mediante CT Plaque-RADS y un subanálisis del patrón de calcificación. En la práctica clínica, la estimación de estenosis por NASCET es rápida, reproducible y ampliamente internalizada en los flujos de trabajo, lo que favorece que, bajo presión asistencial y volumen de estudios, el informe tienda a simplificarse en "cuánto estenosa" la lesión. Sin embargo, la estenosis es solo una dimensión del fenómeno: la luz resume un resultado final, mientras que el riesgo embólico se vincula a lo que ocurre en la pared y en la superficie de la placa. En ese sentido, el grado de estenosis no necesariamente captura la totalidad del riesgo asociado a una placa con rasgos morfológicos desfavorables.[6,8]

Interpretación de los hallazgos: por qué importa mirar la placa

Los resultados muestran que las variables de imagen no se comportan de forma aislada. La asociación observada entre NASCET y CT Plaque-RADS en la carótida derecha sugiere que, cuando la severidad luminal aumenta, tienden a concentrarse categorías más altas de clasificación morfológica. Esta relación es clínicamente atendible y apoya que la clasificación estructurada acompaña la severidad hemodinámica cuando ésta es relevante. En la carótida izquierda, si bien la asociación global no fue significativa, la presencia de una tendencia lineal sugiere un patrón compatible con incremento de severidad morfológica a medida que aumentan las categorías de estenosis, lo que resulta congruente con la fisiopatología de progresión aterosclerótica. No obstante, el punto principal es otro: CT Plaque-RADS permite ordenar y comunicar fenotipos de placa con un lenguaje uniforme, prestando atención a componentes que el porcentaje luminal no resume por sí solo. Esto resulta particularmente valioso en el contexto actual, donde la angio-TC es un estudio frecuente en la evaluación de enfermedad carotídea y del ictus, y donde la necesidad de estandarizar descripciones cobra relevancia para la toma de decisiones y para la investigación clínica.[2,6,8,24]

Desde una perspectiva práctica, la utilidad de un sistema como Plaque-RADS es obligar a mirar aquello que, por hábito o por escasez de tiempo, puede "pasarse por alto": morfología, componentes y rasgos de superficie. Existen escenarios clínicos en los que una placa con rasgos de alto riesgo puede ser relevante aun sin estenosis severa, y la literatura sobre características de placa en angio-TC respalda que determinados marcadores pueden asociarse a ictus y aportar estratificación adicional respecto de la estenosis aislada.[6,8]

Subanálisis de calcio: del "presente/ausente" al patrón

Un aporte central del estudio fue tratar la calcificación como un componente heterogéneo, no reducible a "hay/no hay calcio". En nuestra cohorte, CT Plaque-RADS se asoció con el tipo de calcio en ambos lados; sin embargo, el patrón no fue idéntico: en carótida izquierda se observó además una tendencia lineal marcada, compatible con un gradiente ordenado hacia subtipos de calcificación de mayor jerarquía a medida que aumenta la categoría morfológica. En carótida derecha, en cambio, la asociación fue global pero sin evidencia de tendencia, lo que sugiere una relación más heterogénea (no necesariamente monotónica). En resumen, estos hallazgos refuerzan que el calcio es un atributo con estructura interna y que su patrón se distribuye de manera no aleatoria entre fenotipos de placa.[3,4]

Asimismo, NASCET se asoció con el tipo de calcio de forma robusta en el lado izquierdo, donde además se observó tendencia lineal; en el lado derecho se observó asociación global pero sin gradiente monotónico, lo que indica que la relación entre estenosis y patrón de calcificación puede no ser estrictamente "a mayor estenosis, mayor calcio" en todos los contextos, especialmente cuando

existen categorías con baja frecuencia. Este matiz es importante porque evita una lectura simplista y apoya el enfoque de fenotipado: el valor del calcio no está solo en "cuánto" sino en "cómo".[3,4]

La literatura sobre calcificaciones carotídeas enfatiza la heterogeneidad morfológica y la necesidad de criterios operativos para describirlas en imagen, lo que respalda la lógica de un subanálisis por subtipos y no solo por presencia o ausencia.[3,4] En este trabajo, además, la muy alta reproducibilidad interobservador para la clasificación de calcio aporta un argumento de aplicabilidad: si el patrón puede describirse de forma consistente, su incorporación al informe estructurado es factible sin introducir variabilidad entre lectores.

Dado que las categorías de estenosis moderada y severa tuvieron pocos casos, la interpretación de patrones dentro de esos subgrupos debe realizarse con cautela. En ese contexto, el mensaje relevante no es "un subtipo específico predice X", sino que el patrón de calcificación se asocia de manera sistemática con el fenotipo morfológico y, en el lado izquierdo, también con la severidad luminal, apoyando su consideración en el informe radiológico.

