

Geomorfología y paleosuperficies gondwánicas en el Paraguay central

Geomorphology and gondwanic paleosurfaces in central Paraguay

Christian F. Colman^{1,2,*}, Oscar A. Martínez², Francisco S.B. Ladeira³, Jorge Rabassa⁴, Narciso Cubas¹, Emilia Y. Aguilera⁵, Yennifer Sarubbi Jacks¹, Edher Z. Herrera⁶, Magna M. Monteiro⁷, Christian Sánchez⁸

¹ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Campus Universitario. Km 11, C.C. 1039-1804, San Lorenzo, Paraguay.

² Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Ruta 259, Km 16, Campus Ing. Aldo López Guidi, U9200, Esquel, Argentina.

³ Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Rua Carlos Gomes 250, CEP: 13083-855, Campinas, Brasil.

⁴ Centro Austral de Investigaciones Científicas. Bernardo Houssay 200, V9410, Ushuaia, Argentina.

⁵ Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. Calle 60 y 122, 1900, La Plata, Argentina.

⁶ Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Campus Universitario. Km 11, C.C. 1039 - 1804, San Lorenzo, Paraguay.

⁷ Laboratorio de Bio y Materiales, Facultad Politécnica, Campus Universitario. Km 11, C.C. 10391 - 804, San Lorenzo, Paraguay.

⁸ Comisión Nacional de Energía Atómica, Dirección General de Investigación Científica y Tecnológica, Campus Universitario. Km 11, C.C. 1039 - 1804, San Lorenzo, Paraguay.

* Autor para correspondencia:
(C.F. Colman) christian.colman@facenuna.edu.py

Cómo citar este artículo:

Colman, C.F., Martínez, O.A., Ladeira, F.S.B., Rabassa, J., Cubas, N., Aguilera, E.Y., Sarubbi Jacks, Y., Herrera, E.Z., Monteiro, M.M., Sánchez, C., 2025, Geomorfología y paleosuperficies gondwánicas en el Paraguay central: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 77(3), A091025. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2025v77n3a091025>

Manuscrito recibido:
Manuscrito corregido:
Manuscrito aceptado:

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

RESUMEN

En el Paraguay central se han identificado un total de 207 relictos de superficies planares, en algunos de los cuales se han preservado formas relictuales de meteorización mayores y menores, así como restos de perfiles de meteorización química profunda y que, por ello, son considerados remanentes de superficies grabadas o *etchplains*. Estas formas planares suavemente onduladas, distribuidas a lo largo de los diferentes bloques tectónicos que bordean el Rift de Asunción-Sapucaí-Villarrica (RASV), son el resultado de la meteorización química profunda de rocas ígneas, rocas sedimentarias paleozoicas y mesozoicas, seguido de la posterior exhumación y erosión durante el Cretácico superior al Eoceno. En este estudio se describen e interpretan sitios representativos de estas paleosuperficies gondwánicas, incluyendo paisajes graníticos y pseudograníticos, se analizan ejemplos singulares como la “Piedra Equilibrada de Paso Carreta (PEPC)” y se presenta un esquema geomorfológico que constituye el primer producto cartográfico sobre este tema a escala regional para el área estudiada.

Palabras clave: superficies de planación, meteorización química profunda, formas grabadas, perfiles lateríticos, areniscas.

ABSTRACT

In central Paraguay, a total of 207 relict planar surfaces have been identified, in some of which both major and minor relictual forms of weathering, as well as remnants of deep chemical weathering profiles, have been preserved. They are therefore considered remnants of *etchplains*. These smooth planar forms, distributed along the different tectonic blocks bordering the Asunción-Sapucaí-Villarrica Rift (ASVR), are the result of deep chemical weathering of igneous rocks and Paleozoic and Mesozoic sedimentary rocks. This is followed by subsequent exhumation and erosion from the Late Cretaceous to the Eocene. This study describes and interprets representative sites of these Gondwanan paleosurfaces, including granitic and pseudogranitic landscapes. It analyzes singular examples such as the “Piedra Equilibrada de Paso Carreta (PEPC)”, and presents a geomorphological map that constitutes the first cartographic product on this subject at a regional scale for the studied area.

Keywords: planation surfaces, deep chemical weathering, *etchforms*, lateritic profiles, sandstones.

1. Introducción

Las superficies grabadas o *etchplains* son superficies relativamente planas con formas suavemente redondeadas de poca altura. Son paisajes heredados muy antiguos que forman parte de muchos paisajes actuales (Wayland, 1933; Thomas, 1965; Büdel, 1969). Se desarrollaron en dos estadios evolutivos (Twidale, 1990, 1999, 2002). En una primera etapa, donde actúa la meteorización química profunda durante largos periodos de tiempo geológico (Twidale, 1987; Migoñ y Lidmar-Bergström 2002; Migoñ, 2013), generando los perfiles de meteorización química (saprolito y regolito) que pueden alcanzar decenas de metros de espesor (Eswaran y Chaw Bin, 1978; White, 2002; Migoñ, 2006). En estos niveles de alteritas son frecuentes las acumulaciones de óxidos de hierro en la parte superior y sulfuros en la parte inferior, con altas concentraciones de neominerales y muchas veces con costras endurecidas (Migoñ, 1996, 2013). Los perfiles de meteorización se limitan en profundidad por el frente de meteorización (Mabbut, 1961; Twidale y Vidal Romaní, 2004).

Durante la segunda etapa se produce la exhumación (por tectónica o cambio climático) de los terrenos y el perfil de meteorización es removido por erosión, exponiéndose así el frente de meteorización (Linton, 1955; Thomas, 1968; Twidale, 1982; Twidale y Mueller, 1988; Migoñ, 1996, 2006, 2013; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Migoñ y Lidmar-Bergström, 2001, 2002; Twidale y Vidal Romaní, 2005; Chesworth, 2008). Esta superficie exhumada se caracteriza por la presencia de geoformas mayores y menores relictuales de meteorización química, como *bornhardts*, *corestones*, *tors*, *gnammas*, *tafoni*, rocas pedestales, acanaladuras, entre otras (Vidal Romaní y Twidale, 1998; Twidale y Vidal Romaní, 2005; Twidale, 2007).

Las *etchplains* se corresponden en muchos casos con los Paisajes Gondwánicos (King, 1968) desarrollados en el supercontinente Gondwana durante el Mesozoico, bajo condiciones de baja o nula actividad tectónica y condiciones climáticas

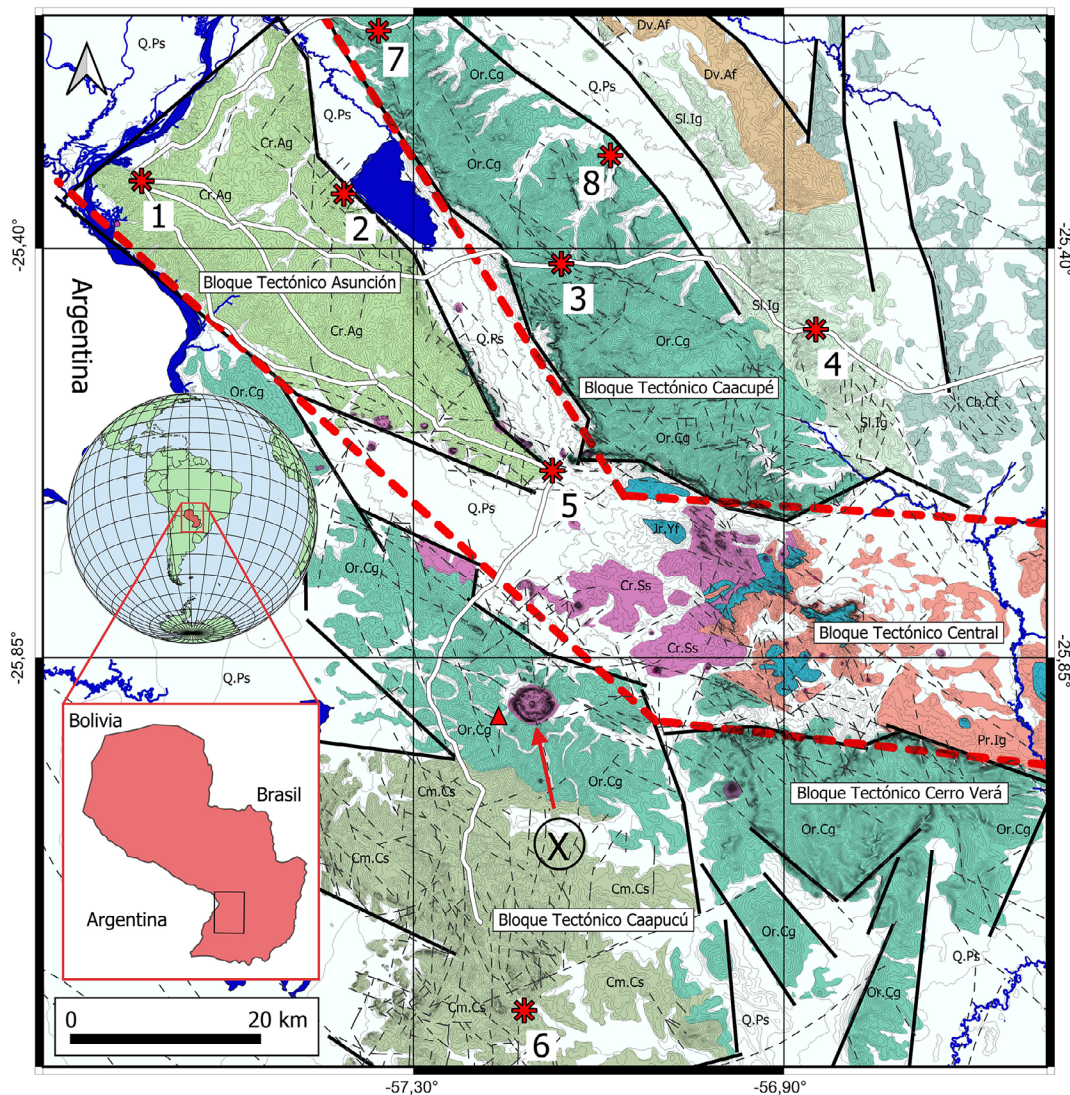
cálidas y húmedas, las cuales no tienen equivalente actual (Twidale, 1987; Ollier, 1992; Migoñ y Lidmar-Bergström 2002; Rabassa, 2010, 2014; Migoñ, 2013).

En el Paraguay oriental existe un conjunto de relictos de superficies planares muy antiguas heredadas del supercontinente Gondwana (Iriondo y Bruneto, 2016). Muchos de ellos se corresponden con cerros mesetiformes de distintas alturas y litologías. Sobre algunas de estas superficies, se identificó una amplia variedad de formas relictuales mayores y menores, indicadoras de meteorización química profunda, que afectan tanto a granitos (Colman *et al.*, 2018; 2019), areniscas (Rabassa *et al.*, 2018, 2021; Sarubbi *et al.*, 2019; Gadea y Vázquez, 2021; Celabe *et al.*, 2023; Gadea *et al.*, 2023) y diabasas (Sarubbi *et al.*, 2024).

En este trabajo se analiza la geomorfología del Paraguay central, un área de más de 8 000 km², que incluye a la megaestructura del Rift de Asunción-Sapucaí-Villarrica y a los bloques tectónicos Asunción, Caacupé, Caapucú, Central y Cerro Verá (Figura 1). Los estudios realizados permitieron una caracterización geomorfológica del área de interés a escala regional y también identificar y correlacionar los numerosos restos de superficies planares, al menos los de mayor superficie, distribuidos en el área. Se presenta un mapa geomorfológico general que sintetiza e integra la información generada en este trabajo y por otros autores (Cubas *et al.*, 1998; González *et al.*, 1998a, 1998b, 1999; Dionisi *et al.*, 1999; Colman *et al.*, 2018, 2019, 2022, 2024, 2025; Iriondo y Brunetto, 2016; Rabassa *et al.*, 2018, 2021; Gadea y Vázquez, 2021; Celabe *et al.*, 2023; Gadea *et al.*, 2023; Figura 3) y se propone una interpretación genética y una cronología para las superficies planares, sustentada en la presencia de geoformas relictuales de meteorización y relictos de perfiles de meteorización química (Colman *et al.*, 2025).

Adicionalmente, considerando que los abundantes niveles de duricostras identificados en los perfiles de meteorización cumplen un control

MAPA GEOLOGICO DEL PARAGUAY CENTRAL



LEYENDA

- | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|--|
| ▲ Piedra Equilibrista (PEPC) | Cuaternario: Planicie Aluvial (Q.Ps) | Carbonífero: Formación Coronel Oviedo. Tillitas y Varvitas (Cb.Cf) |
| --- Límites del RASV | Sedimentos inconsolidados | |
| — Rutas principales | Cretácico: Grupo Asunción | Devónico: Formación Arroyos y Esteros. Areniscas eólicas (Dv.Af) |
| — Curvas de nivel | Areniscas fluviales (Cr.Ag) | |
| --- Lineamientos principales | Cretácico: Suite Sapucaí | Silúrico: Grupo Itacurubí |
| — Bloques tectónicos | Plutonitas/Volcanitas (Cr.Ss) | Lutitas marinas (Sl.Ig) |
| ■ Red hidrográfica | Jurásico: Formación Ybytymí | Ordovícico: Grupo Caacupé |
| | Areniscas fluviales/eólicas (Jr.Yf) | Areniscas fluviales/eólicas (Or.Cg) |
| | Pérmico: Grupo Independencia | Cámbrico: Suite Caapucú |
| | Areniscas fluviales (Pr.Ig) | Granitos y Riolitas (Cm.Cs) |

* Ciudades 1 - Asunción 2 - Areguá 3 - Caacupé 4 - Itacurubí 5 - Paraguari 6 - Caapucú 7 - Emboscada 8 - Tobati (X) Cerro Acahay

Figura 1 Mapa geológico del Paraguay central en la Región Oriental, mostrando la estructura tectono-magmática del Rift de Asunción. Adaptado y modificado de Cubas *et al.* (1998); González *et al.* (1998a, 1998b, 1999); Dionisi *et al.* (1999).

geomorfológico significativo, contribuyendo en la preservación de, fundamentalmente, las geoformas indicadoras menores. Se efectuaron análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difractometría de Rayos X (DRX), Microscopía óptica (MO) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) a la Piedra Equilibrista de Paso Carreta (PEPC), una roca nuclear (corestone) en condición de estabilidad precaria (Colman *et al.*, 2024), desarrollada en las areniscas ordovícicas de la Formación Piribebuy del Grupo Caacupé (Rabassa *et al.*, 2018, 2021). Se considera a este peculiar elemento escénico un sitio clave cuya interpretación genética podría extrapolarse a otros contextos similares del área de estudio.

2. Antecedentes

2.1. GEOMORFOLOGÍA

El área de estudio cuenta con pocas contribuciones sobre su geomorfología. Debe mencionarse la información proporcionada en las hojas geológicas del Paraguay central que identifican planicies, áreas elevadas y terrazas, destacando algunos cerros aislados (Dionisi *et al.*, 1999). Para el sector noreste se han identificado serranías de altitudes que no superan los 350 m, una meseta y pantanos, que constituyen las llanuras aluviales de los ríos que drenan la zona (González *et al.*, 1999).

En el sector central se mencionan los valles tectónicos de Ypacaraí y Acahay (Figura 1), con elevaciones inferiores a los 100 m y numerosos cerros aislados que no superan los 333 m de altitud, así como acantilados muy pronunciados (González *et al.*, 1998a). Estos valles a menudo están cubiertos por suelos y sedimentos de remoción en masa, con algunos cerros aislados que permanecen como remanentes erosivos sobresaliendo por encima de ellos (González *et al.*, 1998b).

En la morfología del sector sur del área de interés se destaca una planicie de denudación formada antes de la sedimentación de las rocas epiclásticas ordovícicas y una superficie con relieves en forma de macizos elevados alineados

(Cubas *et al.*, 1998). Degraff *et al.* (1981) describieron una superficie pre-Ordovícica en Paraguay central. Iriondo y Brunetto (2016) proponen que gran parte de la superficie del Paraguay oriental está conformada por paisajes heredados de Gondwana. Colman *et al.* (2018, 2019) identifican una superficie grabada desarrollada sobre granitos de la Suite Magmática de Caapucú del Cámbrico, con *corestones* de gran tamaño distribuidos en un área urbanizada.

Recientemente, el estudio de la Piedra Equilibrista de Paso Carreta asocia su génesis y condición de estabilidad precaria sobre su roca pedestal con procesos de meteorización química profunda, comparándola con otros ejemplos en la Argentina, como la “Piedra de Tandil” y en Brasil, como el “Chapeu do Sol” (Rabassa *et al.*, 2018, 2021).

Sarubbi Jacks *et al.* (2019) señalaron la presencia de una antigua superficie de planación en la parte norte del Paraguay oriental, una superficie relictual conformada por numerosos *inselbergs*, formas de relieve desarrolladas en las rocas sedimentarias de la Formación Misiones del Jurásico superior, previo al emplazamiento de los basaltos de la Formación Alto Paraná.

Gadea y Vázquez (2021) describieron al Cerro Tren, ubicado en el bloque Caacupé al noroeste de la ciudad de Itacurubí dentro del área de estudio (Figura 1), como una forma de relieve resultante de procesos de meteorización química y modificada por procesos erosivos. Colman *et al.* (2022) elaboraron un inventario de localidades con potencial geoturístico, abarcando áreas donde se ubican formas relictuales de meteorización química profunda, incluyendo a la Piedra Equilibrista de Paso Carreta (PEPC), un verdadero corestone (Rabassa *et al.*, 2018; 2021) y que más tarde sería clasificada como una *Precariously Balanced Rock* (PBR) (Colman *et al.*, 2024).

Celabe *et al.* (2023) describieron la génesis y evolución del Cerro Yaguarón, ubicado en el bloque Asunción al noroeste de la ciudad de Paraguari (Figura 1), como una meseta formada por la erosión selectiva por avulsión, que fue

posteriormente levantada tectónicamente. Identificaron, además, sobre la superficie de estas areniscas, un número significativo de microformas, incluyendo grietas de desecación, alvéolos, ondulitas y *tafoni*.

Gadea *et al.* (2023) describieron un arco natural en las cercanías de la ciudad de Tobatí, geoforma asociada a otras formas relictuales menores de meteorización. Sarubbi Jacks *et al.* (2024) describieron dos cuerpos intrusivos anulares de composición basáltica, estructuras con cumbres entre 330 y 350 m de altitud, coronadas por pequeñas superficies planas y *corestones*, como formas menores relictas de meteorización química profunda.

2.2. GÉNESIS DE LAS SUPERFICIES GRABADAS

Existen numerosos y más detallados estudios a diversas escalas sobre paisajes que conforman las superficies gondwánicas en otros sectores del mundo. Las formas de relieve presentes en estas superficies, descritas como indicadoras de meteorización química profunda, se denominan formas relictuales o *etchforms* y se clasifican en dos grupos: a) Formas subcutáneas, que evolucionaron en la base del saprolito y b) Formas intercutáneas, que se originaron dentro del perfil de meteorización química. Ambas formas evolucionaron junto con la *etchplain*, una superficie relativamente ondulada con pocas variaciones topográficas una vez exhumada. Sobre esta superficie se ubican las formas grabadas o *etchforms*, clasificadas en formas mayores como *inselbergs*, *bornhardts*, *nubbins*, *castle koppies*, y formas menores como *corestones*, *tors*, *gnammas*, *tafoni*, entre otros (Twidale, 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Twidale y Vidal Romaní, 2005; Migoñ, 2006).

El origen de las formas de relieve como respuesta geomorfológica a un tipo de clima varía espacial y temporalmente; algunas formas resultan de actividades a largo plazo, mientras que otras surgen de procesos superficiales esporádicos (Twidale, 1997). Las condiciones climáticas globales en Gondwana generaron procesos de planación generalizadas, sin casquetes polares y

desiertos muy amplios. Estas superficies planares presentaban mayores distancias lineales desde las áreas costeras hasta el centro continental. Como consecuencia, los principales ríos eran más largos, con pendientes suaves y un poder erosivo reducido. Esta baja capacidad de remoción no alcanzaba a eliminar los materiales meteorizados, lo que favorecía la conservación *in situ* y permitía el desarrollo de los perfiles de meteorización química cada vez más profundos (Ollier, 1992, 2010, 2014). La meteorización química es un proceso que se desarrolla de forma continua desde el pasado geológico, con mayor o menor intensidad dependiendo de las condiciones climáticas del medio (Taylor y Shirliff, 2003).

El desarrollo de las superficies grabadas se ve favorecido por las condiciones climáticas y tectónicas que presentan estabilidad en largos periodos de tiempo geológico, condiciones que limitan la erosión. Por ello, es que gran parte de los perfiles de meteorización química profunda en el mundo se han generado durante el Mesozoico y el Cenozoico temprano (Ollier, 1988, 1992, 2010; Migoñ, 2013), bajo condiciones climáticas muy cálidas y húmedas, climas “hipertropicales”, con precipitaciones anuales superiores a los 10 000 mm y temperaturas de más de 45 °C (Rabassa, 2010, 2014).

2.3. CONDICIONES PALEOCLIMÁTICAS EN GONDWANA

El Triásico en Pangea presentó eventos climáticos altamente fluctuantes, su configuración geográfica fue única y se extendió a través de la línea ecuatorial, condicionando así la dinámica climática global, con altos niveles del mar y la ausencia de casquetes polares (Mancuso *et al.*, 2021). En el interior continental de Gondwana, el clima variaba de árido a semiárido, con fluctuaciones estacionales marcadas, experimentando climas monzónicos en su máxima intensidad y veranos fuertes. Además, se desarrollaron extensas zonas áridas, con precipitaciones anuales relativamente bajas, que variaron entre 2 y 4 mm/día. Las temperaturas anuales promedio oscilaban entre 10 y 20 °C, con

aproximadamente 30 °C en los veranos y 5 °C en los inviernos australes. Para realizar estas estimaciones, se realizaron simulaciones climáticas contrastadas con proxys sedimentológicos y estratigráficos, como asociaciones de facies fluviales, eólicas y lacustres; la ausencia de paleosuelos, las direcciones de paleocorrientes y los ciclos estratigráficos, registran la influencia de la variabilidad climática (Perón *et al.*, 2005).

Para el Triásico superior, las condiciones climáticas cambiaron a subhúmedas, con una alternancia entre condiciones subhúmedas a húmedas y posteriores fluctuaciones áridas y semiáridas (Nordt *et al.*, 2015; Mancuso *et al.*, 2021). Las temperaturas anuales promedio oscilaban entre 15 y 25 °C, con temperaturas invernales entre 0 y 16 °C y precipitaciones que variaban de 1 a 10 mm/día, mientras que las temperaturas estivales iban de 20 a 36 °C, con precipitaciones de 0.5 a 4 mm/día (Mancuso *et al.*, 2021).

Para el límite del Triásico superior–Jurásico inferior, el aumento de la temperatura global se asocia con una perturbación significativa del ciclo global del carbono, registrada en múltiples excursiones isotópicas de carbono ligero en los océanos y la atmósfera, perturbación que se mantuvo durante 600 ka aproximadamente (Hesselbo *et al.*, 2002).

Durante el Jurásico inferior las condiciones climáticas se volvieron aún más húmedas. Los niveles del mar a nivel global experimentaron un aumento, más que en el Triásico, y las áreas de baja latitud en Gondwana fueron estacionalmente secas, templadas y cálidas, con regiones tropicales que superaron los 40 °C y precipitaciones superiores a los 16 mm/día (Parrish *et al.*, 1982; Moore *et al.*, 1992; Parrish, 1993; Rees *et al.*, 2000). Para el Jurásico superior, se generaron ambientes más secos en Gondwana, que se interpretan como el colapso del monzón de Pangea, resultado de la separación del supercontinente (Parrish, 1993).