Localización: el territorio también habla

La asociación marcada entre localización y categoría CT Plaque-RADS en ambos lados aporta coherencia anatómica al análisis. La segmentación por bifurcación, bulbo y segmentos combinados permite organizar la descripción en un lenguaje que coincide con la forma en que médicos no radiólogos piensan la enfermedad carotídea, y ayuda a identificar patrones de distribución del fenotipo de placa por segmento.[6]

Además, el hallazgo de asociación entre localización y tipo de calcio (en ambos lados) amplía el mensaje: la anatomía segmentaria no solo ordena dónde se asienta la placa, sino que también se vincula con cómo se expresa su componente calcificado. En términos de implementación, esto refuerza que el informe estructurado no es "más información", sino información mejor organizada y potencialmente más accionable.

Reproducibilidad e implicancias para la práctica

La reproducibilidad interobservador fue alta para CT Plaque-RADS y muy alta para el tipo de calcio. Esta consistencia sugiere que, aun en un contexto realista de interpretación de angio-TC, un sistema estructurado permite acuerdos confiables. En la práctica cotidiana, el tiempo es un factor crítico: los sistemas estructurados transforman una descripción libre (más variable) en un flujo de decisión categórico, que puede volverse más eficiente con entrenamiento. En ese sentido, la estandarización no solo mejora la comunicación, sino que puede facilitar la incorporación del análisis morfológico sin un costo extra de tiempo.[2]

Variables demográficas y fenotipo de placa

En los cruces con edad, se observaron asociaciones significativas con CT Plaque-RADS izquierda, con NASCET derecha (mediante prueba de tendencia) y con el tipo de calcio en ambos lados (tendencia), lo que sugiere que la edad se relaciona con la expresión del fenotipo de placa y con la morfología de la calcificación en esta cohorte. En cambio, no se observaron asociaciones significativas con el sexo. Conceptualmente, esto refuerza el argumento central: dentro de esta muestra, las relaciones más informativas emergen entre las propias variables de imagen (fenotipo, calcio, localización y estenosis), más que desde variables demográficas simples.

Limitaciones

Este estudio debe interpretarse considerando el tamaño muestral y la baja frecuencia de algunas categorías (en particular estenosis ≥50%), lo que limita inferencias por subgrupos y favorece celdas con recuentos pequeños. Además, la lectura de angio-TC puede estar influida por parámetros técnicos (p. ej., ventana/nivel, resolución, espesor de corte) y por mimickers en hallazgos sutiles (por ejemplo, calcificaciones puntiformes pueden simular irregularidades de superficie/pequeñas úlceras), por lo que la estandarización de criterios y la reproducibilidad reportada adquieren aún mayor relevancia.[3,4] Finalmente, el trabajo evalúa asociaciones internas entre variables de imagen; la validación en muestras mayores y la evaluación de desenlaces clínicos constituirían pasos futuros deseables.[2,24]



CONCLUSIÓN

Conclusión

En esta cohorte de pacientes evaluados mediante angio-TC de vasos de cuello, la aplicación de un esquema estructurado de caracterización de placa carotídea basado en CT Plaque-RADS, complementado con un subanálisis morfológico del calcio, permitió describir de manera estandarizada el fenotipo de placa y explorar su relación con variables angiográficas clásicas.

Los resultados muestran que el grado de estenosis por NASCET no agota la información relevante: se identificaron asociaciones entre estenosis y categoría de placa (principalmente en carótida derecha), y asociaciones entre fenotipo de placa y patrón de calcificación, así como entre patrón de calcificación y estenosis, con señal más marcada en el lado izquierdo. Además, la localización segmentaria se asoció de manera marcada con la categoría de placa, reforzando la importancia de integrar el componente anatómico en la interpretación. Adicionalmente, la edad se asoció con variables de imagen seleccionadas, mientras que no se observaron asociaciones significativas con el sexo.

Desde una perspectiva de aplicabilidad, la reproducibilidad interobservador fue alta para CT Plaque-RADS y muy alta para la clasificación morfológica del calcio, lo que sugiere que el uso de un reporte estructurado es factible en la práctica y puede favorecer una comunicación más clara y consistente entre profesionales. En conjunto, estos hallazgos apoyan la incorporación sistemática de la morfología y constituyentes de la placa en la evaluación carotídea por angio-TC, complementando la medición de estenosis y aportando una aproximación más integral al riesgo potencial asociado a la enfermedad aterosclerótica carotídea.

Finalmente, si bien la interpretación de subgrupos debe considerarse con cautela cuando existen categorías de baja frecuencia, el enfoque propuesto constituye una base sólida para estudios posteriores con mayor tamaño muestral y para futuras validaciones orientadas a desenlaces clínicos, con el objetivo de consolidar el valor del fenotipado de placa en la estratificación de riesgo y en la toma de decisiones.

BIBLIOGRAFÍA



Bibliografía

1. Saba L, Cau R, Murgia A, et al. Carotid Plaque-RADS: A Novel Stroke Risk Classification System. JACC Cardiovasc Imaging. 2024;17(1):62-75.

2. Song JW, Phi HQ, Koneru M, et al. Prevalence of High-Risk CTA-Based Carotid Plaque-RADS Subtypes in Patients With Embolic Stroke of Undetermined Source. Stroke. 2025;56:737-740.

3. Saba L, Chen H, Cau R, et al. Impact Analysis of Different CT Configurations of Carotid Artery Plaque Calcifications on Cerebrovascular Events. AJNR Am J Neuroradiol. 2022;43(2):272-279.

4. Saba L, Nardi V, Cau R, et al. Carotid Artery Plaque Calcifications: Lessons From Histopathology to Diagnostic Imaging. Stroke. 2022;53:290-297.

5. Saba L, Saam T, Jäger HR, et al. Imaging biomarkers of vulnerable carotid plaques for stroke risk prediction and their potential clinical implications. Lancet Neurol. 2019.

6. Baradaran H, Gupta A. Carotid Vessel Wall Imaging on CTA. AJNR Am J Neuroradiol. 2020;41(3):380-386.

7. Baradaran H, et al. Association between carotid plaque features on CT angiography and cerebrovascular ischemia: a systematic review and meta-analysis. AJNR Am J Neuroradiol. 2017;38:2321-2326.

8. Baradaran H, et al. Optimal carotid plaque features on computed tomography angiography associated with ischemic stroke. J Am Heart Assoc. 2021;10:e019462.

9. Karlöf E, Buckler A, Liljeqvist ML, et al. Carotid plaque phenotyping by correlating plaque morphology from computed tomography angiography with transcriptional profiling. Eur J Vasc Endovasc Surg. 2021;62:716-726.

10. Chrencik MT, Khan AA, Luther L, et al. Quantitative assessment of carotid plaque morphology (geometry and tissue composition) using computed tomography angiography. J Vasc Surg. 2019;-:1-11.

11. Gedney R, Kung E, Mehta V, et al. Plaque contact surface area and lumen volume predict stroke risk in extracranial carotid artery stenosis. J Vasc Surg. 2022;76:482-488.

12. Choi E, Byun E, Kwon SU, et al. Carotid plaque composition assessed by CT predicts subsequent cardiovascular events among subjects with carotid stenosis. AJNR Am J Neuroradiol. 2021;42:2199-2206.

13. Cau R, Flanders A, Mannelli L, et al. Artificial intelligence in computed tomography plaque characterization: a review. Eur J Radiol. 2021;140:109767.

14. Fischer D, Webster C, Lareyre F, Ducasse E, Caradu C. High-risk carotid lesion segmentation: advancing stroke risk detection with deep learning. J Endovasc Ther. 2025.

15. Feng Y, Xu L, Shao J, et al. Artificial intelligence diagnostic performance in image-based vulnerable carotid plaque detection: a systematic review and meta-analysis. BMC Med Inform Decis Mak. 2025.

16. Klüner LV, Chan K, Antoniades C. Using artificial intelligence to study atherosclerosis from computed tomography imaging: a state-of-the-art review of the current literature. Atherosclerosis. 2024.

17. Lal BK, Khan AA, Kashyap VS, et al. Computed tomography angiographic biomarkers help identify vulnerable carotid artery plaque. J Vasc Surg. 2022.

18. Bos D, van Dam-Nolen DHK, Gupta A, et al. Advances in multimodality carotid plaque imaging: expert panel narrative review. AJR Am J Roentgenol. 2021.

19. Pakizer D, Taffé P, Kozel J, et al. Non-invasive imaging of individual histological carotid plaque characteristics: a diagnostic accuracy meta-analysis. Atherosclerosis. 2025.

20. Deng L, Zeng W, Yang J, et al. CTA-based carotid Plaque-RADS classification improves risk stratification for ischemic cerebrovascular events. AJNR Am J Neuroradiol. 2025.

21. Luo X, Hu B, Zhou S, et al. CAP-Net: carotid artery plaque segmentation system based on computed tomography angiography. Acad Radiol. 2025.

22. Guo Z, Liu Y, Xu J, et al. A deep learning model for carotid plaques detection based on CTA images: a two-stepwise early-stage clinical validation study. Front Neurol. 2024.

23. Buckler AJ, Gotto AM, Rajeev A, et al. Atherosclerosis risk classification with computed tomography angiography: a radiologic-pathologic validation study. Atherosclerosis. 2023.

24. Kopczak A, et al. Complicated carotid artery plaques and risk of recurrent ischemic stroke or TIA in patients with cryptogenic stroke: the CAPIAS study. JACC Cardiovasc Imaging. 2022.



UNR Universidad Nacional de Rosario

FCM Facultad de Ciencias Médicas