Para el Cretácico superior la fragmentación de Gondwana estaba bien marcada, con una notable reducción de las áreas áridas y un aumento de la humedad relativa en las regiones elevadas. Además, ocurrió una extensa liberación a la atmósfera de

CO₂, debido a las vastas coladas de lava submarina ubicadas debajo del Océano Pacífico. Esta condición condujo al calentamiento global debido al efecto invernadero. El clima en la Tierra necesariamente tuvo que experimentar las temperaturas más altas de su historia, con niveles máximos del mar y lluvias intensas (Parrish *et al.*, 1982).

En el Cenozoico, las condiciones climáticas cambiaron gradualmente hasta asemejarse a las condiciones actuales, debido a la continua separación de Gondwana y a la configuración actual de los continentes. Desde el Paleoceno temprano hasta el Pleistoceno tardío, las condiciones climáticas de América del Sur cambiaron de cálidas, húmedas y no estacionales a más frías, secas y estacionales, lo que resultó en una disminución de la temperatura y de las tasas de precipitación, llevando a un cambio de biomas, pasando de bosques tropicales a estepas (Parrish *et al.*, 1982; Ortiz-Jaureguizar y Cladera, 2006; Vento *et al.*, 2021). Desde el Paleoceno temprano hasta el Paleoceno tardío, la transgresión marina del Cretácico se transformó en una serie de llanuras aluviales y de grandes lagos (Ortiz-Jaureguizar y Cladera, 2006).

En el Cenozoico medio, ocurrió una reducción en la tasa de meteorización, confinando los perfiles de alteración lateríticos a los trópicos actuales (Ollier, 1992). En muchas áreas, las condiciones ambientales del Cenozoico tardío han erosionado una porción significativa del paisaje, transportando gran cantidad del material meteorizado para exponer las rocas frescas en el frente de meteorización generados en el Mesozoico (Ollier, 1992).

2.4. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PARAGUAY

En la actualidad, desde el paralelo 10° S hasta el paralelo 53° S en América del Sur, se encuentran extensas áreas de masas de aire continentales de baja altitud, donde se desarrollan intensos sistemas de tormentas convectivas. Estas áreas, ubicadas en el interior del continente, presentan varios patrones climáticos: tropical, subtropical y extratropical. En las latitudes tropicales y subtropicales, predominan las condiciones cálidas

y húmedas, desde las estribaciones de los Andes (una barrera geográfica) hasta la costa atlántica, alcanzando el pico de precipitaciones en el verano (monzón sudamericano), las lluvias representan fenómenos de escala continental y exhiben ciclos estacionales muy marcados (Horel *et al.*, 1989; Garreaud *et al.*, 2009).

La República del Paraguay, ubicada en el interior de América del Sur, específicamente en la porción central, tiene dos regiones naturales divididas por el río homónimo: en su margen izquierda, la Región Occidental o Chaco Paraguayo y en su margen derecha, la Región Oriental (Pastén *et al.*, 2007). El clima es, según la clasificación de Köppen, predominantemente subtropical para la región oriental, como en el Valle del Río Iguazú, asociado con altitudes inferiores a 750 y 800 m (Álvarez *et al.*, 2013).

Además, Paraguay presenta una marcada variabilidad climática entre ambas regiones, con el noroeste del Chaco teniendo un clima semiárido, volviéndose semihúmedo y megatérmico en la porción este y sureste de la Región Occidental (Figura 2). La Región Oriental es predominantemente húmeda y mesotérmica, excepto en los límites occidentales y noroccidentales, que son similares a los sectores este y sureste de la Región Occidental (Pastén *et al.*, 2007).

Buena parte de las precipitaciones del país son del tipo convectivo, un sistema de tormentas que se desplaza rápidamente de norte a sur durante el mes de octubre. Como resultado, en el verano austral, se genera una extensa área de intensa precipitación que abarca el sur de Brasil, Paraguay y el norte de Argentina, fenómeno que se describe como similar a un monzón (Zhou y Lau, 1998; Vera *et al.*, 2006; Garreaud *et al.*, 2009). Este monzón se genera por sistemas de tormentas aisladas o líneas de tormentas frecuentes durante la primavera y el otoño, variando desde 400 mm de precipitación en el noroeste de la Región Occidental hasta unos 1 900 mm en el sureste de la Región Oriental, este último asociado a la cuenca del Río Paraná. En contraste con la precipitación más intensa en la cuenca del Río Paraguay, que promedia alrededor de 1 600 mm en

la Región Oriental, las temperaturas suelen variar entre 21 °C en la Región Oriental y 25 °C en la Región Occidental, con temperaturas máximas pico durante el verano que a veces superan los 40 °C (Pastén *et al.*, 2007). Por otro lado, durante el invierno austral, la máxima precipitación a escala continental se ubica al norte del Ecuador, mientras que las zonas centrales del continente experimentan estaciones secas (Garreaud *et al.*, 2009).

2.5. CONTEXTO GEOLÓGICO

La principal estructura geológica del área de estudio es el Rift Asunción-Sapucaí-Villarrica (representado con líneas intermitentes de color rojo en las Figuras 1 y 3) (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2013), que afectó a las unidades del Ordovícico, Silúrico, Carbonífero, Pérmico y Cretácico (Figura 1). El Rift Asunción-Sapucaí-Villarrica (RASV) consta de tres segmentos: el segmento occidental, de rumbo NO-SE, que se extiende por 90 km entre el sur del Chaco Paraguayo y la ciudad de Paraguairí; el segmento central, con dirección E-O, de aproximadamente 70 km de longitud, entre la ciudad de Paraguairí y de Villarrica, esta última ubicada fuera del área de estudio, y el tercer segmento, también NO-SE, de unos 40 km de longitud, que se extiende desde la ciudad de Villarrica hasta la serranía del Ybyturuzú (Riccomini *et al.*, 2001, 2002).

Esta estructura es responsable del desarrollo de los bloques tectónicos del área de estudio (Figuras 1 y 3), se formó durante un evento tectonomagmático en el Cretácico inferior y se caracteriza por presentar zonas de fallas significativas, la intrusión de numerosos cuerpos magmáticos de afinidad alcalina y la creación de nuevas cuencas sedimentarias. Se encuentra estrechamente relacionada con el magmatismo alcalino Mesozoico y la Gran Provincia ígnea Paraná-Etendeka (Hawkesworth *et al.*, 1992; Velázquez *et al.*, 1992, 2011; Riccomini *et al.*, 2001, 2002; Gibson *et al.*, 2006; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2013).

Las edades del magmatismo alcalino fueron estimadas a partir de dataciones isotópicas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en la Provincia Alcalina Central y

oscilan entre ~127 y 126.4 Ma del Barremiano (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2007) y entre 118 y 127 Ma. (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2013; Gomes *et al.*, 2013) correspondientes al Cretácico inferior (Aptiano-Barremiano).

La estructura tectonomagmática del Rift Asunción-Sapucai-Villarrica involucra los bloques tectónicos Asunción, Caacupé, Caapucú, Central y Cerro Verá (Figuras 1 y 3). El bloque Asunción se corresponde con un hemi-graben y está compuesto por areniscas del Grupo Asunción del Cretácico superior–Paleógeno (Dionisi *et al.*, 1999). Sedimentos depositados como relleno dentro del hemi-graben, forman una superficie irregular que cubre un área de aproximadamente 2 000 km². Estos depósitos sin-rift, se componen de materiales detríticos paleozoicos, así como materiales alcalinos mesozoicos, que forman conglomerados,

fanglomerados y areniscas. En su mayoría están mal seleccionados y se corresponden con depósitos de taludes, conos aluviales, arenas fluviales y eólicas (Dionisi *et al.*, 1999).

La mayor parte del bloque Caacupé y casi la totalidad del bloque Cerro Verá, se encuentran compuestos por areniscas del Grupo Caacupé del Ordovícico superior. Esta unidad litoestratigráfica consiste en conglomerados basales de la Formación Paraguari, que descansan sobre rocas cristalinas de la Suite Magmática Caapucú en un contacto discordante. Continúa hacia arriba con areniscas de grano medio a grueso de la Formación Piribebuy, con un espesor de varios cientos de metros (Harrington, 1950, 1972; Eckel, 1959; Bigarella y Comte, 1969; Wolfart, 1961; Pereira, 2000; Almeida *et al.*, 2004; Benedetto *et al.*, 2013).

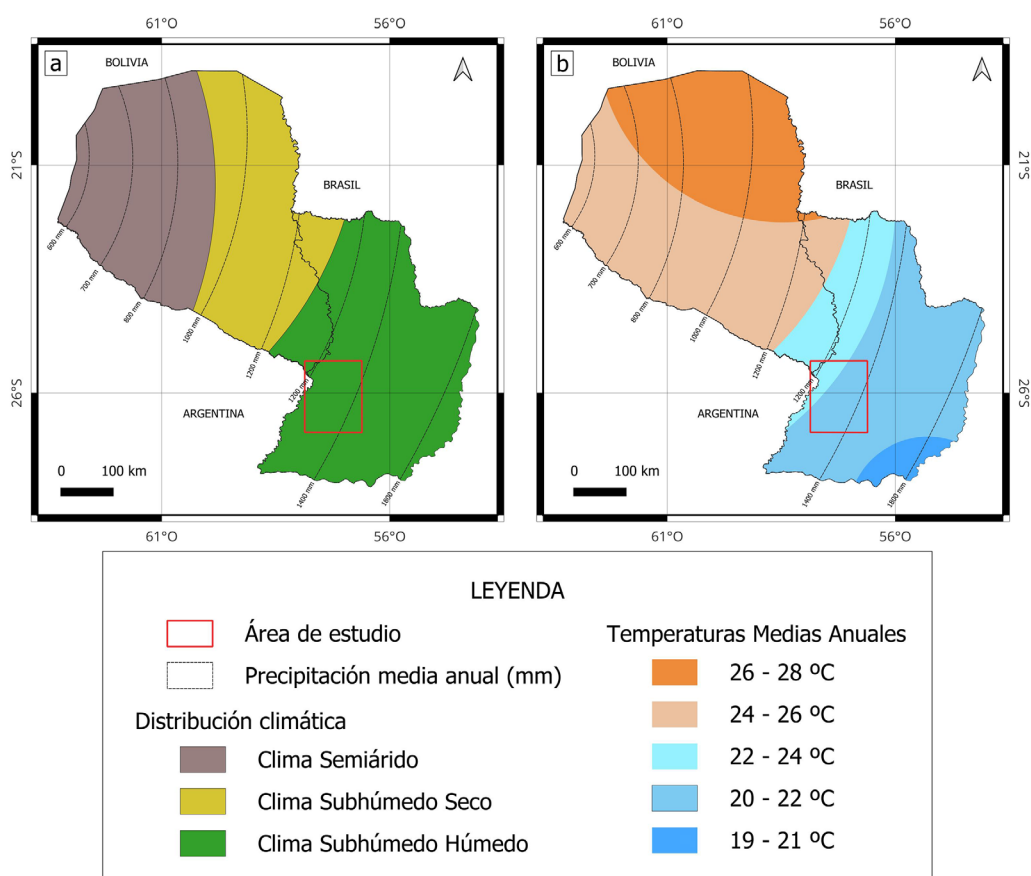


Figura 2 Mapas de distribución espacial de precipitaciones en el Paraguay, superpuestos con: A) Mapa de distribución espacial de temperaturas medias anuales y B) Mapa de clasificación climática del Paraguay. Extraídos y modificados de Pastén *et al.* (2007).

La secuencia superior del Grupo Caacupé corresponde a la Formación Piribebuy, dominada por areniscas gruesas sacaroidales, altamente friables debido a la débil cementación, y areniscas masivas feldespáticas, con colores que varían del blanco al amarillento y tamaños de grano que van desde fino a grueso (Harrington, 1950, 1972; Eckel, 1959; Bigarella y Comte, 1969; Wolfart, 1961; Pereira, 2000; Almeida *et al.*, 2004; Benedetto *et al.*, 2013).

El bloque Caacupé está compuesto por rocas sedimentarias del Grupo Itacurubí del Silúrico inferior, específicamente del Llandoveryano. Se corresponde con areniscas de la Formación Eusebio Ayala como unidad basal, lutitas marinas fosilíferas de la Formación Vargas Peña, y areniscas intercaladas con limolitas y lutitas de la Formación Cari'y, todas asociadas a un ambiente marino somero, ligeramente regresivo, con influencia costera (Harrington, 1950, 1956; Eckel, 1959; Wolfart, 1961; Dionisi *et al.*, 1999). Este bloque además comprende a rocas sedimentarias de la Formación Arroyos y Esteros del Devónico, que incluyen a areniscas poco cementadas, altamente friables, de color amarillo a rosado, con un tamaño de grano grueso e intercalados con arcillas y arenas conglomerádicas (Beder y Windhausen, 1918; Harrington, 1950; Dionisi *et al.*, 1999).

La unidad litoestratigráfica más joven, que compone al bloque Caacupé, es la Formación Coronel Oviedo del Carbonífero superior, una unidad litoestratigráfica compuesta por areniscas conglomerádicas, limolitas, arcillas, diamictitas, ritmitas y tillitas glaciares de grano fino a grueso, originadas en sistemas glaciogénicos (Harrington, 1950; Putzer, 1962; González *et al.*, 1999).

El bloque Central, ubicado en la porción interna del Graben Sapucaí (Figuras 1 y 3), está compuesto por areniscas del Grupo Independencia del Pérmico inferior, areniscas fluviales de la Formación Ybytymí del Cretácico y rocas intrusivas/extrusivas de la Suite Sapucaí del Cretácico superior. El Grupo Independencia del Pérmico inferior se compone de areniscas de grano fino a grueso con intercalaciones

arcillosas de la Formación San Miguel y areniscas calcáreas de grano fino a grueso intercaladas con lutitas y capas oolíticas de la Formación Tacuary. Estas unidades fueron depositadas en ambientes predominantemente continentales, interdigitados con un ambiente marino costero somero (Harrington, 1950; Eckel, 1959; Putzer, 1962; González *et al.*, 1998). La Formación Ybytymí está compuesta por rocas epiclásticas con sedimentación local, se corresponde con areniscas de grano grueso con sucesiones que disminuyen en tamaño de grano hasta areniscas finas (Harrington, 1950; Eckel, 1959; González *et al.*, 1998).

La Suite Sapucaí del Cretácico forma parte del bloque Central y se corresponde con una serie de stocks intrusivos alcalinos en forma de conos subcirculares y diques potásicos, así como flujos de basaltos alcalinos, ampliamente distribuidos en todo el bloque. Las rocas encajantes fueron localmente afectadas por la masa intrusiva, que dio lugar a la formación de pequeños halos de silicificación y metamorfismo de contacto (Harrington, 1950; Eckel, 1959; Putzer, 1962; Livieres y Quade, 1987; Bitschene y Báez, 1989; Comin-Chiaramonti *et al.*, 1990, 1996; González *et al.*, 1998a, 1999).

El bloque Caapucú está compuesto principalmente por plutonitas/volcanitas de composición ácida de la Suite Magmática Caapucú del Neoproterozoico (Leite *et al.*, 2018). Esta suite aflora desde Villa Florida hasta Quiindy en dirección norte y también aparece en pequeños afloramientos en la parte central de la Región Oriental, asociada con la RASV cerca de las ciudades de San Bernardino, Pirayú y Paraguairí. Esta unidad cubre un área aproximada de 3 000 km² y está compuesta principalmente por rocas intrusivas y volcánicas que forman 4 subunidades diferenciadas texturalmente.

Estas cuatro subunidades están conformadas por granitos de biotita con textura fanerítica, granitos hipabisales con textura porfídica, riolitas densas a finas, diques félsicos y una serie volcánica de lavas riolíticas con texturas micro porfídicas

y afaníticas, incluyendo interestratificaciones piroclásticas representadas por tobas de lapilli e ignimbritas (Kanzler, 1987; Cubas *et al.*, 1998; Meinhold *et al.*, 2011). Posteriormente Leite *et al.* (2018) agruparon a las rocas plutónicas y volcánicas ácidas en 4 litofacies: 1) facies de sienogranito porfídico de textura rapakivi, 2) facies de monzogranito a microgranito de feldespato alcalino, 3) facies de riolita y 4) facies de ignimbrita.

Alrededor de la ciudad de San Roque González de Santa Cruz, donde se encuentra la Piedra Equilibrista de Paso Carreta (PEPC) en el Departamento de Paraguari (Figura 1), las rocas sedimentarias de la Formación Piribebuy han sido intruídas por rocas plutónicas y volcánicas alcalinas de Cerro Acahay, una masa intrusiva subanular de aproximadamente 5 km de diámetro que forma parte de la actividad tectonomagmática de la Provincia Alcalina Central y que se encuentra compuesta por gabros alcalinos distribuidos periféricamente (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1990; Gomes *et al.*, 1991; Green *et al.*, 1991; Velázquez *et al.*, 1992).

3. Metodología

Considerando los objetivos de este estudio, el primer paso fue analizar todos los trabajos previos referidos directa o indirectamente a la geomorfología del área de estudio, aunque éstos, como se mencionó al inicio, eran relativamente escasos.

La metodología utilizada para desarrollar el mapa geomorfológico regional consistió en analizar los modelos digitales de elevación (MDE) basados en los antecedentes citados e información geológica disponible. Los modelos digitales de elevación ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12.5 m, fueron descargados de forma gratuita desde la plataforma (<https://search.asf.alaska.edu/#/>), del sensor satelital de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón, de banda L, activo desde 2006 hasta 2011. Esto permitió la identificación de geoformas y restos de geoformas, que luego fueron utilizados para definir y

proponer unidades geomorfológicas más grandes, categorizadas como paisajes (Figura 3).

Durante la ejecución de este trabajo, se hizo un énfasis especial en identificar y delimitar superficies rocosas planares horizontales a subhorizontales, las cuales fueron inicialmente interpretadas como superficies de erosión. Para el mapeo preliminar, se utilizó el software de libre acceso QGIS 3.28 Firenze (QGIS Development Team, 2023). Los mapas fueron verificados con controles de campo, a través de los cuales también se identificaron un gran número de formas relictuales mayores y menores, además de restos de perfiles de meteorización, distribuidos en diferentes litologías y sectores del área de estudio. Con esta información detallada adicional, muchas de las superficies de planación fueron reinterpretadas como verdaderas *etchplains*. Esta información permitió una interpretación geomorfológica confiable de toda el área de interés y la finalización del mapeo correspondiente. La escala de análisis del trabajo es regional y por lo tanto las unidades geomorfológicas escogidas para elaborar la cartografía (Figura 3) tienen un carácter general que responde a dicha escala.

Con base en este mapeo a escala regional, se determinó la relación altitudinal dentro de cada bloque tectónico del área de estudio, para correlacionar las superficies planares. Los niveles identificados fueron comparados con la distribución espacial de las formas grabadas y los perfiles de alteración, verificando el origen meteórico de varios de ellos.

Para contribuir a la comprensión de los procesos que generaron algunas de las geoformas más distintivas de la región, se realizaron estudios detallados a la Piedra Equilibrista de Paso Carreta, específicamente a su costra endurecida. En este llamativo corestone de arenisca, se realizaron descripciones morfológicas y sedimentológicas, además de análisis químicos y mineralógicos.

Para los análisis químicos y mineralógicos, las muestras fueron disgregadas en pequeñas porciones de 20 gr, pulverizadas utilizando un mortero de ágata y luego colocadas en tubos Eppendorf debidamente etiquetados.

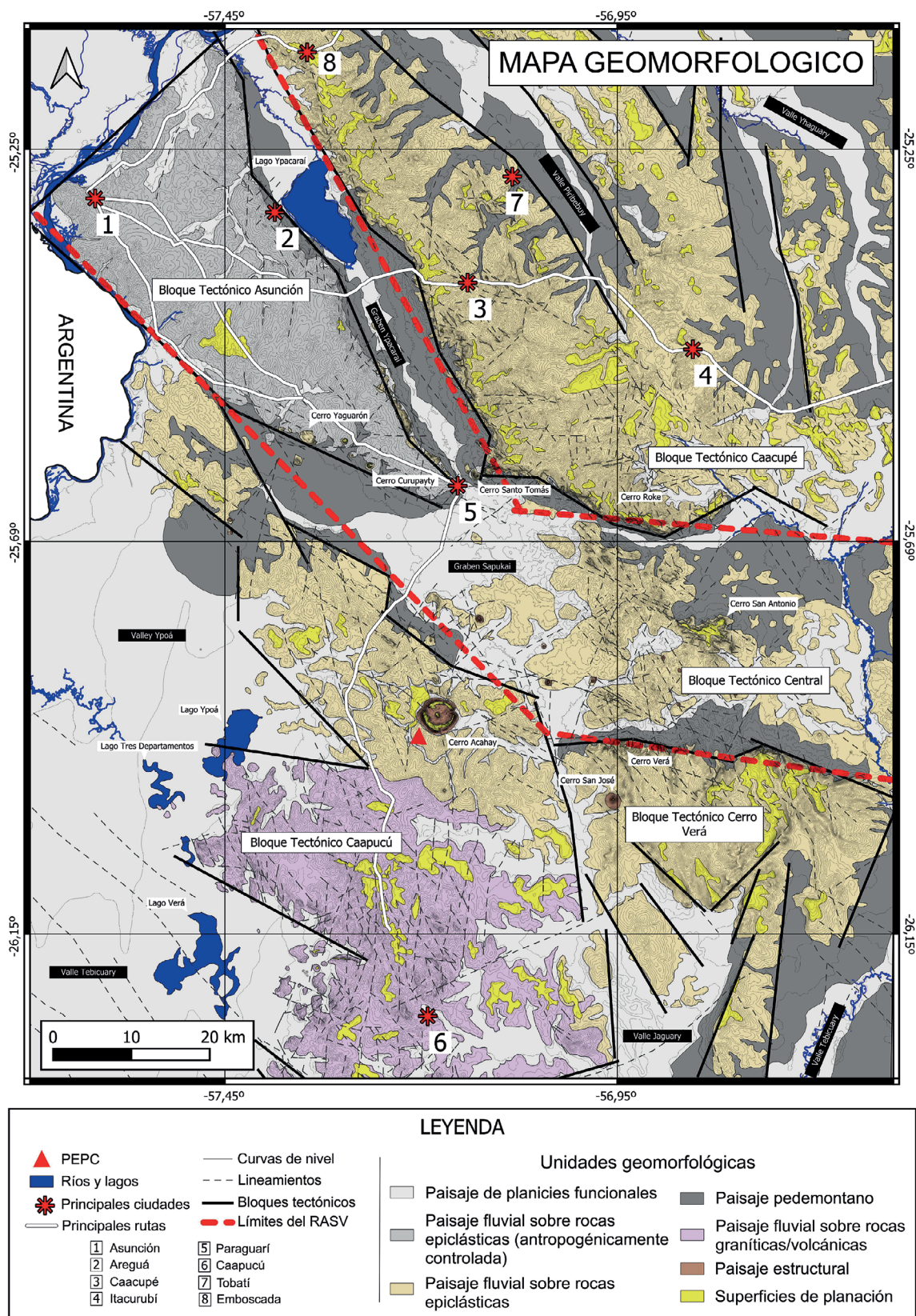


Figura 3 Mapa Geomorfológico del Paraguay central.

Este procedimiento fue necesario para los análisis que involucraron a Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Difracción de Rayos X (DRX), análisis que fueron realizados en las instalaciones de la Universidad Nacional de Asunción de Paraguay.

La identificación de las fases cristalinas se realizó utilizando Difracción de Rayos X (XRD) con radiación Cu K α ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$), en un sistema Panalytical X'Pert PRO con configuración de Bragg-Brentano. Los ajustes de adquisición fueron de 10 a 90 grados ($^{\circ}$), con un tamaño de paso de 0.025 grados ($^{\circ}$) y un tiempo de adquisición de 3 segundos por paso, con un sistema de soporte de muestra con girador. Las fases cristalinas presentes fueron identificadas a través del análisis de los datos cristalográficos obtenidos de la Base de Datos Abierta de Cristalografía (COD). Para ello, se utilizó el Archivo de Información Cristalina (CIF) 96-900-2159 para Goethita (Ght), CIF 96-901-2601 para Cuarzo (Qtz), CIF 96-901-5000 para Caolinita (1), y CIF 96-900-6349 para Feldespatos (2).

La composición elemental mayoritaria se obtuvo mediante Fluorescencia de Rayos X de Dispersión de Energía (EDXRF), con un equipo Shimadzu EDX-7000 equipado con un ánodo de Rh. Se realizó un análisis semi-cuantitativo de los porcentajes en peso (wt %) de los elementos mayoritarios, utilizando parámetros fundamentales (FPM).

Secciones delgadas de las muestras mencionadas fueron preparadas impregnando inicialmente las muestras en una resina epóxica NOVACHEM (DIPREG 87A) y endurecedor NOVACHEM (DIPREG 87B) en una proporción 4:1. Este proceso facilitó el corte de secciones delgadas utilizando una cortadora de rocas LECO, modelo VC-50 y el pulido mecanizado de las mismas con una pulidora LECO, modelo SPECTRUM SYSTEM 1000 (SS1000).

Las imágenes de la micromorfologías detríticas fueron adquiridas utilizando un equipo de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés), modelo ZEISS EVO 15, con espectroscopia de rayos X por dispersión

de energía (EDS0029). Para prevenir la carga superficial que podría alterar la imagen, las muestras fueron recubiertas con una capa de oro (Au) de unos pocos nanómetros de grosor.

4. Resultados

4.1. MAPA GEOMORFOLÓGICO

La geomorfología del área de estudio muestra una marcada herencia de la tectónica asociada a la dinámica del Rift Asunción-Sapucaí-Villarrica y de la acción fluvial durante el Cuaternario, además de la erosión actual, en un ambiente donde dominan las rocas epiclásticas. Favorecido por la escasa pendiente de la estratificación de las rocas sedimentarias, algunos sectores presentan superficies aplanadas que se destacan en el paisaje como terrazas estructurales. Tienen alturas máximas promedio de 400 m s. n. m. y se hallan limitadas tanto por escarpas muy inclinadas, que ocasionalmente superan los 200 m, como por planicies de muy bajo ángulo de origen pedemontano.

La red de drenaje superficial actual, evidencia un claro control de la estructura de la roca y en algunos casos, una importante interferencia de las urbanizaciones y del uso agrícola del suelo. Esto es particularmente notable en la planicie superior del bloque Asunción y en el sector occidental del bloque Caacupé.

Una característica geomorfológica distintiva en el área de estudio son los relictos de superficies planares de distintas alturas, horizontales o subhorizontales, que han sido poco afectadas por la erosión fluvial del Terciario, algunas de las cuales se corresponden con restos de superficies grabadas (ver apartado siguiente). Asociadas genéticamente a estas últimas existen amplios sectores, esencialmente en los bloques Caacupé y Caapucú, donde abundan geoformas menores de meteorización profunda que definen, sobre distintas litologías, paisajes graníticos a pseudograníticos.

También deben mencionarse sectores

relativamente reducidos en el entorno de los cuerpos intrusivos de la Suite Magmática Sapucaí, en donde la influencia de estas estructuras ígneas sobre el diseño de las redes de drenaje es muy notoria.

4.2. RELICTOS DE SUPERFICIES DE PLANACIÓN

El análisis de los modelos digitales de elevación ha permitido identificar un número importante de sectores relativamente planos, horizontales a subhorizontales, elevados con respecto a su entorno (Figura 3), limitados por laderas o escarpas de pendientes muy variables, usualmente altas. La extensión y la altitud de estos también es muy variable (Tablas 1 y 2).

Se identificaron 207 de estos remanentes que afectan, en el bloque Caapucú, afloramientos de las plutonitas y volcanitas de la Suite Magmática Caapucú del Cámbrico inferior; en el bloque Cerro Verá a las areniscas del Grupo Caacupé del Ordovícico superior; en el bloque Central a las areniscas de la Formación Yvytymí del Cretácico superior; en el bloque Asunción a las areniscas del Grupo Asunción del Cretácico superior y en el bloque Caacupé a las areniscas del Grupo Caacupé del Ordovícico superior, del Grupo Itacurubí del Silúrico inferior, de la Formación Arroyos y Esteros del Devónico y a las tillitas de la Formación Coronel Oviedo del Carbonífero.

Se ha podido verificar mediante los controles de campo, que al menos unos 172 de estos sectores planares han desarrollado perfiles de meteorización química de espesores que suelen alcanzar los 4 m y/o exponen geoformas de meteorización química profunda relictuales, mientras que para los 35 restantes no se han encontrado aún evidencias que confirmen dicho origen meteórico y por lo tanto, se las interpreta como restos de superficies de erosión en sentido amplio, representadas en las tablas como “superficies de planación” (Tablas 1 y 2).

Estos últimos sectores planares se distribuyen de la siguiente manera: 17 sobre el bloque Caacupé entre los 370 y 430 m s. n. m. y presentan un suave buzamiento hacia el noreste; uno en el bloque Central entre los 370 y los 405 m s. n. m., dos en el bloque Asunción entre los 180 y los 195 m s. n.

m., que aparentan una inclinación muy baja hacia el noreste; 15 en el bloque Cerro Verá, todas con un buzamiento muy suave hacia el sur y que por su posición altitudinal se distribuyen seis entre los 230 y los 270 m s. n. m., cinco entre los 290 y los 360 m s. n. m., dos entre los 390 y los 440 m s. n. m. y dos entre los 470 y los 515 m s. n. m.

Los 172 relictos de superficies de planación, interpretados como remanentes de *etchplains*, se distribuyen de la siguiente manera: 18 en el bloque Caapucú entre los 130 y los 150 m s. n. m. de los cuales 9 se corresponden con afloramientos de los granitos cámbricos de la Suite Caapucú y 9 con las areniscas ordovícicas del Grupo Caacupé. Otros 20 entre los 170 y 210 m s. n. m., de los cuales 17 se corresponden con los granitos y tres con las areniscas. Los tres restantes aparecen entre los 430 y los 470 m s. n. m. en las plutonitas/volcanitas cretácicas de la Suite Sapucaí.

En el bloque Caacupé se identificaron 80 relictos de superficies grabadas entre los 110 y los 170 m s. n. m., afectando las areniscas silúricas del Grupo Itacurubí, las areniscas devónicas de la Formación Arroyos y Esteros y las tillitas carboníferas de la Formación Coronel Oviedo. Otros 19 se concentran entre los 190 y los 220 m s. n. m., sobre las areniscas paleozoicas. Sobre estas mismas litologías se conservan otros 30 relictos de *etchplains* entre los 230 y 290 m s. n. m. Por último, en el bloque Asunción se confirmaron dos restos de superficies grabadas entre los 220 y los 240 m s. n. m.

4.3. INDICADORES DE METEORIZACIÓN QUÍMICA PROFUNDA

En el área de estudio se reconocieron un total de 172 sitios con indicadores de meteorización química profunda. De este total, 42 se corresponden con restos de perfiles de meteorización química que se concentran principalmente en el bloque Caacupé y en menor proporción en el bloque Caapucú. Por otro lado, se identificaron 130 sitios con presencia de geoformas relictuales de meteorización química, también en su gran mayoría sobre el bloque Caacupé y en menor medida sobre el bloque Caapucú.

Tabla 1. Proyecciones de las superficies de planación de los bloques tectónicos Asunción y Caacupé identificadas. Las ubicaciones están indicadas en la Figura 15 (Mapa de Análisis de Paleopaisajes).

Bloques tectónicos	Niveles	Rangos altitudinales	Cantidad de relictos de superficies	Litologías afectadas	Periodo geológico	Formas grabadas	Perfiles lateríticos (~ m de profundidad)	Clasificación
Bloque Asunción	Nivel inferior	180 - 195 (m s. n. m.)	2 superficies	Areniscas del Grupo Asunción	Cretácico Superior / Paleógeno Temprano	---	---	Superficie de planación
	Nivel superior	220 - 240 (m s. n. m.)	2 superficies	Areniscas del Grupo Asunción	Cretácico Superior / Paleógeno Temprano	Fracturas poligonales, alveolos, <i>tafoni</i> (Celabe <i>et al.</i> , 2023).	---	Superficie grabada
Bloque Caacupé	Nivel inferior	110 - 170 (m s. n. m.)	80 superficies	Areniscas y Lutitas del Grupo Itacurubí	Silúrico Inferior	<i>Corestones</i> , <i>gnammas</i> , <i>tafoni</i> .	~4 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficie grabada
				Areniscas de la Formación Arroyos y Esteros	Devónico Inferior	<i>Corestones</i> , <i>tors</i> desmantelados, fracturas poligonales. <i>Bornhardts</i> .	~2 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficies grabada
				Areniscas y Conglomerados de la Formación Coronel Oviedo	Carbonífero Superior	---	> 4 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficie grabada
	Nivel intermedio inferior	190 - 220 (m s. n. m.)	19 superficies	Areniscas del Grupo Caacupé	Ordovícico Superior	<i>Corestones</i> , <i>boulders</i> , <i>tors</i> desmantelados, fracturas poligonales, <i>tafoni</i> , <i>gnammas</i> , rocas de pedestales. <i>Bornhardts</i> .	< 2 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficie grabada
				Areniscas y Lutitas del Grupo Itacurubí	Silúrico Inferior	<i>Corestones</i> , <i>boulders</i> , fracturas poligonales, <i>gnammas</i> , rocas de pedestales.	>2 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficie grabada
				Areniscas de la Formación Arroyos y Esteros	Devónico Inferior	<i>Corestones</i> , <i>tors</i> desmantelados, fracturas poligonales. <i>Bornhardts</i> .	~2 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficie grabada
	Nivel intermedio superior	230 - 290 (m s. n. m.)	30 superficies	Areniscas del Grupo Caacupé	Ordovícico Superior	<i>Corestones</i> , <i>boulder</i> , <i>tors</i> desmantelados, fracturas poligonales, <i>tafoni</i> , <i>gnammas</i> , rocas pedestales. <i>Bornhardts</i> .	< 2 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficie grabada
				Areniscas y Lutitas del Grupo Itacurubí	Silúrico Inferior	<i>Corestones</i> , <i>boulders</i> , fracturas poligonales, <i>gnammas</i> , rocas pedestales.	> 2 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficie grabada
				Areniscas del Grupo Caacupé	Ordovícico Superior	---	---	Superficie de planación
	Nivel superior	370 - 430 (m s. n. m.)	17 superficies	Areniscas del Grupo Caacupé	Ordovícico Superior	---	---	Superficie de planación

4.3.1. PERFILES DE METEORIZACIÓN QUÍMICA PROFUNDA

Se reconocieron 42 sitios con perfiles de meteorización química, distribuidos de la siguiente manera: 5 en el bloque Caapucú sobre las rocas plutónicas/volcánicas ácidas del Cámbrico, de la Suite Magmática Caapucú. Los otros 37 aparecen en el bloque Caacupé, 2 en rocas epiclásticas ordovícicas de la Formación Piribebuy del Grupo Caacupé, 14 en rocas epiclásticas silúricas del

Grupo Itacurubí, 5 las areniscas devónicas de la Formación Arroyos y Esteros y 16 en las rocas epiclásticas que componen la Formación Coronel Oviedo del Carbonífero.

Aún no se cuenta con caracterizaciones mineralógicas y químicas de los restos de perfiles de meteorización química en las areniscas, sin embargo, las observaciones de campo permitieron reconocer un espesor máximo de 4 m entre la zona superior de los perfiles, en donde se concentran las acumulaciones de hierro inmediatamente

Tabla 1. Proyecciones de las superficies de planación de los bloques tectónicos Asunción y Caacupé identificadas. Las ubicaciones están indicadas en la Figura 15 (Mapa de Análisis de Paleopaisajes).

Bloques tectónicos	Niveles	Rangos altitudinales	Cantidad de relictos de superficies	Litologías afectadas	Periodo geológico	Formas grabadas	Perfiles lateríticos (~ m de profundidad)	Clasificación
Bloque Caacupé	Nivel inferior	130 - 150 (m s. n. m.)	18 superficies	Granitos y Riolitas de la Suite Caacupé	Cámbrico Inferior	Corestones (Colman <i>et al.</i> , 2018; 2019). <i>tors</i> , <i>tafoni</i> . <i>Bornhardts</i>	~4 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficie grabada
	Nivel intermedio	170 - 210 (m s. n. m.)	20 superficies	Granitos y Riolitas de la Suite Caacupé	Cámbrico Inferior	Corestones (Colman <i>et al.</i> , 2018; 2019), <i>tafoni</i> , <i>compaires</i> . <i>Bornhardts</i>	~2 (m), Perfil laterítico (Saprolito)	Superficie grabada
				Areniscas del Grupo Caacupé	Ordovícico Superior	Corestones "La Piedra Equilibrada" (Rabassa <i>et al.</i> , 2018; 2021; Colman <i>et al.</i> , 2022, 2024), <i>tors</i> , fracturas poligonales, <i>tafoni</i> , <i>gnammas</i> , rocas de pedestales. <i>Bornhardts</i>	---	Superficie grabada
				Gabros de la Suite Sapucaí	Cretácico Superior	Corestones, <i>tors</i> , <i>tafoni</i>	---	Superficie grabada
Bloque Central	Nivel único	360 - 405 (m s. n. m.)	1 superficie	Areniscas de la Formación Ybytymí	Jurásico Superior	---	---	Superficie de planación
Bloque Cerro Verá	Nivel inferior	230 - 270 (m s. n. m.)	6 superficies	Areniscas del Grupo Caacupé	Ordovícico Superior	---	---	Superficie de planación
	Nivel intermedio inferior	290 - 360 (m s. n. m.)	5 superficies	Areniscas del Grupo Caacupé	Ordovícico Superior	---	---	Superficie de planación
	Nivel intermedio superior	390 - 440 (m s. n. m.)	2 superficies	Areniscas del Grupo Caacupé	Ordovícico Superior	---	---	Superficie de planación
	Nivel superior	470 - 515 (m s. n. m.)	2 superficies	Areniscas del Grupo Caacupé	Ordovícico Superior	---	---	Superficie de planación

por debajo del suelo actual, hasta la zona más profunda del perfil donde aparecen los protolitos o roca madre.

Para la mayoría de los perfiles estudiados sobre el bloque Caacupé (ver fotografías A, B, C, D y E, de la Figura 4) se definieron cuatro zonas principales; una zona superior con espesores que varían entre 0.4 y 2 m, enriquecida con hierro donde se observan ferricretas, en las que con frecuencia se observa el desarrollo de estructuras concrecionales de varios centímetros que tienen forma nodular, discoidal o irregular. Por debajo de este nivel superior, aparece una zona intermedia de entre 1 a 2 m de espesor, con predominio de saprolito, la cual aparece generalmente moteada, mostrando una degradación física y química vertical ascendente. En los sectores más profundos de la zona intermedia, se puede

observar a saprolitos que muchas veces conservan las texturas propias de los protolitos y muchas veces, con cambios en la forma e intensidad del moteamiento, característica que permite dividir a esta zona en: una zona intermedia superior y una intermedia inferior.

Finalmente, en el segmento más profundo de estos perfiles se ha identificado la roca madre, con evidencias de alteración química. Si bien no se ha podido individualizar el contacto con la roca fresca, se asume que esta zona inferior del perfil suprayace al frente de meteorización profunda.

Por otro lado, los cinco sitios con restos de perfiles de meteorización química profunda identificados en el bloque Caacupé, comparten las siguientes características físicas: la zona más profunda de los granitos de la Suite Magmática Caacupé se encuentran prácticamente inalterados, el cual

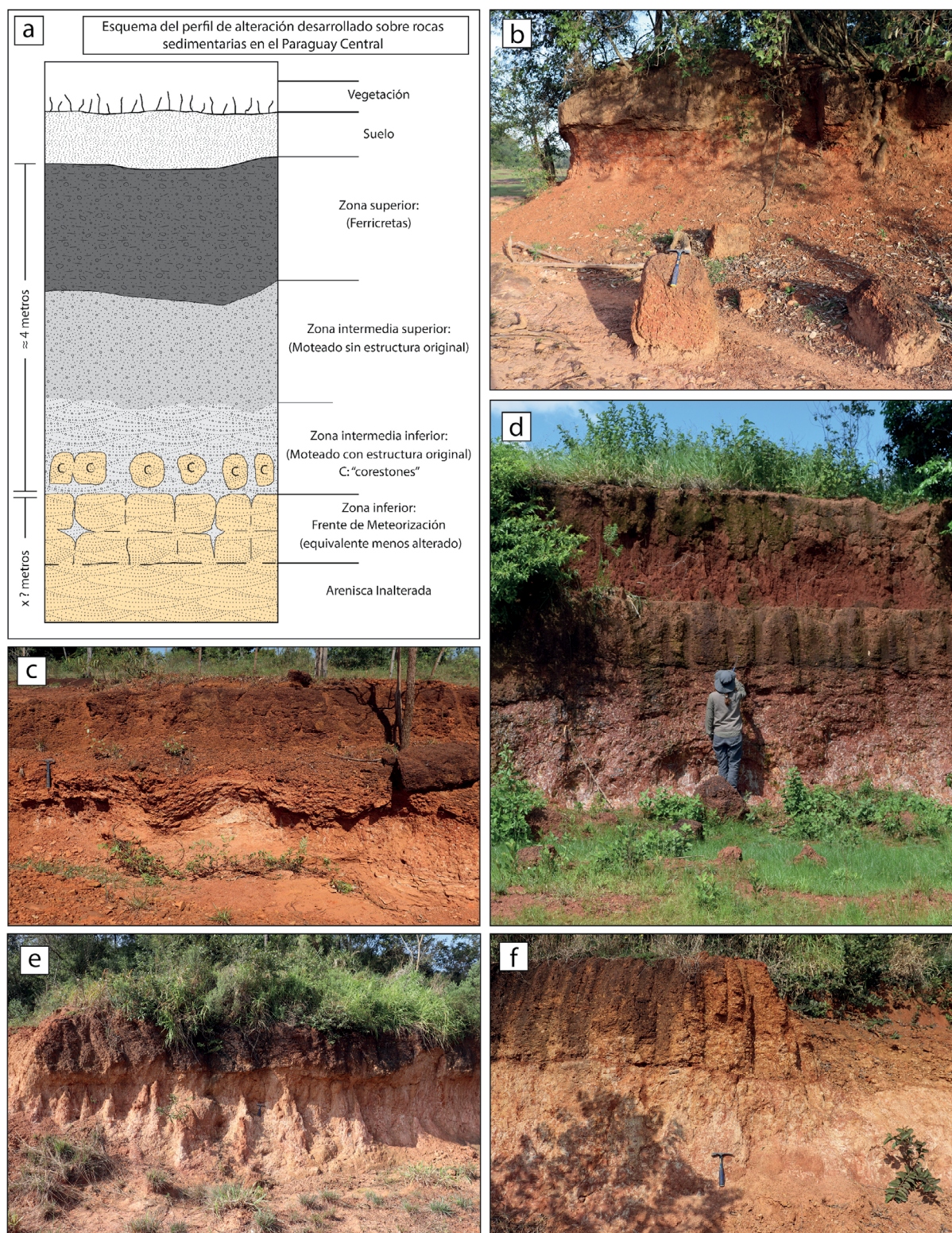


Figura 4 Perfiles de meteorización química profunda: A) Esquema de los perfiles de alteración del Paraguay central, extraído y modificado de Ollier (2010). B, C y D) Zonas superior y media-superior de perfiles de alteración ubicados al norte de la ciudad de Itacurubí en el bloque Caacupé, desarrollados sobre: B y D) Tillitas del Carbonífero, C) Epiclastitas del Silúrico inferior. E y F) Zonas superior y media-superior de perfiles de alteración desarrollados sobre epiclastitas del Cretácico superior de la Formación Ybytymí en el bloque central.

es interpretado como el frente de meteorización. Inmediatamente por encima, se observa el nivel más profundo de la zona intermedia, equivalente a la zona moteada de los perfiles en areniscas. En este caso, el saprolito generado a partir de granitos presenta una variable concentración de caolinita (ver fotografías F y G, de la Figura 4). Los niveles equivalentes a las zonas superiores de los perfiles de meteorización química en areniscas sobre el bloque tectónico Caapucú no han sido identificados en los relevamientos de campo y se concluye que los mismos podrían haber sido erosionados.

4.3.2. GEOFORMAS RELICTUALES DE METEORIZACIÓN QUÍMICA PROFUNDA

En el área de estudio se identificó un total de 130 sitios con geoformas relictuales de meteorización química profunda, incluyendo formas mayores como bornhardtts y formas menores como rocas nucleares (*corestones*), *tors*, *gnammas*, *tafoni*, grietas poligonales, rocas pedestales, entre otras. La abundancia de estas morfologías en las rocas ígneas del bloque Caapucú han definido auténticos paisajes graníticos, mientras que escenarios similares, psuedograníticos, en el sentido que otros autores le dan al término (Twidale y Lageat, 1994; Gavrilov, 2016), caracterizan a las areniscas del bloque Caacupé.

a) El paisaje granítico de Caapucú

En los alrededores de la localidad de Caapucú (26°14.012'S; 57°10.806'O), en un área de más de 1 400 km², sobre las rocas plutónicas/volcánicas ácidas de la Suite Magmática Caapucú, se ha desarrollado un típico paisaje granítico en el sentido de Vidal Romaní y Twidale (1998) y Twidale y Vidal Romaní (2005), caracterizado por el dominio de formas mayores y menores de distintos tamaños. Las formas menores más representativas son los *corestones* y *boulders* (ver fotografías F, G y H, de la Figura 5), que aparecen con diámetros entre 0.3 m y 30 m, muchas veces constituyendo *tors* dismantelados (ver fotografías

A y E de la Figura 5). También son frecuentes los bloques hendidos de variados tamaños (ver la fotografía C, de la Figura 5). Tanto los *corestones* como los *boulders* suelen presentar costras endurecidas de hasta 1 cm de espesor. Se han identificado, además, fracturas poligonales, cuadrangulares y pentagonales, algunas veces del tipo mosaico. Otras formas menores identificadas, menos frecuentes, son los *tafoni* y las *gnammas*.

Los *bornhardtts* constituyen las formas mayores más abundantes. Pueden alcanzar alturas de hasta 150 m. La superficie de estos notables promontorios está, en la gran mayoría de los casos, cubierta por suelo y vegetación, condición que habría favorecido la conservación de las formas menores que suelen tapizarlos.

b) El paisaje pseudogranítico del Cerro Acahay

El Cerro Acahay (25°53'4.64"S; 57°10'23.69"O), una intrusión subcircular compuesta por plutonitas y volcanitas de la Suite Sapucaí del Cretácico inferior parte de la Provincia Alcalina Central, se ubica en la porción norte del bloque Caapucú y posee un área cercana a los 14 km², con una altitud entre los 350 y 550 m s. n. m.

Litológicamente, este macizo producto del emplazamiento magmático durante el proceso de formación del Rift de Asunción-Sapucaí-Villarrica, se encuentra conformado por essexitas distribuidas periféricamente y gabros alcalinos (sienogabros, sienodioritas y sienitas) en el interior y, en las partes más altas, volcanitas (traquibasaltos, traquiandesitas y traquitas). Sobre su superficie se ha identificado un número muy amplio de formas menores de meteorización química profunda (Figura 6), *corestones* y *boulders* de dimensiones muy variadas (ver fotografías A y B, de la Figura 6), geoformas que forman parte de *tors* dismantelados (ver fotografía A, de la Figura 6). Sobre la superficie de los *corestones* se identifica una costra endurecida de algunos pocos centímetros de espesor (ver fotografía B, de la Figura 6), en algunos casos pudiéndose verificar fracturamientos poligonales desarrollados sobre las costras. Se identificaron además *tafoni* de

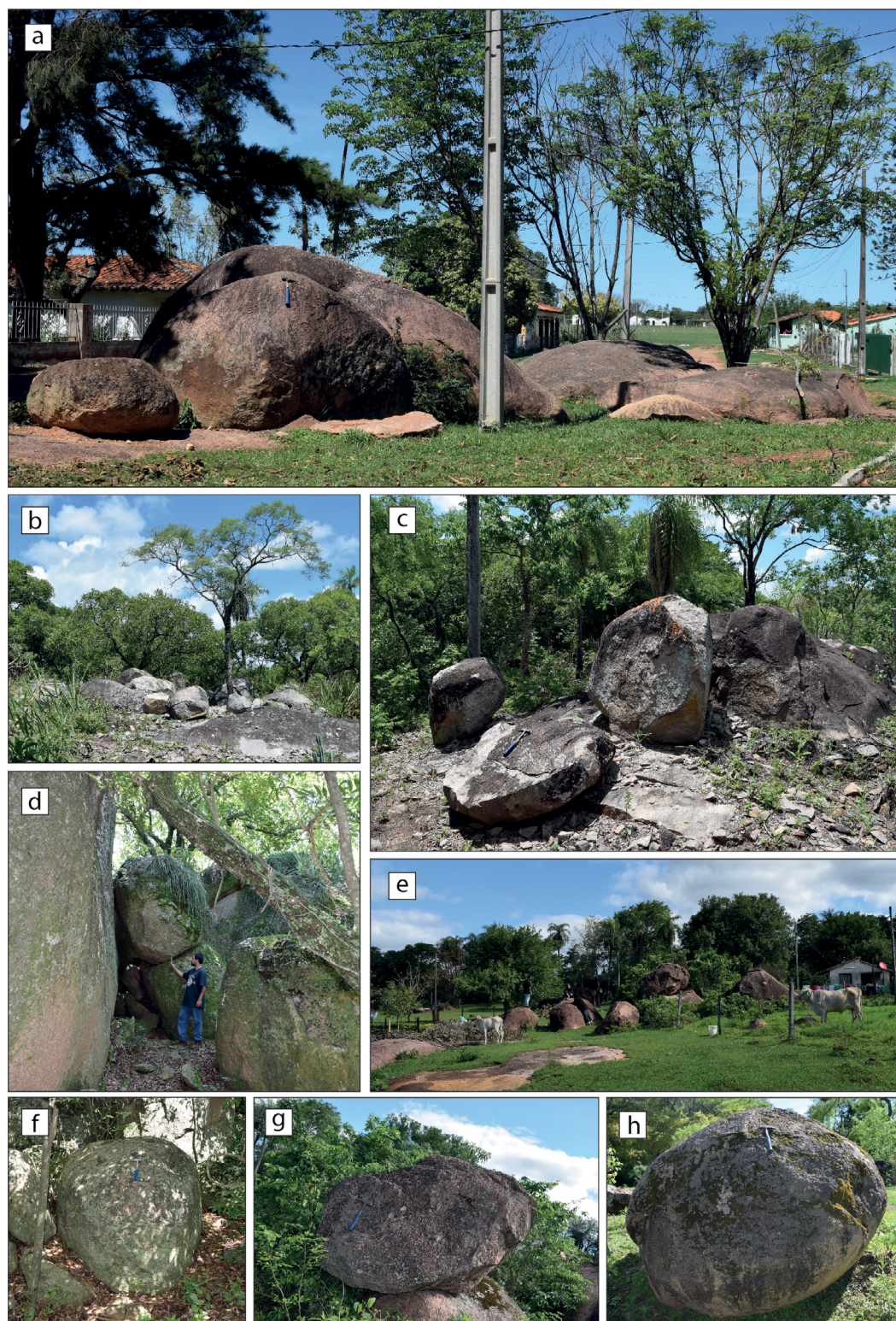


Figura 5 Formas relictuales menores de meteorización química profunda desarrolladas en las rocas de la Suite Magmática Caapucú. A y E) *Tors* dismantelados con grandes *corestones* en el centro de la ciudad de Caapucú. B) *Tor* dismantelado con grandes *corestones* al oeste de Caapucú. C) *Corestones* ubicados al oeste de Caapucú. D) *Tor* de dos niveles apoyada en un *corestone* de tamaño gigante al norte de Caapucú. F y H) *Corestones* de diversos tamaños en Caapucú. G) *Corestone* en una posición de inestabilidad precaria en Caapucú, formando una PBR (*Precariously Balanced Rock*).

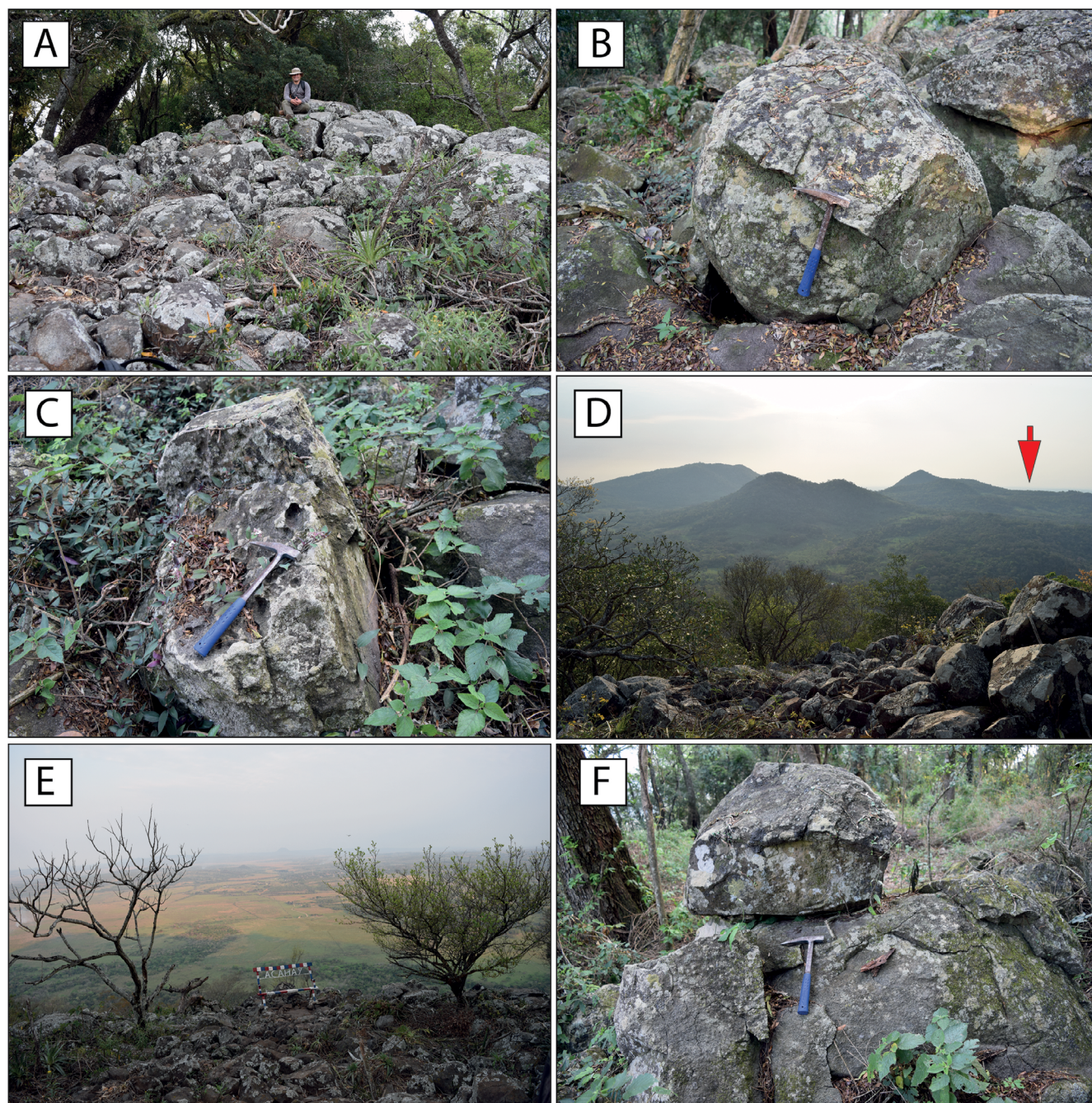


Figura 6 Formas relictuales menores del Cerro Acahay. A) Corestones dispersos por el dismantelamiento de un tor. B) Corestones con costra de alteración en proceso de desprendimiento. C) Corestones con tafoni de pequeñas dimensiones desarrollados sobre la costra de alteración. D) Vista interna del Cerro Acahay, con el cono central, señalando la posición de la etchplain en el horizonte. Superficie ubicada en el nivel superior en el bloque Caapucú (430 – 475 m s. n. m.). E) Vista desde la cima del Cerro Acahay en dirección SE. F) Corestones con la costra de alteración en posición de inestabilidad precaria, conformando una PBR.

muy pocas dimensiones (ver fotografía C, de la Figura 6), además de rocas precariamente equilibradas (ver fotografía F, de la Figura 6).

c) El paisaje pseudogranítico de la meseta de Tobatí

La meseta de Tobatí (25°17.480'S; 57°5.820'O) se ubica sobre el bloque Caacupé, posee una superficie cercana a los 10 km² con 150 m de altura y una altitud de 230 m s. n. m. La litología dominante son las areniscas de la Formación Piribebuy del Grupo Caacupé. Seguramente el paisaje pseudogranítico desarrollado sobre la superficie de esta meseta sea el más rico y variado de toda el área de estudio. Las formas menores predominantes son las fracturas poligonales de hasta 50 cm de diámetro, muchas veces constituyendo cuadriláteros, pentagonales y hexagonales, con aspecto de mosaico.

La génesis de estas fracturas estaría asociada a la presencia de una costra endurecida de varios centímetros de espesor, pudiendo incluso superar los 30 cm (ver fotografía C, de la Figura 7). Las fracturas poligonales y las costras endurecidas tridimensionales muchas veces funcionan como estructuras protectoras de los *corestones* y *boulders*, así como a los arcos naturales (ver fotografía A, de la Figura 7).

La erosión de las costras endurecidas donde se desarrollaron las fracturas poligonales, ha dado lugar a pequeñas rocas pedestales que no superan los 30 cm de altura (ver fotografía C, de la Figura 7). Se han identificado además *gnammas* que alcanzan los 4 m de diámetro y profundidades de 40 cm (ver fotografía B, de la Figura 7). Otras formas menores muy comunes en este sector son los *tafoni*, inclusive del tipo *honeycomb* (ver fotografía D, de la Figura 7).

Los *bornhardts* (ver fotografía F, de la Figura 7) son las formas mayores observables en la meseta. Aparecen tapizados por *tafoni* y fracturas poligonales. En ocasiones, en las laderas de la meseta se pueden observar otras formas menores como los *rillenkarrens*, formas menores con más de 30 m de longitud vertical (ver fotografía H, de la

Figura 7). Otras formas observadas, son los pilares pétreos con alturas aproximadas de 3 m y diámetro de 2 m y los arcos naturales (ver fotografía G, de la Figura 7). Todas estas geoformas presentan en su superficie costras endurecidas de entre 5 a 40 cm de espesor, sobre la cual se han desarrollado fracturas poligonales.

d) El paisaje pseudogranítico del Cerro Tren

El Cerro Tren (25°27.102'S; 56°56.819'O) en el bloque Caacupé, es un sitio donde se encuentran ampliamente distribuidas formas menores relictuales de meteorización química profunda, que se desarrollaron sobre las areniscas de la Formación Piribebuy del Grupo Caacupé. En casi todos los casos se encuentran recubiertos por una costra endurecida de varios centímetros de espesor. Sobre esta costra aparecen estructuras poligonales de hasta 50 cm de diámetro, con formas triangulares, cuadriláteros, pentagonales y hexagonales.

Se identificaron, además, pequeñas rocas pedestales de no más de 15 cm de altura (ver fotografía I, de la Figura 8), producto de la erosión sobre las grietas. Sobre las costras endurecidas se han desarrollado también, *gnammas* y *tafoni*. Las *gnammas* no superan el metro de diámetro con profundidades muy someras de alrededor de 30 cm, mientras que los *tafoni* son pequeños, de no más de 10 cm de diámetro, apareciendo frecuentemente en agrupamientos del tipo *honeycomb* (ver fotografías B y C, de la Figura 8).

El único boulder identificado se corresponde con un bloque desprendido del Cerro Tren (ver fotografía A y D, de la Figura 8), el cual tiene una costra endurecida de varios centímetros de espesor y que debido a su condición de inestabilidad precaria termina conformando una *Precariously Balanced Rock* (ver fotografía D, de la Figura 8).

e) El paisaje pseudogranítico de Emboscada

En el entorno del paisaje Emboscada (25°7.541'S; 57°22.330'O), en el extremo noroeste del bloque Caacupé, se ha desarrollado un paisaje

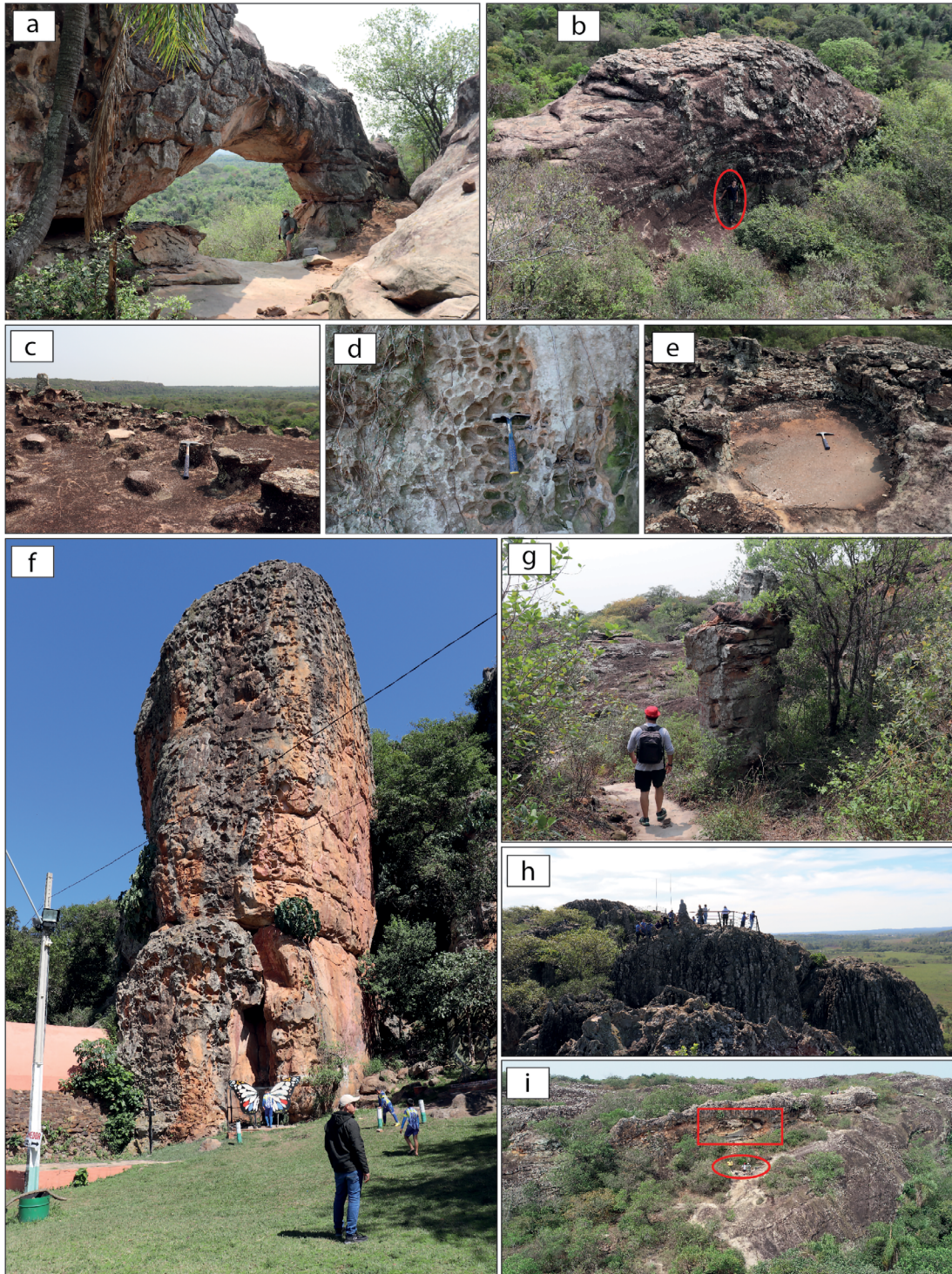


Figura 7 Formas relictuales mayores y menores de meteorización química profunda asociadas con el Cerro Arco. A) Arco natural del Cerro Arco, una forma de relieve que da nombre al cerro. B) Pared zapada asociada con la superficie del Cerro Arco, muchas de las cuales tienen más de 4 metros de profundidad. C) Pequeñas rocas de pedestal, no más de 50 cm de altura, estas formas de relieve se desarrollaron sobre la costra de alteración, y sus límites laterales corresponden a las dimensiones de los fracturamientos poligonales. D) *Tafoni* tipo *honeycomb* desarrollados dentro de un *tafone* mayor, ubicados en los laterales del arco natural. E) *Gnammas* de más de 1 metro de diámetro, con algunas áreas que superan los 40 cm de profundidad. F) *Bornhardt* de más de 50 metros de altura, cubierto de *tafoni* y fracturamientos poligonales. G) Pilares de 4 metros de altura identificados en la cima de las mesetas. H) *Rillenkarren* ubicados en los laterales de las *bornhardts*, algunos con más de 30 metros de elongación. I) Fotografía aérea con *drone* del arco natural.

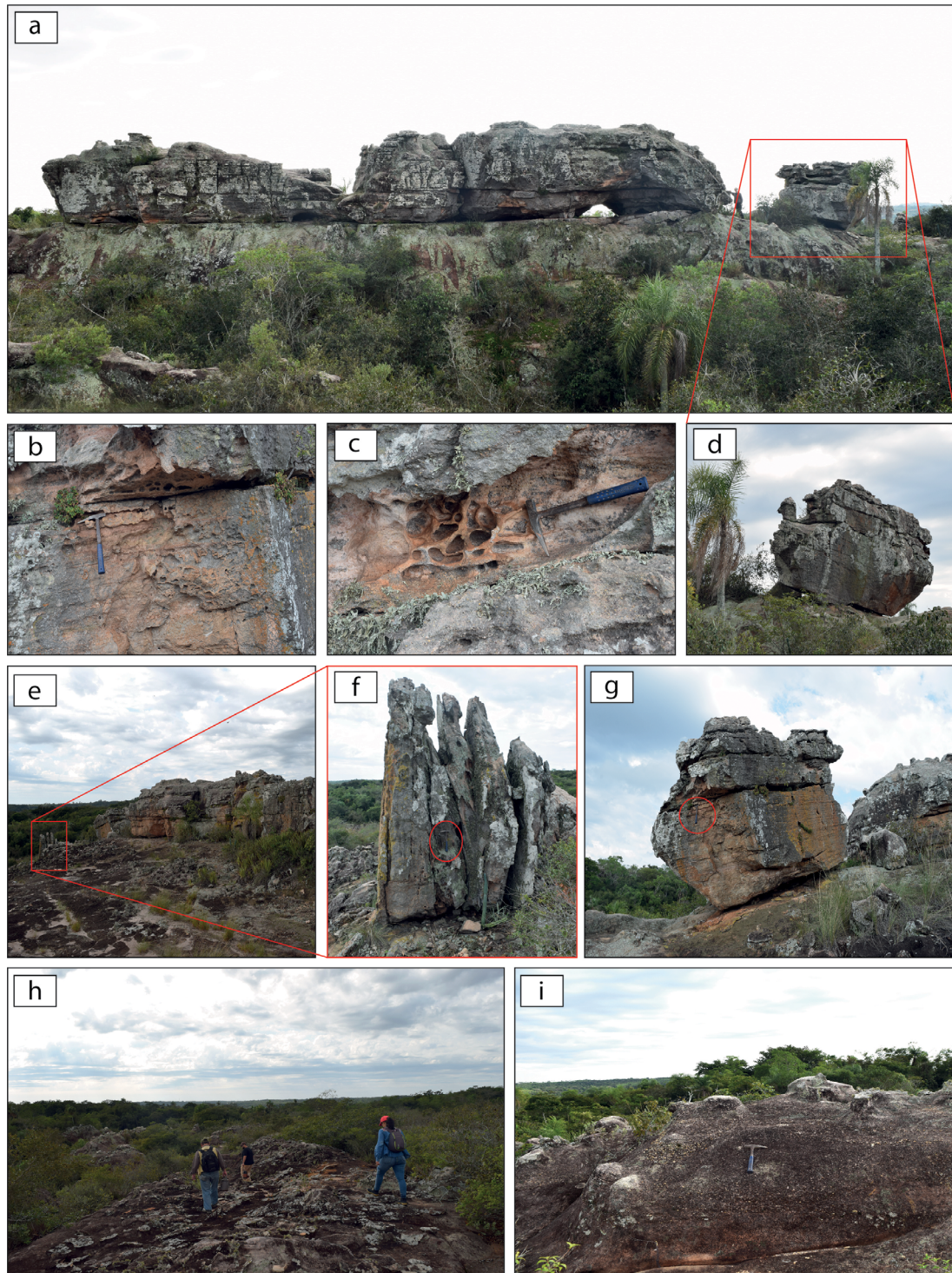


Figura 8 Formas relictuales mayores y menores de meteorización química profunda asociadas con el Cerro Tren. A) El Cerro Tren, una morfología relictual de alteración química, correspondiente a bloques de roca actualmente alineados (Gadea y Vázquez, 2021). B y C) *Tafoni* en los costados de la roca en una condición precaria. (B: *Tafoni*, C: *Honeycomb*). D) Fotografía del lado derecho de la roca en una condición precaria. E) Fotografía del lado izquierdo del Cerro Tren, destacando estructuras tipo pináculo dentro del marco rojo. F) Pináculos, formas de relieve favorecidas por la disposición de los planos de estratificación de la roca. G) Fotografía del lado izquierdo de la roca en una condición precaria. H) Paisaje general en el área del Cerro Tren, observe las formas mamelonadas alargadas que se extienden por varios cientos de metros, probablemente favorecidas por alineamientos tectónicos. I) Rocas de pedestales de pequeño tamaño coronando una porción significativa de los afloramientos.

pseudogranítico sobre las areniscas friables de la Formación Piribebuy del Grupo Caacupé. Las formas predominantes son los *corestones* y los *boulders*. Formas relictuales menores que superan muchas veces los 2 m de diámetro (ver fotografía A, de la Figura 9) y que en todos los casos aparecen recubiertos por una costra endurecida de 5 cm de espesor en promedio. Algunos de los *corestones* y *boulders* conforman *tors* desmantelados (ver fotografía D, de la Figura 9). En estos se ha identificado algunos bloques hendidos (ver fotografía F, de la Figura 9).

Se han identificado, además, algunas Precariously Balanced Rocks (ver fotografía C, de la Figura 9). La superficie de algunos de los *boulders* de mayores dimensiones muestra pequeñas *gnammas* (ver fotografía E, de la Figura 9) que no superan los 10 cm de profundidad. Las grietas poligonales o pseudopoligonales, de pequeñas dimensiones, con formas de cuadriláteros o triangulares, con diseño de mosaico, también son frecuentes.

La superficie del área, sobre la cual aparecen las geoformas menores citadas, es de roca fresca escasamente alterada. Se muestra suavemente ondulada y se corresponde con la parte alta del frente de meteorización antiguo (ver fotografía A, de la Figura 9). La exposición de este elemento que constituye la base de los perfiles de meteorización es relevante y en este caso, ha sido posible por la posición altitudinal elevada del paisaje asociado a un quiebre de la pendiente topográfica. En esta localidad no se han identificado grietas poligonales, como en otros sectores de la *etchplain* labrada sobre esta unidad litoestratigráfica.

f) El paisaje pseudogranítico de la Piedra Equilibrista de Paso Carreta

La Piedra Equilibrista de Paso Carreta (PEPC) se corresponde con un *corestone* (Rabassa *et al.*, 2018, 2021; Colman *et al.*, 2024), que se encuentra situada sobre una roca pedestal de la misma litología, encontrándose ambas geoformas separadas entre sí. El cuerpo superior está soportado por la roca pedestal a través de tres

pequeños puntos de contacto en proporción al tamaño del cuerpo superior. Esta circunstancia le otorga una condición precaria de estabilidad (ver fotografía D, de la Figura 10).

Tanto el cuerpo equilibrado como el pedestal rocoso están cubiertos tridimensionalmente por una costra endurecida, que no excede los 10 cm de grosor. Se han identificado grietas poligonales en la costra (ver fotografía F, de la Figura 10). Estas formas menores presentan tamaños y profundidades variables. Algunas grietas tienen diámetros de (≥ 30 cm), mientras que otras son más pequeñas (≤ 5 cm), mostrando principalmente formas rectangulares a cuadrangulares, junto con otras formas más inusuales de tipo reniforme. En el área donde predominan las grietas de forma reniforme, se encuentran grietas en mosaico, consistentes en grietas poligonales más pequeñas anidadas dentro de grietas poligonales más grandes.

En el sitio asociado a la Piedra Equilibrista, se han identificado además otras geoformas menores relictuales de meteorización química profunda como rocas pedestales con más de 1,50 m de altura (ver fotografía C, de la Figura 10). También son relativamente abundantes las *gnammas* con varios centímetros de profundidad (ver fotografía E, de la Figura 10) mientras que los *tafoni* pequeños son menos usuales.

g) El paisaje pseudogranítico al norte de Itacurubí

Esta localidad está ubicada al norte de Itacurubí (25°18.938'S; 56°51.890'O), sobre el bloque tectónico Caacupé, en un ambiente donde dominan las rocas sedimentarias devónicas de la Formación Arroyos y Esteros. Se concentran a una altitud promedio de 210 m s. n. m., formas mayores y menores relictuales de meteorización química profunda. Las formas menores identificadas son principalmente, *corestones* y *boulders* con diámetros entre los 0.4 m y los 5 m, que en muchos casos se corresponden con *tors* desmantelados.

La gran mayoría muestra una superficie con fracturas poligonales de pequeñas dimensiones, con formas triangulares, cuadrangulares,

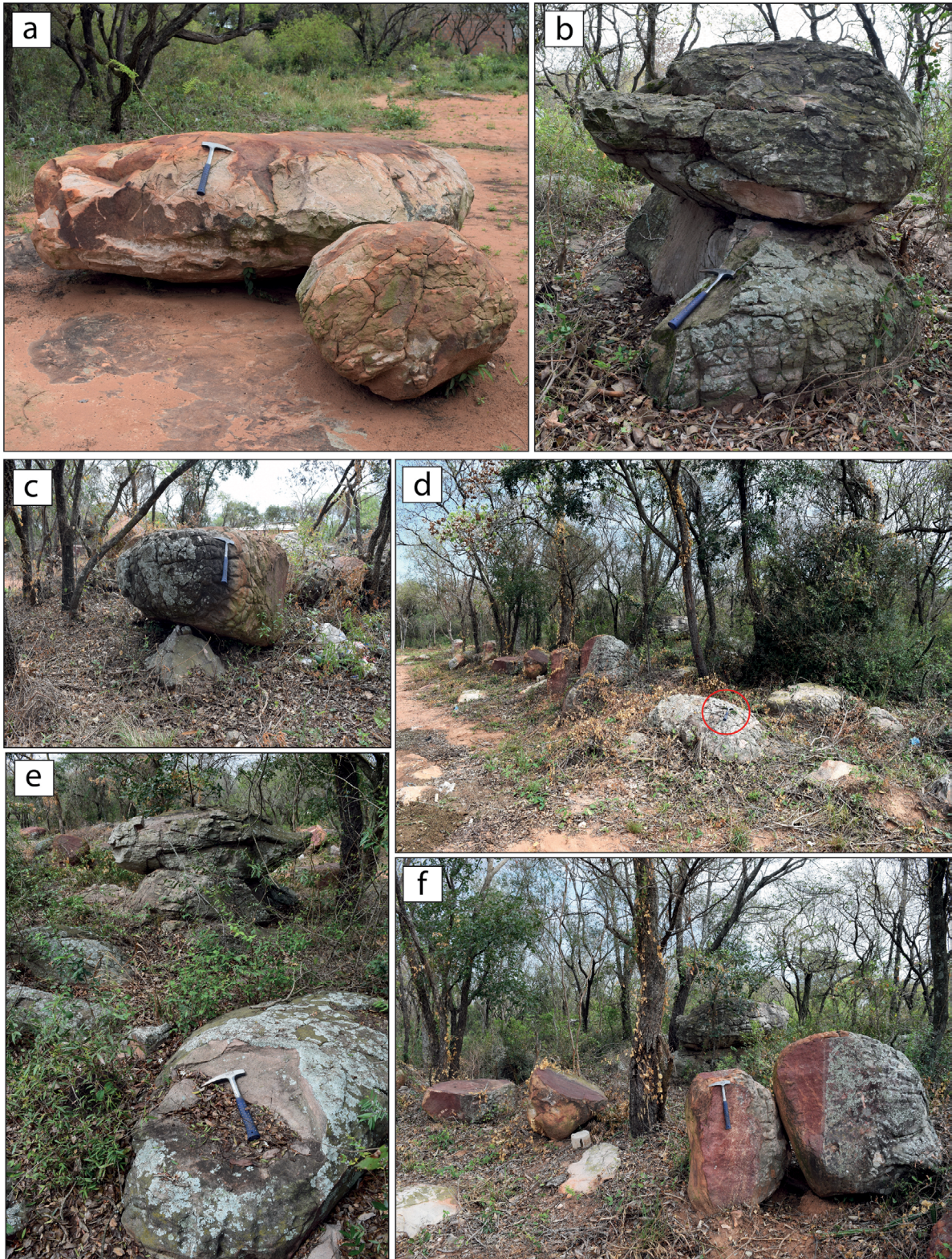


Figura 9 Geoformas de meteorización química profunda asociadas a la Formación Piribebuy de Emboscada. A) *Corestones* cubiertos con fracturamientos poligonales en el frente de meteorización, alrededor de la ciudad de Emboscada. B y C) *Corestones* sobre sus rocas de pedestales, ambas geoformas cubiertas por fracturamientos poligonales, observadas alrededor. D y F) *Tor* desmantelado. E) *Gnamma* de 30 cm sobre un núcleo.

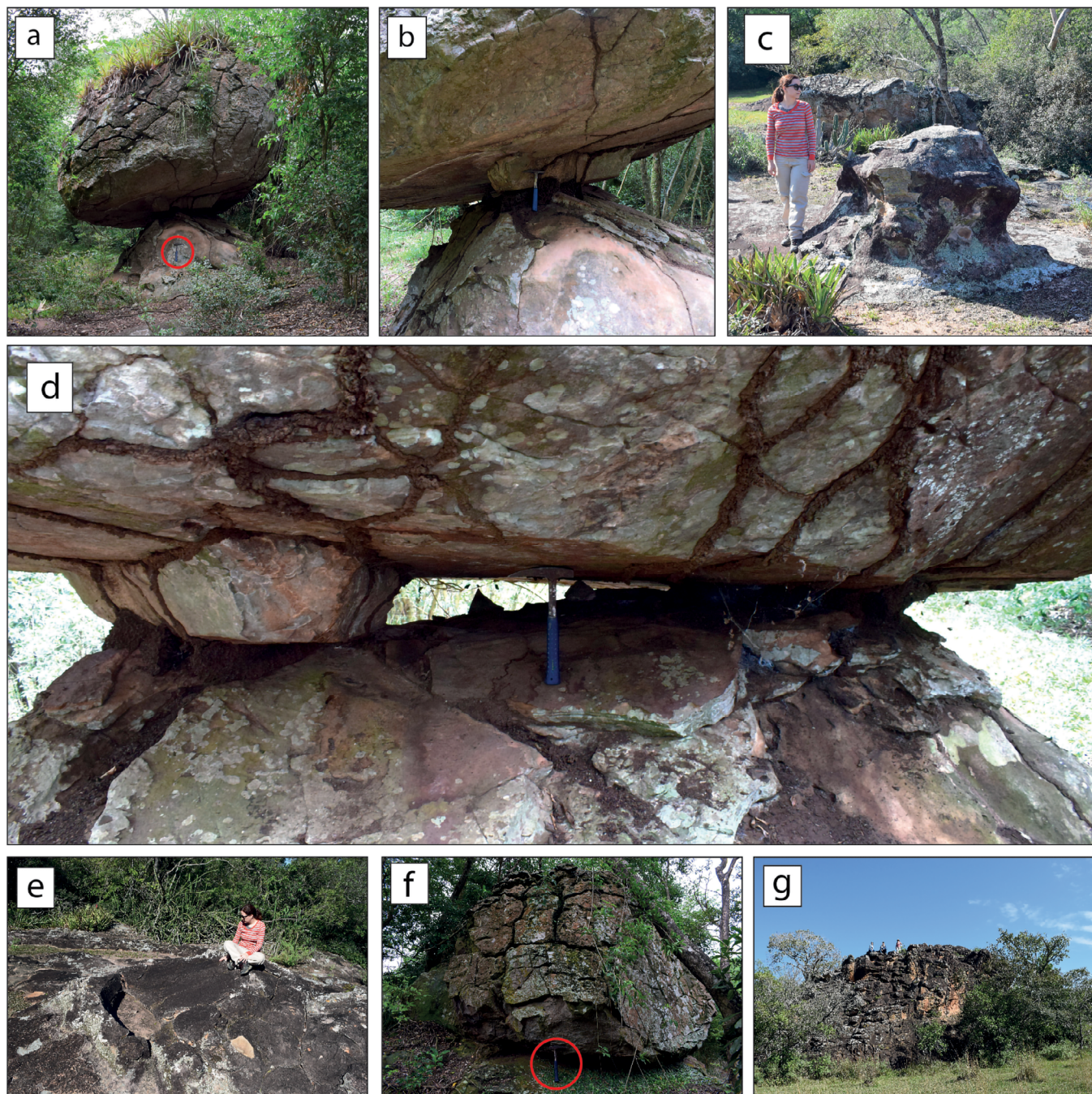


Figura 10 Formas relictuales de meteorización química profunda, mayores y menores, de Paso Carreta. A) Vista general de la Piedra Equilibrada. B) Zona de contacto entre la Piedra Equilibrada y su roca pedestal. C) Roca pedestal de más de 1 m de altura, a pocos metros de la Piedra Equilibrada. D) Puntos de contacto de la Piedra Equilibrada con su roca pedestal, demostrando su inestabilidad precaria (Rabassa *et al.*, 2018, 2021; Colman *et al.*, 2024). E) *Gnamma* de varios centímetros de profundidad cerca de la Piedra Equilibrada. F) *Corestone* con fracturamientos poligonales desarrollados en la costra de meteorización tridimensional. G) *Bornhardt* en areniscas, a 3 km al norte de la Piedra Equilibrada.

pentagonales y hexagonales, usualmente con diseño de mosaico (ver fotografía C, de la Figura 11). En muchos casos se ha observado que estas fracturas se superponen perpendicularmente a la dirección de la estratificación de las sedimentitas (ver fotografía A, de la Figura 11). Se identificaron además *tafoni* (ver fotografía B, de la Figura 11) de pequeñas dimensiones, que no superan los 20 cm de diámetro ocasionalmente del tipo *honeycomb*.

Formas mayores como *bornhardts* también han sido identificadas. Estos promontorios presentan laderas muy empinadas y alcanzan alturas cercanas a los 30 m. Su superficie se encuentra, usualmente, cubierta por costras endurecidas de varios centímetros de espesor, las que a su vez muestran el característico fracturamiento poligonal y *tafoni* del tipo *honeycomb*.

4.4. LA COSTRA ENDURECIDA EN LA PIEDRA EQUILIBRISTA DE PASO CARRETA

La costra endurecida de la Piedra Equilibrista de Paso Carreta es un elemento de mayor cohesión relativa que favorece la conservación de esta geoforma de la misma manera que lo hace con muchas otras similares en el área de estudio. Geoformas mayores y menores que no cuentan con esta duricostra protectora aparecen con rasgos de erosión significativa, con menor grado de conservación.

Los análisis mineralógicos realizados a la PEPC (Figura 12) tanto el interior del cuerpo como a la costra endurecida, muestran que los picos de mayor intensidad están asociados a la fase cristalina del cuarzo ($\sim 21^\circ$ 4.22Å; $\sim 26^\circ$

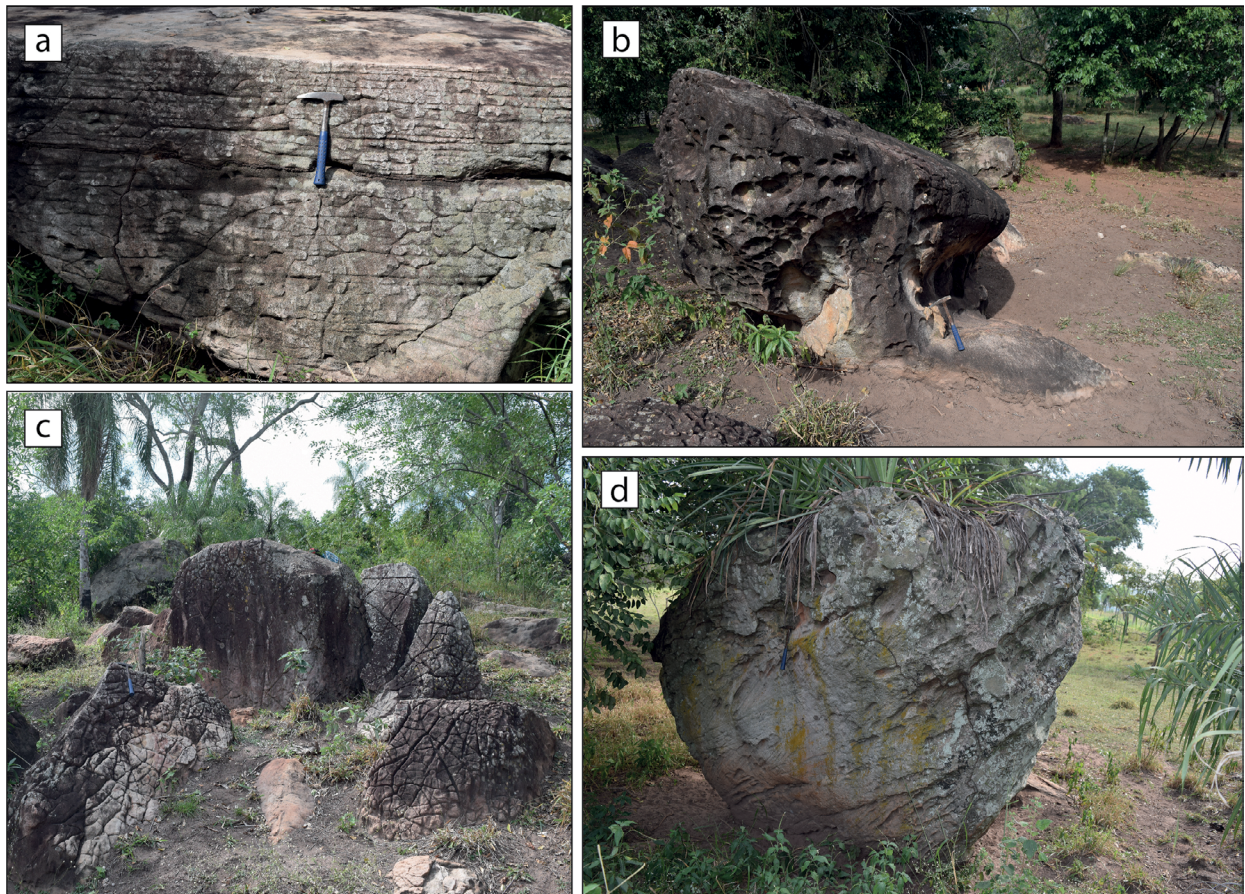


Figura 11 Formas relictuales de meteorización química profunda desarrolladas sobre areniscas devónicas de la Formación Arroyos y Esteros. A) Fracturamientos poligonales transversales a la estratificación en un bloque. B) *Tafoni* desarrollados sobre una roca pedestal. C) *Tor* desmantelado con una gran cantidad de fracturamientos poligonales en los *corestones*. D) Bloque en posición de inestabilidad precaria con el desarrollo de *tafoni* en la costra de meteorización.

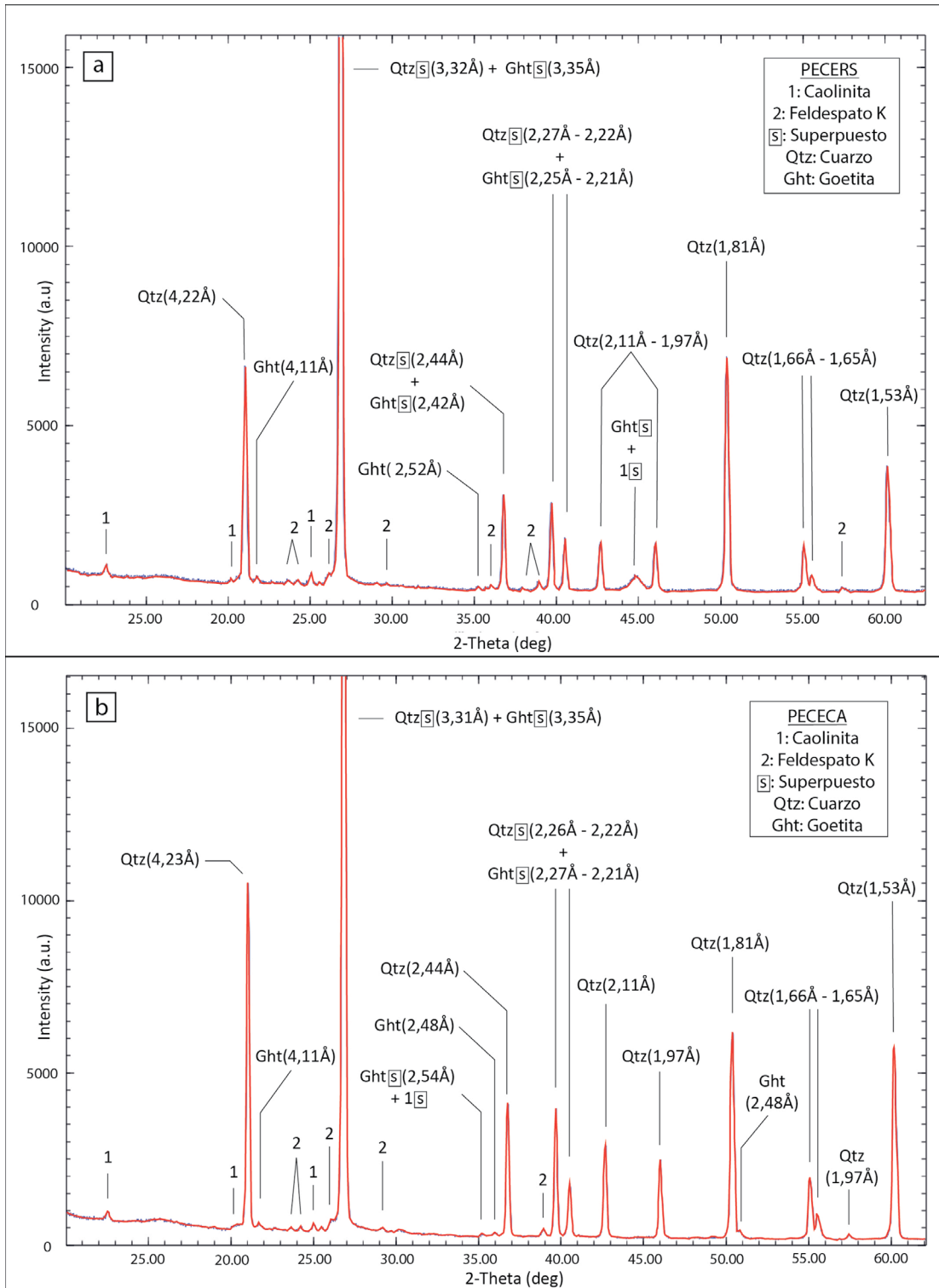


Figura 12 Difractogramas de la muestra de la roca interior friable de interior del cuerpo (PECERS) y la muestra de la costra de meteorización (PECECA), mostrando los ángulos de difracción (2θ) representados en el eje horizontal "X" y las intensidades de difracción (intensidad relativa) representadas en el eje vertical "Y". A) Muestra PECERS de la roca interior friable, donde se identificaron los minerales cuarzo (Qtz), caolinita (1), feldespato potásico (2) y goethita (Ght), mientras que la letra "o" encerrada en un cuadro simboliza la superposición de picos. B) Muestra PECECA de la costra de meteorización, donde se identificaron los minerales cuarzo (Qtz), caolinita (1), feldespato potásico (2) y goethita (Ght), mientras que la letra "o" encerrada en un cuadro simboliza la superposición de picos.

3.32Å; ~36°/ 2.44Å; ~39°/ 2.27Å). Por otro lado, también se observan picos de menores intensidades correspondientes a las fases caolinita (~12°/ 7.07Å; ~20°/ 4.40Å; ~25°/ 3.55Å), feldespato potásico (~23°/ 3.76Å; ~24°/ 3.67Å; ~29°/ 3.01Å; ~36°/ 2.49Å) y goethita (~21°/ 4.11Å; ~26°/ 3.35Å; ~35°/ 2.54Å; ~37°/ 2.42Å).

Se identificaron semicuantitativamente las concentraciones químicas elementales (Al, P, Si, S, K, Ca, Ti, Fe, Cu, Sr, Zr u Ni) del interior rocoso en comparación con la costra (Figura 13). Los resultados muestran variaciones proporcionales positivas y negativas en la costra comparativamente con la roca friable del interior del cuerpo rocoso. Estas concentraciones aumentan de manera positiva y proporcional para

el Al (~1.32), P (~2.16), K (~3.70), Ca (~2.43), Ti (~1.19), Fe (~2.79), Sr (~2.43) y Zr (~2.06). Por otro lado, se registraron variaciones proporcionales negativas en Si (~1.17) y Cu (~1.04), mientras que S y Ni, sólo fueron detectados en la costra.

Microscópicamente, en la muestra de roca sana a la que se denominó PECERS (Piedra equilibrada, cuerpo en equilibrio, roca sana) del interior del cuerpo en equilibrio, se observan cristales de cuarzo redondeados a subredondeados (≥ 2 mm), soportados por clastos con una cementación silícea y muy friable. Se observa además la presencia de óxidos de hierro intersticiales, que no superan el 3 % según la comparación porcentual de minerales opacos (ver imagen A, de la Figura 14). No se observan formaciones nodulares ni otros

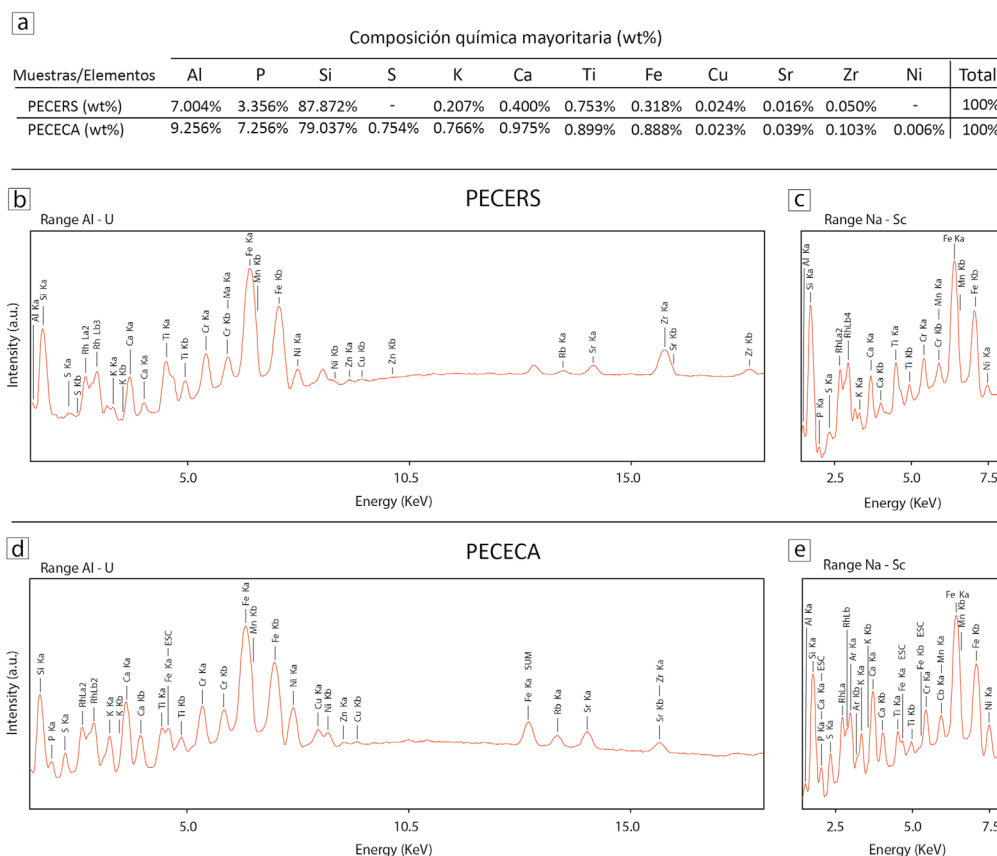


Figura 13 Composición elemental mayoritaria de las muestras de la roca interior friable (PECERS) y de la costra de meteorización (PECECA). A) Tabla de los elementos mayoritarios principales en la muestra de roca interior friable comparada con la muestra de la costra de meteorización, con los datos expresados en porcentaje peso (wt %), mostrando un aumento en los valores de concentración en la costra de meteorización de algunos elementos. B) Espectrogramas de la muestra de la roca interior friable. C) Espectrogramas de la muestra de la costra de meteorización.

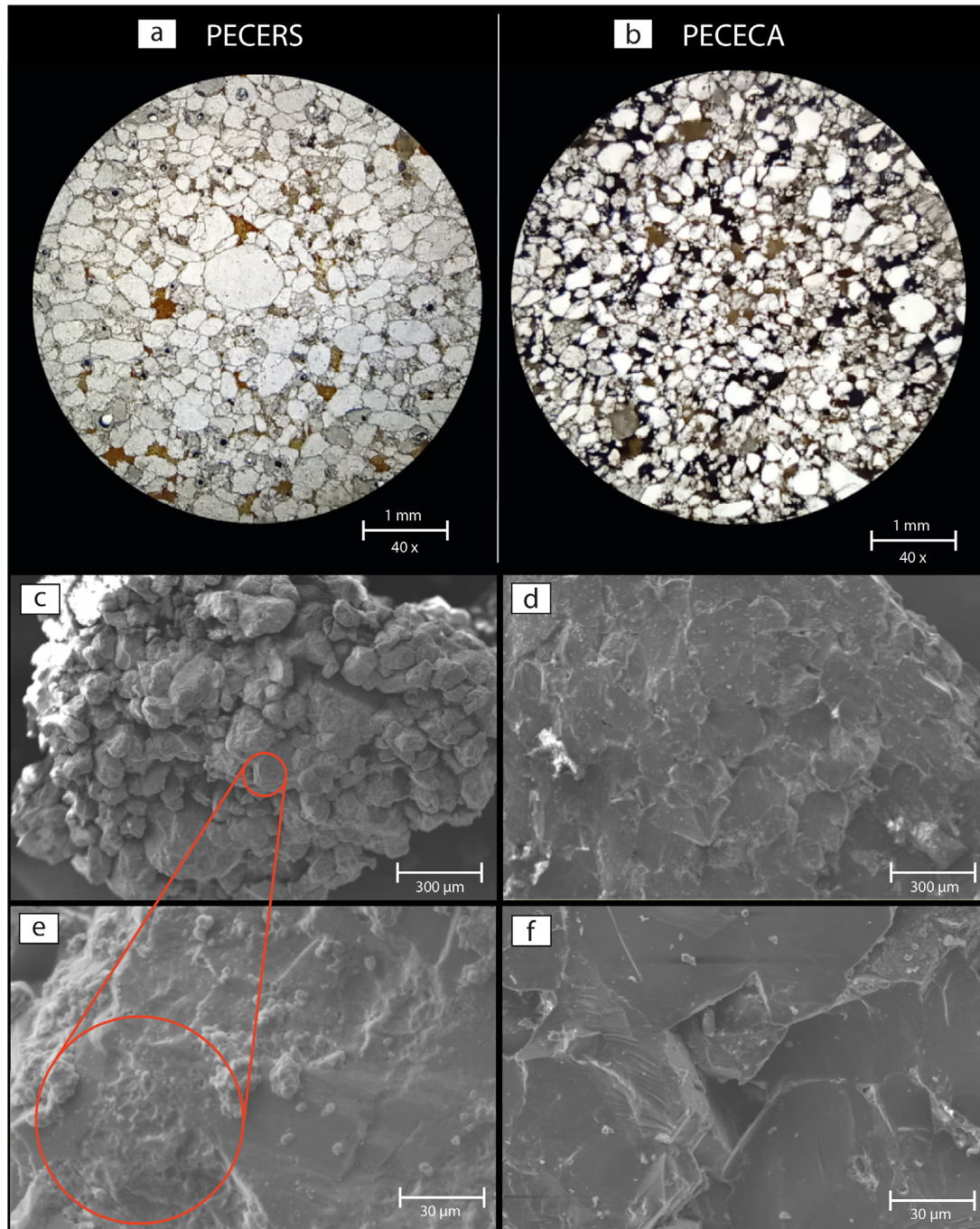


Figura 14 Fotografías e imágenes de las muestras de roca fresca friable (PECERS) y costra de meteorización (PECECA) obtenidas mediante microscopía óptica y SEM. A) Fotografía de la muestra PECERS tomada con un microscopio óptico de polarización a 40x de magnificación, donde se pueden observar cristales de cuarzo predominantemente redondeados a subredondeados, junto con minerales con posibles precipitados de hierro en el intersticio. B) Fotografía de la muestra PECECA tomada con un microscopio óptico de polarización a 40x de magnificación, donde se pueden observar cristales de cuarzo predominantemente redondeados a subredondeados, con una mayor proporción de minerales opacos en los intersticios en comparación con la fotografía "A". C) Imagen obtenida por SEM de la muestra PECERS. Observar la variación en el tamaño de los cristales de cuarzo y su morfología redondeada, además la fractura de la roca no afectó el interior de los detritos. D) Imagen obtenida por SEM de la muestra PECECA. Observar que la fractura del fragmento de roca ocurrió dentro de la estructura cristalina, afectando a todos los detritos, con los intersticios rellenos. E) Imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de la muestra PECERS. Observar las estructuras generadas por ablación química en las caras expuestas de los cristales de cuarzo. F) Imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de la muestra PECECA. Observar que los intersticios parecen estar rellenos, se observan además estructuras concoides resultantes de la fractura de los cristales de cuarzo.

tipos de cristales o precipitados y ocasionalmente se identifican cristales de feldespato potásico (ortoclasa).

En la muestra de la costra endurecida PECECA (Piedra equilibrista, cuerpo en equilibrio, costra de alteración), se observan cristales de cuarzo redondeados a subredondeados (≥ 2 mm), junto con la presencia de óxidos de hierro intersticiales, que varían entre un 10 % y un 15 % (ver imagen B, de la Figura 14). Esto resulta en un aumento de la consolidación de la roca, haciendo que el carácter friable de la roca original sea prácticamente inexistente.

A través de imágenes del MEB, se observó a la roca sana (PECERS) con los detritos enteros y no fragmentados (ver imagen C, de la Figura 14), y en algunos casos se observaron marcas de ablación química en las caras de ciertos detritos de cuarzo (ver imagen E, de la Figura 14), mientras que en la muestra de la costra (PECECA), se observan a los detritos altamente consolidados con poros significativamente reducidos en comparación con la porción friable (ver imagen D, de la Figura 14). Como resultado de la precipitación química, la muestra exhibe un carácter cristalino, lo que hace imposible obtener imágenes de detritos enteros y no fracturados.

5. Discusión

5.1. LA CONVERGENCIA GEOMORFOLÓGICA: PAISAJE PSEUDOGRAÑÍTICO Y SUS GEOFORMAS

La convergencia geomorfológica es un tipo de evolución del paisaje, en el cual se generan geoformas similares luego de que distintos procesos morfogenéticos, en distintos contextos climáticos, actúan sobre un mismo tipo de roca (Phillips 1999; Twidale y Lageat, 1994) o cuando un mismo proceso geomorfológico, actuando sobre distintos tipos de roca produce un paisaje similar (Campbell y Twidale, 1995a, 1995b; Twidale y Vidal Romaní, 2005). También, la convergencia puede ocurrir entre geoformas de orígenes distintos que, debido a la acción de

factores comunes dentro del sistema, desarrollan rasgos morfológicos similares (Gavrilov, 2016).

En el Paraguay oriental Central, además de los paisajes graníticos (Colman *et al.*, 2018, 2019) similares o idénticos a los clásicos descritos por otros autores para localidades extracontinentales con dominio de rocas plutónicas (Twidale 1982; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Twidale y Vidal Romaní, 2005, entre otros), existen numerosos afloramientos de rocas sedimentarias, inclusive volcánicas, cuyos aspectos muestran grandes similitudes con estos paisajes graníticos, lo que estaría constituyendo un ejemplo de convergencia geomorfológica.

Las rocas involucradas son las sedimentitas de la Formación Piribebuy del Ordovícico (Rabassa *et al.*, 2018, 2021; Gadea y Vázquez, 2021; Colman *et al.*, 2022; Gadea *et al.*, 2023), las del Grupo Asunción del Cretácico (Celabe *et al.*, 2023) y las volcanitas de la Formación Alto Paraná del Cretácico (Sarubbi *et al.*, 2024). Sobre las superficies, usualmente aplanadas, de estas rocas no-plutónicas se ha desarrollado una gran cantidad y diversidad de geoformas mayores y menores típicas de los terrenos graníticos, entre las que se destacan *corestones*, *tors*, *tafoni*, *gnammas*, arcos naturales e incluso *bornhardts*.

El origen meteorítico, químico y subsuperficial de estas geoformas se confirma, además, por la presencia de las costras endurecidas y los perfiles lateríticos relictuales, dispersos sobre estas rocas en toda el área de estudio. Este proceso morfogenético se ajusta al modelo denominado “evolución del paisaje en dos etapas” (Twidale, 1980, 1990, 1999, 2002, 2007; Campbell y Twidale 1995b; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Twidale y Vidal Romaní, 2005) que consiste en, el ingreso de agua meteórica por las fracturas de la roca, generando la gradual reducción del tamaño de los bloques por descamación y pérdida de las aristas, favoreciendo el desarrollo del saprolito y del correspondiente perfil de alteración. Posteriormente, modificaciones en el clima o la actividad tectónica, favorecen la erosión del perfil de alteración exponiendo el frente de meteorización con sus geoformas relictuales.

Algunas de estas geoformas convergentes ya fueron mencionadas. Por ejemplo, los *corestones*, *tors*, *gnammas*, rocas pedestales y arcos naturales de las areniscas del Grupo Caacupé (Rabassa *et al.*, 2018, 2021; Gadea y Vázquez, 2021; Colman *et al.*, 2022; Gadea *et al.*, 2023), los *tafoni* y fracturas poligonales de las areniscas del Grupo Asunción (Celabe *et al.*, 2023) y los *corestones* desarrollados sobre las volcanitas de la Formación Alto Paraná del Cretácico (Sarubbi *et al.*, 2024). Otras son reportadas en este trabajo por primera vez y se corresponden con los *tafoni*, *rillenkarrens* y los *bornhardts* de las areniscas de la Formación Piribebuy del Ordovícico del Cerro Arco en la ciudad de Tobatí (Figura 7), las rocas pedestales, honeycombs y las costras endurecidas de las areniscas de la Formación Piribebuy del Cerro Tren (Figura 8), el campo de *corestones* y las geoformas asociadas de las areniscas de la Formación Piribebuy en la ciudad de Emboscada (Figura 9), la roca pedestal, la costra endurecida y las fracturas poligonales de la Piedra Equilibrada de Paso Carreta (Figura 10) y los *corestones*, *tafoni* y fracturas poligonales de las areniscas del Devónico (Figura 11).

Las observaciones y los ejemplos ofrecidos en la literatura respaldan la idea de que los procesos que conducen a la convergencia geomorfológica en el Paraguay central son semejantes a los observados en otros contextos geológicos. De hecho, los ejemplos de los relictos de *etchplain* y las geoformas convergentes asociadas, pueden ser interpretados como un “paisaje pseudogranítico” similar al que identificaron Aguilera *et al.*, (2014, 2017), Martínez y Rabassa (2014a, 2014b) y Martínez *et al.*, (2022) en la República Argentina, en estos casos sobre rocas piroclásticas.

Los ejemplos de geoformas convergentes mencionados en este trabajo, en el oriente paraguayo, se enmarcan en un universo más amplio que involucran, en otras regiones, a los *bornhardts* (Twidale, 1982; Twidale y Vidal Romaní, 2005), cuevas y arcos naturales (Twidale y Centeno, 1993), honeycombs (Bruthans *et al.* 2018), rocas pedestales (Migoñ 2021) y fracturamientos poligonales

(Vanthangliana *et al.* 2020). En Argentina, se han descrito geoformas convergentes en la Formación Cerro Colorado del Mesozoico, en la Reserva Natural y Cultural Cerro Colorado de la Provincia de Córdoba (Boretto *et al.*, 2021, 2024) y los ya mencionados paisaje pseudograníticos en las ignimbritas de Lihuel Calel (Aguilera *et al.*, 2014, 2017), en las ignimbritas de Portezuelo, Pilcaniyeu, Barba Colorada y Chon Aike (Aguilera *et al.*, 2017) y las ignimbritas del Complejo Volcánico Marifil (Martínez y Rabassa, 2014a, 2014b; Martínez *et al.*, 2022).

La convergencia geomorfológica y sus correspondientes geoformas convergentes, como productos de un determinado proceso geomorfológico actuando sobre distintos tipos de materiales geológicos, constituyen un desafío intelectual para la geomorfología clásica que enriquece la interpretación genética de los paisajes. En este sentido, los numerosos y variados ejemplos de estos contextos naturales en el Paraguay central resultan en excelentes oportunidades para la generación de conocimiento científico.

5.2. CORRELACIÓN DE LAS PALEOSUPERFICIES

El reconocimiento e inventariado de los relictos de superficies planares realizado en el marco del presente trabajo y su posterior agrupamiento, ha permitido reconocer cuatro niveles de paleosuperficies distintas, de los cuales tres son interpretadas como superficies grabadas o *etchplains*. Los criterios utilizados fueron: a) la concordancia altitudinal, b) la presencia de geoformas indicadoras de meteorización química profunda (Twidale, 1982, 1987, 2009; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Twidale y Vidal Romaní, 2005, 2004; Thiry, 2005) y c) la presencia de restos de niveles relictuales de alteritas incluyendo niveles de duricostras (Raj, 1985; Twidale, 1987; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Migoñ y Lidmar-Bergström 2002; Ollier y Bourman, 2002; Migoñ, 2013) (Figura 15).

La identificación manual de las superficies planares mediante el análisis de los modelos digitales de elevación, ha permitido determinar

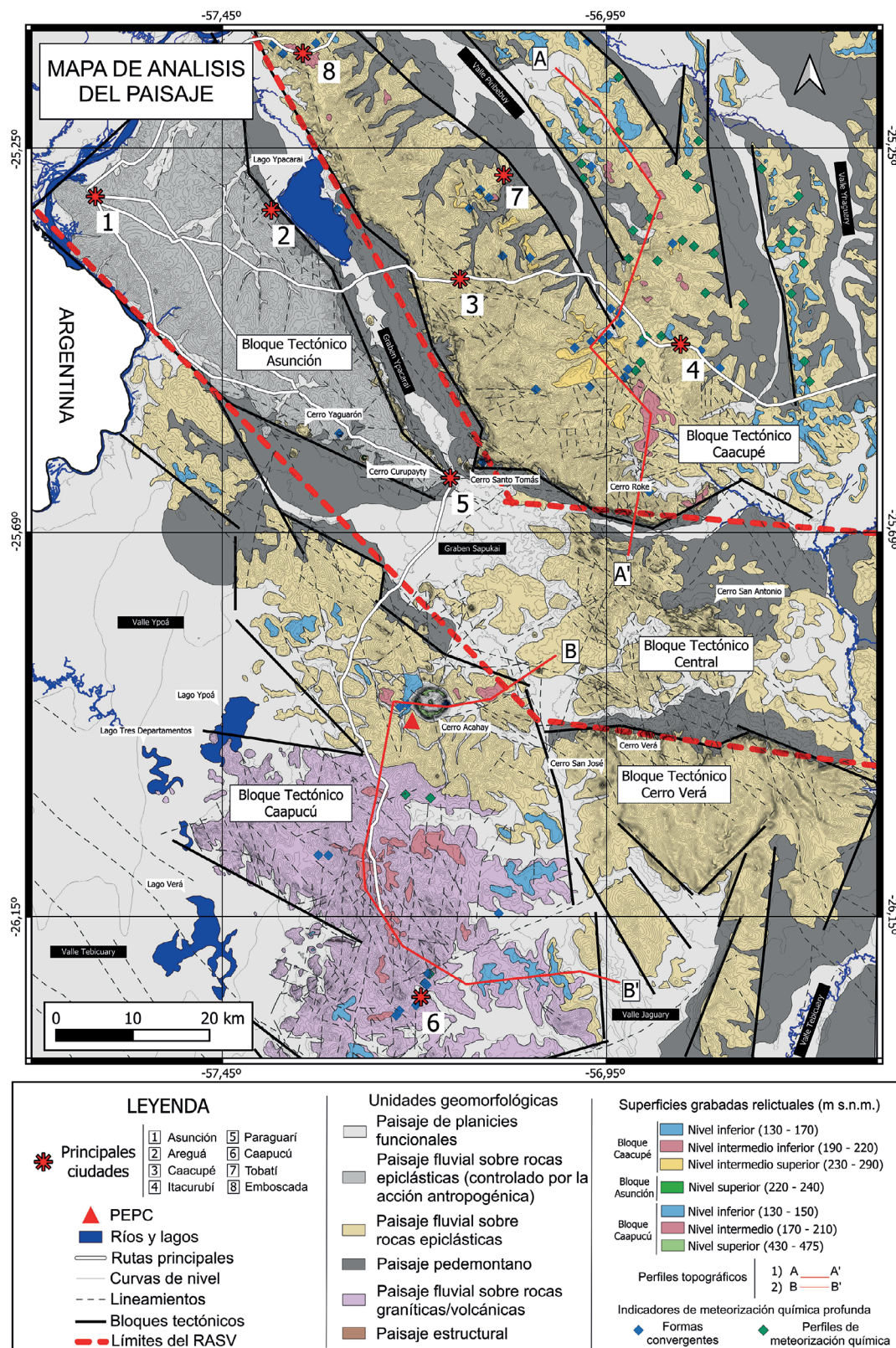


Figura 15 Mapa de análisis e interpretación de paisajes, mostrando los diferentes niveles de las superficies grabadas en relación con los bloques tectónicos y del Rift Asunción-Sapucai-Villarica (ASVR).

la extensión, forma, pendiente y altitud de los remanentes de estas paleosuperficies. Esta metodología ha sido útil y apropiada, aunque conlleva un error significativo para calcular con precisión el último parámetro mencionado. Sin embargo, esto no implicó una limitación para obtener correlaciones altitudinales confiables. Por ejemplo, en el bloque Caapucú (Figura 16), el nivel inferior (130 - 150 m s. n. m.) y el siguiente (170 - 210 m s. n. m.) están separados verticalmente por unos pocos metros mientras que la diferencia altitudinal entre el nivel superior (430 - 475 m s. n. m.) y el inmediatamente inferior (170 - 210 m s. n. m.) es de varias decenas de metros.

Considerando que el desplazamiento vertical entre los cinco bloques tectónicos que componen el área de estudio no ha sido establecido, la mencionada correlación altitudinal se determinó entre niveles de un mismo bloque y agrupó dentro de cuatro categorías: inferior, intermedio inferior, intermedio superior y superior (Tablas 1 y 2), las cuales no deben ser consideradas equivalentes cuando se analizan distintos bloques.

Los *corestones*, *tors* y estructuras de exfoliación, entre otras, son las geoformas típicamente

utilizadas para el reconocimiento de una *etchplain* (Twidale, 1982, 1987, 2009; Twidale y Vidal Romaní, 2005, 2004). También las laderas cóncavas, las superficies con *gnammas*, rocas pedestales (Ollier y Bourman, 2002; Twidale y Vidal Romaní, 2004; Vidal Romaní y Twidale, 1998) inclusive determinados fracturamientos poligonales constituyen evidencia sólida e indiscutible de ese proceso morfogénico de ambiente subsuperficial (Thiry, 2005). Estas son las geoformas que, utilizadas en este trabajo como indicadores, permitieron determinar la génesis de un número importante de los remanentes de superficies planares identificados. Tal es el caso de los *tafoni* y las fracturas poligonales sobre las areniscas del Grupo Asunción del Cretácico superior (Celabe *et al.*, 2023) que, en el bloque Asunción, confirman que el nivel superior se corresponde con una *etchplain*.

Los relictos de perfiles de meteorización y las duricostras asociadas a ellos, constituyen otros de los elementos característicos de las *etchplains* y el hecho de que no existan homólogos activos en la actualidad indica que su origen se remite, a las condiciones ambientales, cálidas y húmedas,

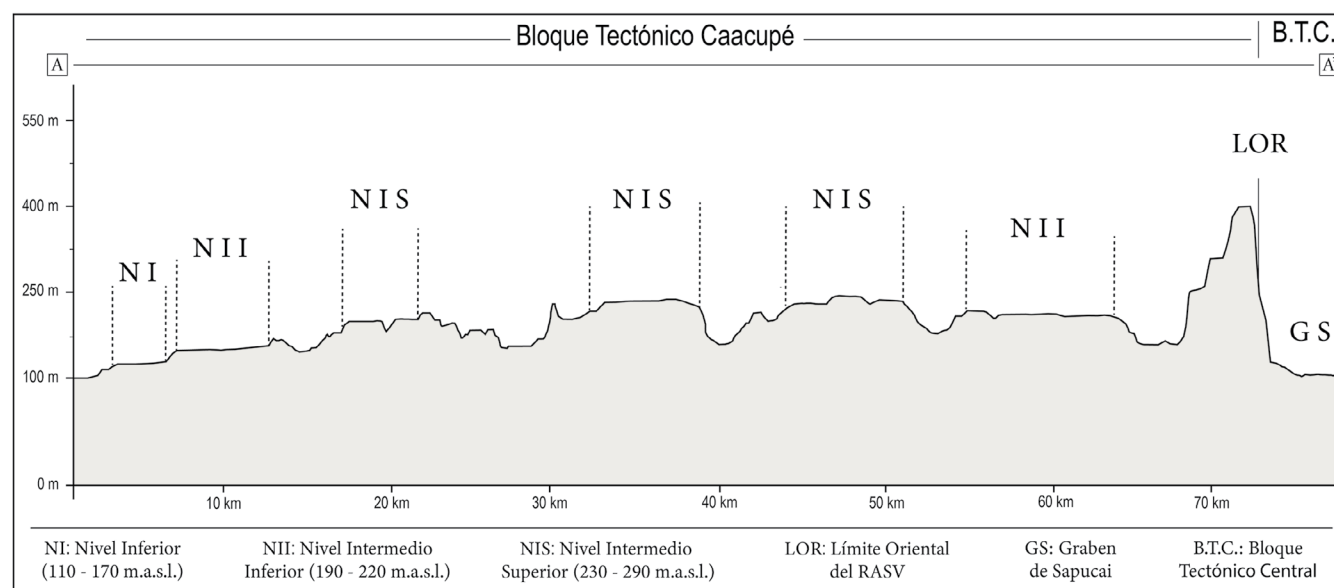


Figura 16 Perfil topográfico A - A', mostrando las relaciones altitudinales entre las superficies grabadas relictuales en el bloque de Caapucú.

del Mesozoico y el Paleógeno (Migoñ y Lidmar-Bergström 2002; Migoñ, 2013, entre otros). De manera independiente o asociados a las geoformas indicadoras ya mencionadas, los niveles de estas alteritas han permitido también determinar el origen meteórico de varias de las paleosuperficies.

Los tres niveles inferiores del bloque Caacupé son interpretados en este trabajo como restos de *etchplains* (Figura 15). En los niveles inferior e intermedio inferior se concentra la gran mayoría de los perfiles lateríticos relictuales individualizados mientras que el nivel intermedio superior (230 - 290 m s. n. m.), presenta una variedad importante de geoformas indicadoras, tanto mayores como menores.

En el bloque Caapucú se identificaron tres niveles de superficies de planación, interpretados como restos de *etchplains*. En todos los casos se identificaron una gran cantidad de geoformas relictuales y restos de perfiles lateríticos relictuales, caolíníticos.

Ninguno de los cuatro niveles que se han cartografiado en el bloque Cerro Vera ha sido, a criterio de los autores, lo suficientemente relevado en el campo y esta puede ser una de las razones por la cual no se han identificado aún ni geoformas ni restos de alteritas que indiquen un

origen meteórico para dichas paleosuperficies, por lo cual, los cuatro niveles son interpretados como superficies de planación en sentido amplio.

La correlación altitudinal de los niveles identificados y su interpretación genética a partir de la presencia o no de indicadores geológicos debe considerarse confiable. Por otro lado, debería evitarse cualquier correlación entre los niveles de bloques tectónicos distintos, considerando el escaso conocimiento que existe sobre el comportamiento dinámico de estas grandes unidades de roca, por lo menos para el lapso aquí considerado.

5.3. SOBRE LA EDAD DE LA METEORIZACIÓN QUÍMICA PROFUNDA EN EL PARAGUAY CENTRAL

No ha sido objetivo de este trabajo establecer la cronoestratigrafía de los niveles de planación reconocidos en el área de estudio. Sin embargo, la correlación altitudinal obtenida y la correspondiente identificación de elementos indicadores de meteorización subsuperficial, en cada uno de los bloques tectónicos estudiados, permiten proponer, de manera tentativa y preliminar, un ordenamiento temporal, al menos para las superficies interpretadas como *etchplains*.

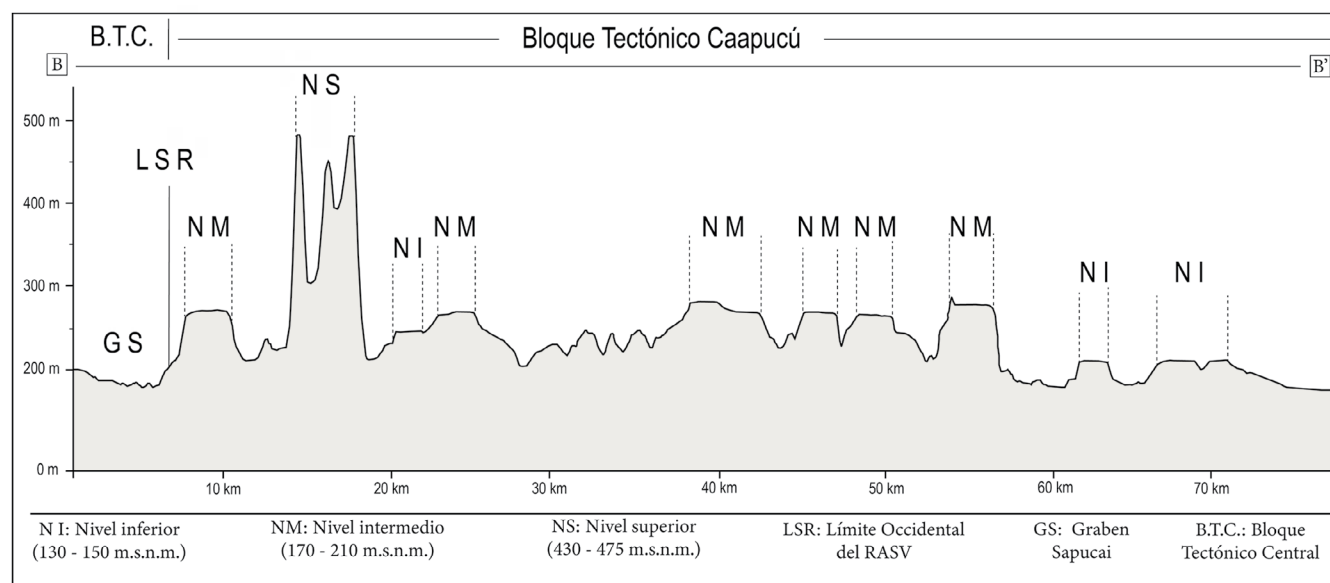


Figura 17 Perfil topográfico B - B', mostrando las relaciones altitudinales entre las superficies grabadas relictuales en el bloque de Caapucú.

Para ello se ha tomado como referencia la premisa, en un primer análisis y de la misma manera que para las terrazas fluviales, que el nivel superior es anterior, más antiguo, que el inmediatamente inferior (Howard *et al.*, 1968). Esto implicaría que en el área de estudio se sucedieron al menos tres episodios o eventos de intensa y/o prolongada meteorización química bajo condiciones de alta temperatura y humedad. Si este fuera el caso, la edad Aptiano/Hauteriviano asignada al intrusivo del Cerro Acahay (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1990; Gomes *et al.*, 1991; Green *et al.*, 1991; Velázquez *et al.*, 1992, 1996) es la edad máxima para el evento o el lapso durante el cual se generó el perfil de meteorización y las geoformas indicadoras de la *etchplain* del nivel superior (entre 430 y 475 m s. n. m., Tabla 2). Siendo más jóvenes, probablemente del paleógeno los otros dos niveles, el nivel inferior (30-150 m s. n. m.) y el nivel intermedio (170 - 210 m s. n. m.) del bloque Caapucú, al igual que la exhumación del frente de meteorización.

Si, por otro lado, el desarrollo de los perfiles de meteorización química profunda de la región, se debiera a la instalación de las citadas condiciones hipertropicales, durante un único lapso de relativa tranquilidad tectónica, los niveles con indicadores de meteorización química aquí determinados, formarían parte de una única e irregular *etchplain*, cuyo escalonado relieve se debería, quizás, a la influencia de la estructura e inhomogeneidades de las rocas sedimentarias afectadas.

En cualquier caso, sea uno o varios los lapsos generadores de niveles profundos de perfiles de meteorización, los mismos tienden a coincidir con un momento de la historia de la Tierra (desde el Cretácico inferior alto al Paleógeno) que se distingue por condiciones ambientales extremas, sin equivalentes en la actualidad (Ollier, 1992, 2014; Barron *et al.*, 1993; Tajika, 1999; Carvalho, 2010; Brea y Zucol, 2011; Rabassa *et al.*, 2010; Rabassa, 2014). Condiciones similares se proponen para el interior continental en la Cuenca del Paraná Occidental, donde se localiza el Paraguay oriental y nuestra área de estudio, para el mismo

lapso, cuando el clima experimentó cambios muy significativos, pasando de cálido y húmedo al final del Cretácico, a semiárido y estacional durante el Paleoceno (Tófolo y Pazos, 2010; Tcacenco-Manzano *et al.*, 2024).

5.4. LAS DURICOSTRAS

El término duricostra se utiliza para designar, de forma general, a una costra endurecida que se presenta en capas cerca de la superficie terrestre y que se clasifica según el agente cementante dominante (calcretas, silcretas, alcretas, ferricretas y gipcretas) (Lamplugh, 1902; Mottershead y Pye, 1994; Dorn, 2004; Nash y McLaren, 2007). Se originan por induración asociada a aguas meteóricas que generan la precipitación de compuestos químicos intersticiales y la reducción de la porosidad de la roca. No presentan equivalentes modernos y se asocian a largos periodos de estabilidad en el paisaje (Mottershead y Pye, 1994; Dorn, 2004; Nash y McLaren, 2007).

En el área de estudio se han identificado duricostras de composición férrica o ferricretas en sedimentitas de distintas edades. Sobre las ordovícicas del Grupo Caacupé, sobre las silúricas del Grupo Itacurubí, sobre las devónicas de la Formación Arroyos y Esteros y sobre la Formación Coronel Oviedo del Carbonífero superior. Más allá de su significado genético, estas duricostras, por su alta resistencia relativa a la erosión, tienen un rol relevante en el modelado del paisaje.

Muchas de las geoformas relictuales indicadoras, tanto menores, como los *corestones*, *boulders* y *tors* y mayores, como los *bornhardts*, expuestas desde hace millones de años, deben su buen estado de conservación a la presencia de estas duricostras. Con el objetivo de aportar mayor información sobre estos característicos niveles de alteración, se presentan algunos resultados analíticos para una localidad geológica y turísticamente emblemática de la región, la Piedra Equilibrada de Paso Carreta. Los resultados mineralógicos y químicos muestran un notable contraste entre el interior de la roca y la costra endurecida externa. Mientras que en ambas porciones es evidente el predominio

de fases cristalinas de cuarzo y goethita, el enriquecimiento relativo de elementos como el Al, K, Ca, Ti, Fe, Sr y Zr en la costra, indica que esta última, actuó como una zona de precipitación. La presencia de fases minerales de goethita responde a entornos supergénicos de precipitación de hierro, siendo la goethita junto con la hematita los minerales característicos (Alexandrowicz y Pawlikowski, 1982; Alexandrowicz *et al.*, 2014). El proceso de precipitación probablemente se generó sobre los planos de fractura preexistentes, similar

al sistema ortogonal descrito para los terrenos graníticos. La combinación de la friabilidad y permeabilidad de la roca pudo haber favorecido las condiciones necesarias para una cristalización más eficiente, reduciendo la permeabilidad hacia el interior del cuerpo rocoso. La microscopía óptica y electrónica refuerzan esta interpretación debido a que, en el interior del cuerpo, los detritos de cuarzo aparecen apenas cementados (ver imágenes C y D, de la Figura 14). En cambio, en la costra endurecida, el incremento de opacos intersticiales

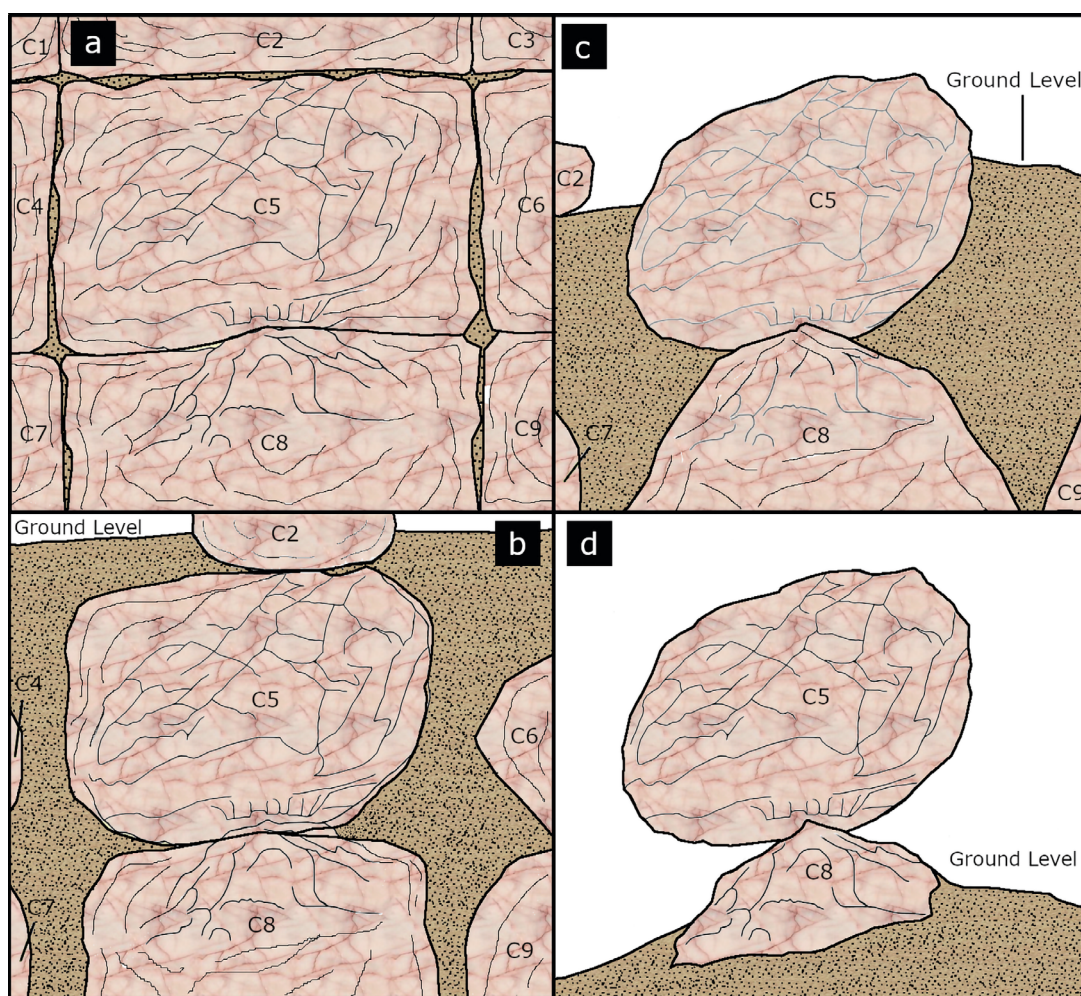


Figura 18 Esquema evolutivo propuesto para la Piedra Equilibrada de Paso Carreta, geoformas relictuales desarrolladas a debido a la meteorización química profunda y asociado con la “evolución del paisaje en largos periodos de tiempo geológico” y a la evolución del paisaje en dos etapas”. A) Disposición original subsuperficial del bloque que formaría la Piedra Equilibrada, limitado tectónicamente por fracturas. B) Luego de la progresión del proceso de meteorización química profunda en la roca, los bloques pierden sus bordes y tamaños originales, rodeados por roca ya meteorizada. C) Disposición de la Piedra Equilibrada en la subsuperficie con la morfología final impresa, pero sin conferir el estado de precariedad debido a la exhumación incompleta. D) Disposición final de la Piedra Equilibrada con la precariedad adquirida después de su completa exhumación, formando una PBR.

es muy notable, reduciendo significativamente la porosidad y aumentando su resistencia (ver imágenes A y B, de la Figura 14). Esta característica evidencia que el proceso de cementación fue por ferritización y no por silicificación, como lo interpretan Dionisi *et al.*, (1999), Gadea y Vázquez, (2021); Celabe *et al.*, (2023); Gadea *et al.*, (2023). La costra endurecida adquiere relevancia en la conservación de la Piedra Equilibrada de Paso Carreta, debido a que el interior del cuerpo rocoso presenta baja cementación, lo que explica su carácter friable y su fragilidad frente a los agentes erosivos. La presencia de la duricostra puede explicar su supervivencia prolongada, incluso después de su completa exhumación. Esta interpretación genética parece ser válida para las geoformas de la Formación Piribebuy del Grupo Caacupé, aunque no debería descartarse que un proceso de alteración y cementación similar se haya dado en las otras unidades sedimentarias del área. Sin embargo, el entorno sedimentario de la Formación Piribebuy no estaría justificando, por sí solo, la abundante disponibilidad de hierro dentro del sistema. Por ello se evalúa como posible que sea el entorno del Cerro Acahay, muy próximo a la Piedra Equilibrada de Paso Carreta (Figura 1), el aportante de estas soluciones férricas. La meteorización química profunda de las plutonitas/volcanitas de ese cuerpo intrusivo podría haber generado aguas meteóricas ricas en hierro que, luego de la lixiviación, migran lateralmente, hasta las inmediaciones de PEPC.

Un aspecto que resulta interesante considerar es que el efecto geomorfológico sobre los afloramientos de arenisca que introducen las duricostras en la PEPC constituye un ejemplo inverso a los ejemplos previstos para la evolución de los paisajes producto de la meteorización subsuperficial (Ollier, 1971; Vidal Romaní y Twidale, 1998; Twidale y Vidal Romaní, 2005), en los cuales el material rocoso más deleznable se ubica en las porciones más externas de las geoformas, mientras que la roca sana o inalterada y, por lo tanto, más resistente, se ubica en los interiores de las geoformas.

6. Conclusión

Se ha elaborado un mapa geomorfológico, a escala regional, que constituye la primera contribución sobre esta temática para el Paraguay central. La gran mayoría de la superficie relevada se corresponde con paisajes de origen fluvial, de ambiente tanto pedemontano como encausado, funcionales y no-funcionales. También se identificaron abundantes sectores de paisaje estructural, controlado por la estratificación horizontal o subhorizontal del sustrato sedimentario, predominante en la región. Cuando la escala de trabajo lo ha permitido, se han indicado estructuras y geoformas endógenas como algunas intrusiones ígneas. Sin embargo, una de las geoformas más característica del área relevada son los relictos de superficies de planación. Estos numerosos sectores horizontales se distribuyen de manera escalonada, a diferentes alturas, dentro de los distintos bloques tectónicos que componen la región, afectando distintos tipos de litologías. Sobre muchos de estos remanentes de auténticas paleosuperficies se observan las características geoformas indicadoras de meteorización química profunda las que, junto con los restos de perfiles de meteorización, permiten interpretarlas como superficies grabadas o *etchplains*.

El o los eventos de meteorización química profunda intensa que originaron estas geoformas se habrían iniciado con posterioridad al Cretácico inferior alto finalizando, aparentemente, durante el Paleógeno. Esto coincide con las interpretaciones paleoclimáticas de otros autores para esta y otras regiones del mundo. Vinculado a estos procesos, se destacan en la región, especialmente en los afloramientos de rocas detríticas, niveles de costras endurecidas de hierro que han influido significativamente en la evolución geomorfológica del paisaje.

La información generada en el marco de este trabajo confirma la importancia morfogenética que los procesos de meteorización química profunda y la posterior exhumación de los correspondientes frentes de meteorización han tenido en el Paraguay central y también exponen la necesidad de avanzar con estudios más profundos y detallados en otras áreas del Paraguay oriental, sobre estos singulares paisajes gondwánicos.

Contribuciones de los autores

(1) Conceptualización: CFC, OAM, FSBL, JR, EYA; (2) Análisis o adquisición de datos: CFC, EZH, YSJ, MMM, CS; (3) Desarrollo metodológico/técnico: CFC, OAM, YSJ, NC, EZH, MMM, CS; (4) Redacción del manuscrito original: CFC, OAM; (5) Redacción de manuscrito corregido y editado: CFC, OAM, FSBL, JR, YSJ, EYA, NC, MMM, EZ; (6) Diseño gráfico: CFC; (7) Trabajo de Campo: CFC, YSJ, NC, EYA, OAM, FSBL; (8) Interpretación: CFC, OAM, JR, FSBL, EYA.

Financiamiento

A los proyectos de investigación PINV01-111 (“Geomorfología en Areniscas: Desarrollo de Perfiles de Alteración y el Potencial de las Geoformas como Atractivos Geoturísticos, 2024-2026”), PINV18-16 (“Mapa Geológico de la República del Paraguay. Hoja 5570 ITACURUBÍ DE LA CORDILLERA, 2020-2021”), y PINV15-766 (“Paisajes Gondwánicos del Paraguay Oriental, 2017-2019”), financiados por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) y la FACEN (Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción), a través del FEEI (Fondo para la Excelencia de la Educación y la Investigación).

Agradecimientos

Agradecemos a la Ing. Andrea Maldonado y al MSc. Pablo Cassanova por las mediciones por FTIR y SEM realizadas en el Laboratorio de Biomateriales de la Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción. Se agradece al Lic. Derlis Vera, Lic. Federico Argüello, Lic. Noelia Benítez, Lic. Yamila Bogarín, MSc. Néstor Salinas, Lic. Sofía Argüello, Lic. Giovanni Zucchini, Tec. Ricardo Souberlich, Sr. Hilario Ramoa, Sr. Tobías Núñez y Sr. Sebastián Morán por su asistencia en el campo y a la Sra. Herminia

Giménez del establecimiento Paso Carreta, por otorgar los permisos para el acceso al área de trabajo. Se agradece a los revisores y editores pues sus observaciones han permitido mejorar sustancialmente el trabajo original.

Conflicto de intereses

Los autores de este trabajo no tienen conflictos de interés respecto a la información proporcionada en este manuscrito.

Editor a cargo

Xxxx Xxxx.

Referencias

- Aguilera, E.Y., Hernando, I., Rabassa, J., 2017, Landscapes Developed on Ignimbrites, en Rabassa, J. (eds.), *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina: Cham, Springer Earth System Sciences*, 1–48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54371-0_1
- Aguilera, E.Y., Sato, A.M., Llambías, E., Tickyj, H., 2014, Erosion Surface and Granitic Morphology in the Sierra de Lihuel Calel, Province of La Pampa, Argentina, in Rabassa, J., Ollier, C.D. (eds.), *Gondwana Landscapes in southern South America: Argentina, Uruguay and southern Brazil, Springer Earth System Sciences*, 393–422. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7702-6_14
- Alexandrowicz, Z., Marszałek, M., Rzepa, G., 2014, Distribution of secondary minerals in crusts developed on sandstone exposures: *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 320–335. <https://doi.org/10.1002/esp.3449>
- Alexandrowicz, Z., Pawlikowski, M., 1982, Mineral crusts of the surface weathering zone of sandstone *tors* in the Polish Carpathians: *Mineralogica Polonica*, 13(2), 41–60.

- Almeida, R.P., Riccomini, C., Janikian, L., Frago-Cesar, A.R.S., Velázquez, V., 2004, Litoestratigrafia, sistemas deposicionais e icnofósseis do Grupo Caacupé, (Ordoviciano da Bacia do Paraná) na Cordilheira de Los Altos, Paraguai Oriental: *Revista Brasileira de Geociências*, 34(3), 431–442.
- Álvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.D.M., Sparovek, G., 2013, Köppen's climate classification map for Brazil: *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Barron, E.J., Fawcett, P.J., Pollard, D., Thompson, S., 1993, Model simulations of Cretaceous climates: the role of geography and carbon dioxide: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 341(1297), 307–316. <https://doi.org/10.1098/rstb.1993.0116>
- Beder, R., Windhausen, A., 1918, Sobre la presencia del Devónico en la parte media de la República del Paraguay: *Boletín de la Asociación Nacional de Ciencia*, 225–262.
- Benedetto, J.L., Halpern, K., Galeano-Inchausti, J.C., 2013, High-latitude Hirnantian (latest Ordovician) Brachiopods from the Eusebio Ayala Formation of Paraguay, Paraná Basin: *Palaeontology*, 56(1), 61–78. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2012.01158.x>
- Bigarella, J.J., Comte, D., 1969, O Grupo Caacupé e sua importância na paleogeografia do Siluriano Sul-americano: *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 18, 31–37.
- Bitschene, P.R., Báez-Presser, J.L., 1989, The Asunción Alkaline Province (Eastern Paraguay): Geologic Setting and Petrogenetic Aspects: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, (5/6), 959–971.
- Boretto, G.M., Cioccale, M., Carignano, C., Gordillo, S., Recalde, A., Tissera, L., 2021, Sandstone Geomorphology: Cerro Colorado, Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina, in Bouza, P., Rabassa, J., Bilmes, A. (eds.), *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina*: Cham, Springer Earth System Sciences, , 30–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66161-8_2
- Boretto, G.M., Cioccale, M., Gordillo, S., Carignano, C., Recalde, A., 2024, The Geomorphodiversity of Cerro Colorado (Córdoba, Argentina): A Key Factor in Geo-Cultural Heritage Assessment: *Geoheritage*, 16(2), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s12371-024-00963-9>
- Büdel, J., 1969, Das system der klima-genetischen geomorphologie (The system of climatic-genetic geomorphology): *Erdkunde*, 23(3), 165–183.
- Brea, M., Zucol, A.F., 2011, The Paraná-Paraguay basin: Geology and paleoenvironments, in James A. (ed.), *Historical biogeography of Neotropical freshwater fishes*: Oakland, California, University of California Press, 69–88. <https://doi.org/10.1525/california/9780520268685.003.0004>
- Bruthans, J., Filippi, M., Slavík, M., Svobodová, E., 2018, Origin of honeycombs: Testing the hydraulic and case hardening hypotheses: *Geomorphology*, 303, 68–83. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.11.013>
- Carvalho, I.S., Gasparini, Z.B., Salgado, L., Vasconcellos, F.M., Da Silva Marinho, T., 2010, Climate's role in the distribution of the Cretaceous terrestrial Crocodyliformes throughout Gondwana: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297(2), 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.08.003>
- Campbell, E.M., Twidale, C.R., 1995a, Lithologic and climatic convergence in granite morphology: Xeolítico de Laxe, Caderno do Laboratorio, 20, 381–403.
- Campbell, E.M., Twidale, C.R., 1995b, The various origins of minor granite landforms: Xeolítico de Laxe, Caderno do Laboratorio, 20, 281–306.
- Celabe, R.M., Gadea, M.A., Salinas, N.D., 2023, Un acercamiento a la geología del Cerro Yaguarón: *Revista de la Sociedad Científica*

- del Paraguay, 28(1), 30–40. <https://doi.org/10.32480/rscp.2023.28.1.30>
- Colman, C.F., Sarubbi, Jacks, Y., Souberlich, R., Vera, D., Bogarín, Y.R., Salinas, N., Martínez, O., Rabassa, J., 2018, Caapucú: Una ciudad construida sobre un campo de núcleos de roca (*corestones*) en el Paraguay oriental, en VII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología: Puerto Madryn, Argentina.
- Colman, C.F., Sarubbi-Jacks, Y., Martínez, O., Souberlich, R., Rabassa, J., 2019, Los Granitos de Yaguareté Cua: Una geomorfología singular como recurso geoturístico en el Paraguay oriental, en V Simposio Brasileiro de Patrimônio Geológico: Crato, Brasil.
- Colman, C.F., Sarubbi-Jacks, Y., Martínez, O., Cubas, N., Aguilera, Y.E., Carignano, C., Rabassa, J., 2022, Inventario de localidades con evidencias de paleosuperficies en Paraguay. en VIII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología: San Juan, Argentina.
- Colman, C.F., Martínez, O., Sarubbi-Jacks, Y., Cubas, N., 2024, La Piedra Equilibrada de Paso Carreta: Un *Corestones* indicador de la paleosismicidad en el Paraguay oriental, en XXII Congreso Geológico Argentino: San Luis, Argentina.
- Colman, C.F., Martínez, O., Ladeira, F., Block, D., Cubas, N., Sarubbi, Y., Ayala, H., Matos, A., Herrera, E., 2025, Perfiles Lateríticos Relictuales en el Paraguay central: Resultados Preliminares. en XX Congreso Geológico Colombiano: Cali, Colombia.
- Comin-Chiaromonti, P., Cundari, A., De Min, A., Gomes, C.B., Piccirillo, E.M., 1996, Potassic magmatism from Central-Eastern Paraguay: Petrogenesis and Geodynamic Inferences, in Comin-Chiaromonti, P., Gomes, C.B. (eds.), Alkaline magmatism in Central-Eastern Paraguay: Relationships with Coeval Magmatism in Brazil: São Paulo, Brazil, Edusp/Fapesp, 454 p.
- Comin-Chiaromonti, P., Gomes, C.B., Piccirillo, E.M., Bellieni, G., Castilho, A.M.C., Demarchi, G., Gallo, P., Velazquez, J.C., 1990, Petrologia do maciço alcalino de Acahay Paraguai Oriental: Revista Brasileira de Geociências, 20(1-4), 133–152. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1990133152>
- Comin-Chiaromonti, P., Marzoli, A., Barros, C., Milan, A., Riccomini, C., Velázquez, V.F., Mantovani, M.M., Renne, P., Tassinari, C.C.G., Vasconcelos, P.M., 2007, The origin of post-Paleozoic magmatism in eastern Paraguay: Geological Society of America Special Papers, 430, 603–633. [https://doi.org/10.1130/2007.2430\(29\)](https://doi.org/10.1130/2007.2430(29))
- Comin-Chiaromonti, P., De Min, A., Cundari, A., Girardi, V.A.V., Ernesto, M., Gomes, C.B., Riccomini, C., 2013, Magmatism in the Asunción-Sapucaí-Villarrica Graben (Eastern Paraguay) Revisited: Petrological, Geophysical, Geochemical, and Geodynamic Inferences: Journal of Geological Research, 1–22. <https://doi.org/10.1155/2013/590835>
- Cubas, N., Garcete, A., Meinhold, K.D., Benítez, J.C., Figueredo, L., González, M.E., Burgaht, K.P., Höndorf, A., 1998, Mapa Geológico de la República del Paraguay, Hoja Villa Florida 5468, escala 1: 100,000: Asunción, Paraguay, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Viceministerio de Minas y Energía, Dirección de Recursos Minerales de Paraguay, 1 mapa con texto explicativo, 75 p.
- Chesworth, W., 2008, Encyclopedia of soil science: Dordrecht, The Netherlands, University of Guelph, Springer Science & Business Media, 902 p.
- Degraff, J., Orue, D., Franco, R., 1981, Interpretación Geofísica y Geológica del Valle de Ypacaraí (Paraguay) y su formación: Revista de la Asociación Geológica Argentina, 37(3), 240–256.
- Dionisi, A., Cubas, N., González, M.E., Figueredo, L., 1999, Mapa Geológico de la República del Paraguay, Hoja Caacupé 5470, escala 1:100,000: Asunción,

- Paraguay, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Viceministerio de Minas y Energía, Dirección de Recursos Minerales de Paraguay, 1 mapa con texto explicativo, 30 p.
- Dorn, R.I., 2004, Case hardening, in Goudie, A.S. (ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*: London, Routledge, 1156 p.
- Eckel, E.B., 1959, *Geology and mineral resources of Paraguay - A reconnaissance, with sections on Igneous and metamorphic rocks and soils*: USA, United States Geological Survey, Professional Paper, 327 p.
- Eswaran, H., Bin, W.C., 1978, A study of a deep weathering profile on granite in peninsular Malaysia: I. Physico-chemical and micromorphological properties: *Soil Science Society of America Journal*, 42(1), 144–149. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200010032x>
- Gadea, M., Vázquez, C., 2021, El Cerro Tren: Piedras Caballeras en areniscas del Paleozoico inferior en Eusebio Ayala, Departamento de Cordillera, Paraguay: *Historia Natural*, 11(3), 5–11.
- Gadea, M., Caballero, A., Fugarazzo, R., Ayala, H., Ortega, E., Godoy, A., 2023, Arco Natural en la Zona de Tobati, departamento de Cordillera-Paraguay: *Acta Geológica Lilloana*, 34(2), 153–171. <https://doi.org/10.30550/j.agl/2023.34.2/1835>
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J., 2009, Present-day south american climate: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 281(3–4), 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Gavrilov, A.A., 2016, On the nature of geomorphological convergence and homology phenomena: *Vestnik of Moscow, University, Series 5, Geography*, 4, 3–12.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Day, J.A., 2006, Timescales and mechanisms of plume–lithosphere interactions: *40Ar/39Ar geochronology and geochemistry of alkaline igneous rocks from the Paraná–Etendeka large igneous province*: *Earth and Planetary Science Letters*, 251(1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.08.004>
- Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., Min, A., Melfi, A.J., Bellieni, G., Ernesto, M., Castillo, A.M., Velazquez, J.C., Piccirillo, E.M., 1991, Petrologia del macizo alcalino de Acahay Paraguay oriental: *Revista Brasileira de Geociências*, 20, 133–152. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1990133152>
- Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., Velázquez, V., 2013, A synthesis on the alkaline magmatism of Eastern Paraguay: *Brazilian Journal of Geology*, 43(4), 745–761. <https://doi.org/10.5327/Z2317-488920130004000012>
- González, M.E., Bartel, W., Lahner, L., Wiens, F., 1998a, Mapa Geológico de la República del Paraguay, Hoja Paraguari 5469, escala 1:100 000: Asunción, Paraguay, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Viceministerio de Minas y Energía, Dirección de Recursos Minerales de Paraguay, 1 mapa con texto explicativo, 72 p.
- González, M.E., Lahner, L., Muff, R., Wiens, F., 1998b, Mapa Geológico de la República del Paraguay, Hoja San José 5569, escala 1:100 000: Asunción, Paraguay, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Viceministerio de Minas y Energía, Dirección de Recursos Minerales de Paraguay, 1 mapa con texto explicativo, 72 p.
- González, M.E., Lahner, L., Cubas, N., Dionisi, A., 1999, Mapa Geológico de la República del Paraguay, Hoja Coronel Oviedo 5670, escala 1:100,000: Asunción Paraguay, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Viceministerio de Minas y Energía, Dirección de Recursos Minerales de Paraguay, 1 mapa con texto explicativo, 30 p.
- Green, P.F., Duddy, I.R., Sullivan, P.O., Hegarty, K.A., Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., 1991, Mesozoic potassic magmatism from

- the Asunción-Sapucaí graben (Paraguay): apatite fission track analysis of the Acahay suite and implications for hydrocarbon exploration: *Geochimica Brasiliensis*, 5, 79–87.
- Harrington, H.J., 1950, *Geología del Paraguay oriental*: Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Contribuciones Científicas, Serie E, Geología 1, 88 p.
- Harrington, H.J., 1956, Paraguay, in *Handbook of South American Geology*: Geological Society of America, 65, 99–114.
- Harrington, H.J., 1972, Silurian of Paraguay, in Berry, W.B.N., Boucot, A.J. (eds.), *Correlation of the South American Silurian Rocks*: Geological Society of America, 41–50.
- Hawkesworth, C.J., Gallagher, K., Kelley, S., Mantovani, M., Peate, D.W., Regelous, M., Rogers, N.W., 1992, Paraná magmatism and the opening of the South Atlantic: *Geological Society, London, Special Publications*, 68, 221–240. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.068.01.14>
- Hesselbo, S.P., Robinson, S.A., Surlyk, F., Piasecki, S., 2002, Terrestrial and marine extinction at the Triassic-Jurassic boundary synchronized with major carbon-cycle perturbation: A link to initiation of massive volcanism?: *Geology*, 30(3), 251–254. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0251:tameat>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0251:tameat>2.0.co;2)
- Horel, J.D., Hahmann, A.N., Geisler, J.E., 1989, An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas: *Journal of Climate*, 2(11), 1388–1403. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<1388:aiotac>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<1388:aiotac>2.0.co;2)
- Howard, A.D., Fairbridge, R.W., Quinn, J.H., 1968, Terraces fluvial - introduction, in Fairbridge, R.W. (ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*: Springer, 1295 p.
- Iriondo, M., Brunetto, E. 2016, Cuaternario de Brasil, Paraguay y Uruguay: Corrientes, Argentina, Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino, 493 p.
- Kanzler, A., 1987, The southern Precambrian in Paraguay. Geological inventory and age relations: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 7/8, 753–765.
- King, L.C., 1968, Gondwana Landscape, en Fairbridge, R.W. (ed.), *Encyclopedia of geomorphology*: Reinhold, New York.
- Lamplugh, G.W., 1902, Calcrete: *Geological Magazine*, 9(12), 575. <https://doi.org/10.1017/s0016756800181646>
- Leite, A.F., Sousa, M.Z., Ruiz, A.S., Cubas, N., Matos, J.B., Dantas, E.L., Oliveira, J.R., 2018, Petrology and geochronology (UPb) OF the Caapucú suite–Southern Paraguay: Post-tectonic magmatism of the Paraguari belt: *Journal of South American Earth Sciences*, 88, 621–641. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.09.016>
- Linton, D.L., 1955, The problem of tors: *The Geographical Journal*, 121, 470–487. <https://doi.org/10.2307/1791756>
- Livieres, R.A., Quade, H., 1987, Distribución regional y asentamiento tectónico de los complejos alcalinos del Paraguay: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, 7(8), 791–805.
- Mabbutt, J.A., 1961, “Basal surface” or “weathering front”: *Proceedings of the Geologists Association*, 72(3), 357–358. [https://doi.org/10.1016/s0016-7878\(61\)80019-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7878(61)80019-9)
- Mancuso, A.C., Horn, B.L.D., Benavente, C.A., Schultz, C.L., Irmis, R.B., 2021, The paleoclimatic context for South American Triassic vertebrate evolution: *Journal of South American Earth Sciences*, 110, 103321. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103321>
- Martínez, O.A., Colman, C., Iglesias, C., Aguilera, E.Y., Cottescu, Rabassa, J.O., 2022, Indicadores geomorfológicos de meteorización profunda en el Complejo Volcánico Marifil, en VIII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología:

- San Juan, Argentina.
- Martínez, O.A., Rabassa, J., 2014a, El Plateau Riolítico en el noroeste de Patagonia: una extensa superficie de meteorización y erosión del Mesozoico tardío, en XIX Congreso Geológico Argentino: Córdoba, Argentina.
- Martínez, O.A., Rabassa, J., 2014b, The Rhyolitic Plateau of the Marifil Formation (Jurassic): a Gondwana paleosurface in the southeastern portion of the Northern Patagonia Massif, in Rabassa, J. Ollier, C.D. (eds.), Gondwana Landscapes in southern South America: Argentina, Uruguay and southern Brazil, Springer Earth System Sciences, 545 p. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7702-6_16
- Meinhold, K.D., Cubas, N., Garcete, A., 2011, Mapa Geológico del Complejo Precámbrico Sur del Paraguay 1:250,000: Asunción, Paraguay, texto explicativo, 22 p.
- Migoñ, P., 1996, Evolution of granite landscapes in the Sudetes (Central Europe): some problems of interpretation: Proceedings of the Geologists' Association, 107(1): 25–37. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(96\)80065-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(96)80065-4)
- Migoñ, P., 2006, Granite Landscapes of the World, Geomorphological Landscapes of the World: New York, U.S.A., Oxford University Press, 384 p.
- Migoñ, P., 2013, Weathering Mantles and Long-Term Landform Evolution, in Shroder, J. (ed.), Treatise on Geomorphology: San Diego, USA, Academic Press, 127–144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00071-3>
- Migoñ, P., 2021, Sandstone geomorphology - Recent advances: Geomorphology, 373, 107484. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107484>
- Migoñ, P., Lidmar-Bergström, K., 2001, Weathering mantles and their significance for geomorphological evolution of central and northern Europe since the Mesozoic: Earth-Science Reviews, 56(1-4), 285–324. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00068-x](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00068-x)
- Migoñ, P., Lidmar-Bergström, K., 2002, Deep weathering through time in central and northwestern Europe: problems of dating and interpretation of geological record: Catena, 49(1-2), 25–40. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00015-2)
- Moore, G.T., Sloan, L.C., Hayashida, D.N., Umrigar, N.P., 1992, Paleoclimate of the Kimmeridgian/Tithonian (Late Jurassic) world: II. Sensitivity tests comparing three different paleotopographic settings: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 95, 229–252. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(92\)90143-S](https://doi.org/10.1016/0031-0182(92)90143-S)
- Mottershead, D.N., Pye, K., 1994, *Tafoni* on coastal slopes, South Devon, UK: Earth Surface Processes and Landforms, 19(6), 543–563. <https://doi.org/10.1002/esp.3290190607>
- Nash, D.J., McLaren, S.J., 2007, Geochemical Sediments and Landscapes, RGS-IBG Book Series: Main Street, USA, Blackwell Publishing, 465 p. <https://doi.org/10.1002/9780470712917.ch14>
- Nordt, L., Atchley, S., Dworkin, S., 2015, Collapse of the Late Triassic megamonsoon in western equatorial Pangea, present-day American Southwest: Geological Society of America Bulletin, 127, 1798–1815. <https://doi.org/10.1130/b31186.1>
- Ollier, C.D., 1971, Causes of spheroidal weathering: Earth-Science Reviews, 7(3), 127–141. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(71\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0012-8252(71)90005-5)
- Ollier, C.D., 1988, Deep weathering, groundwater and climate: Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 70, 285–290. <https://doi.org/10.2307/521260>
- Ollier, C.D., 1992, Global change and long-term geomorphology: Terra Nova, 4, 312–319. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1992.tb00820.x>
- Ollier, C.D., 2010, Very deep weathering and related landslides: London, UK, Engineering Geology Special Publications, London Geological Society, 23, 5–14. <https://doi.org/10.1144/egsp23.2>

- Ollier, C.D., 2014, Some principles in the study of planation surfaces, in Rabassa, J. Ollier, C.D. (eds.), *Gondwana Landscapes in southern South America*. Argentina, Uruguay and southern Brazil: Springer Earth System Sciences, 545 p. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7702-6_3
- Ollier, C.D., Bourman, R.P., 2002, Flared slopes, footslopes, and the retreat of overhanging slopes: examples of convergent landform development: *Physical Geography*, 23(4), 321–334. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.23.4.321>
- Ortiz-Jaureguizar, E., Cladera, G.A., 2006, Paleoenvironmental evolution of southern South America during the Cenozoic: *Journal of Arid Environments*, 66, 498–532. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.01.007>
- Parrish, J.T., 1993, Climate of the Supercontinent Pangea: *The Journal of Geology*, 101, 215–233. <https://doi.org/10.1086/648217>
- Parrish, J.T., Ziegler, A.M., Scotese, C.R., 1982, Rainfall patterns and the distribution of coals and evaporites in the Mesozoic and Cenozoic: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 40(1-3), 67-101. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(82\)90085-2](https://doi.org/10.1016/0031-0182(82)90085-2)
- Pastén, M., Armoa, J., Benítez, M.S., 2007, Análisis de eventos meteorológicos extremos en el Paraguay: San Lorenzo, Paraguay, Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción, Informe Final del Proyecto FP/08/07, 75 p.
- Pereira, E., 2000, Evolução tectono-sedimentar do intervalo Ordoviciano-Devoniano de Bacia do Paraná com ênfase na sub-bacia de Alto Garças e no Paraguai oriental: São Paulo, Brazil, Universidade de São Paulo, tese de doutoramento, 276 p. <https://doi.org/10.11606/t.44.2000.tde-28102015-104727>
- Perón, S., Bourquin, S., Fluteau, F., Guillocheau, F., 2005, Paleoenvironment reconstructions and climate simulations of the Early Triassic: impact of the water and sediment supply on the preservation of fluvial systems: *Geodinamica Acta*, 18, 431–446. <https://doi.org/10.3166/ga.18.431-446>
- Phillips, J.D., 1999, Divergence, convergence, and self-organization in landscapes: *Annals of the Association of American Geographers*, 89(3), 466–488. <https://doi.org/10.1111/0004-5608.00158>
- Putzer, H., 1962, *Die Geologie von Paraguay. Bietrage zur Regionalen Geologie der Erde*: Berlin, Germany, Schweizerbart Science Publishers 182 p.
- Rabassa, J., 2010, *Gondwana Paleolandscapes: Long-Term Landscape Evolution, Genesis, Distribution and Age*: *Geociências*, 29(4), 541–570.
- Rabassa, J., 2014, Some Concepts on Gondwana Landscapes: Long-Term Landscape Evolution, Genesis, Distribution and Age, in Rabassa, J. and Ollier, C.D. (Eds.): *Gondwana Landscapes in southern South America, Argentina, Uruguay and southern Brazil*. Springer Earth System Sciences, 545 pp. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7702-6_2
- Rabassa, J., Martínez, O.A., Colman, C.F., Laderia, F.S.B., 2018, The “Piedra Movediza” (“Rocking Stones”) of Tandil (Province of Buenos Aires, Argentina) and the “Piedras Equilibristas” (“Balancing Rocks”) of Paraguay and Brazil, en VII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología: Puerto Madryn, Argentina.
- Rabassa, J., Martínez, O.A., Colman, C.F., Ladeira, F.S.B., Sarubbi Jacks, Y., 2021, The “Piedra Movediza” (“Rocking Stones”) of Tandil (Province of Buenos Aires, Argentina) and the “Piedras Equilibristas” (“Balancing Rocks”) of Paraguay and Brazil, en Bouza, P., Rabassa, J. and Bîlmes, A. (eds.), *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina*, 479 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-66161-8>
- Raj, J.K., 1985, Characterisation of the weathering profile developed over a porphyritic biotite

- granite in Peninsular Malaysia: Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 32(1), 121–129. <https://doi.org/10.1007/bf02594775>
- Rees, P.M., Ziegler, A.M., Valdes, P.J., 2000, Jurassic phytogeography and climates: new data and model comparisons, in Huber, B.T., Macleod, K.G., Wing, S.L. (eds.), Warm Climates in Earth History: Cambridge, UK, Cambridge University Press, 297–318. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511564512.011>
- Riccomini, C., Velázquez, V.F., Gomes, C., 2001, Cenozoic lithospheric faulting in the Asunción Rift, eastern Paraguay: Journal of South American Earth Sciences, 14(6), 625–630. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00037-2)
- Riccomini, C., Velázquez, V.F., Gomes, C.B., Milan, A., Sallun, A.E., 2002, Tectonic evolution of the Asunción Rift, Eastern Paraguay: Anais da Academia Brasileira de Ciências, 74(3), 555. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652002000300046>
- Sarubbi Jacks, Y., Colman, C.F., Martinez, O., Souberlich, R., Rabassa, J., 2019, Paleopaisaje como recurso geoturístico en el noreste del Paraguay oriental, en IX Congreso Geológico Uruguayo y V Simposio LAC Geoparques: Trinidad, Uruguay.
- Sarubbi Jacks, Y., Cubas, N., Colman, C.F., Peralta, F., 2024, Cuerpos intrusivos anulares en el Distrito de San Joaquín, Departamento de Caaguazú, Paraguay, en XXII Congreso Geológico Argentino: San Luis, Argentina.
- Tajika, E., 1999, Carbon cycle and climate change during the Cretaceous inferred from a biogeochemical carbon cycle model: The Island Archaeology, 8(2), 293–303. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.1999.00238.x>
- Taylor, G., Shirliff, G., 2003, Weathering: cyclical or continuous? An Australian perspective: Australian Journal of Earth Sciences, 50(1), 9–17. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2003.00970.x>
- Tcacenco-Manzano, L.M., Fernandes, L.A., Da Silva, P.H.F., 2024, Eolian sedimentation record in the western part of the Bauru Basin: Rio Paraná Formation (Upper Cretaceous): Brazilian Journal of Geology, 54(1), e20230049. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202420230049>
- Tófalo, O.R., Pazos, P.J., 2010, Paleoclimatic implications (Late Cretaceous–Paleogene) from micromorphology of calcretes, palustrine limestones and silcretes, southern Paraná Basin, Uruguay: Journal of South American Earth Sciences, 29(3), 665–675. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.09.002>
- Thiry, M., 2005, Weathering morphologies of the Fontainebleau Sandstone and related silica mobility: Ferrantia, 44, 47–51.
- Thomas, M.F. 1965, Some aspects of the geomorphology of domes and tors in Nigeria: Zeitschrift für Geomorphologie, 9(1), 63–81.
- Thomas, M.F., 1968, Bornhardt, en Fairbridge, R.W. (ed.), Encyclopedia of geomorphology: Reinhold, New York.
- Twidale, C.R., 1980, Castellated inselberg: Australian Geographer, 14(6), 368–371. <https://doi.org/10.1080/00049188008702786>
- Twidale, C.R., 1982, Granite Landforms: Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Science, 372 p. <https://doi.org/10.1016/c2009-0-07389-9>
- Twidale, C.R., 1987, Etch and intracutaneous landforms and their implications: Australian Journal of Earth Sciences, 34, 367–386. <https://doi.org/10.1080/08120098708729418>
- Twidale, C.R., 1990, The origin and implications of some erosional landforms: The Journal of Geology, 98(3), 343–364. <https://doi.org/10.1086/629409>
- Twidale, C.R., 1997, Some recently developed landforms: climatic implications: Geomorphology, 19(3-4), 349–365. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00019-6)

- Twidale, C.R., 1999, Landforms ancient and recent: the paradox: *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 81(3), 431–441. <https://doi.org/10.1111/1468-0459.00072>
- Twidale, C.R., 2002, The two-stage concept of landform and landscape development involving etching: origin, development and implications of an idea: *Earth-Science Reviews*, 57, 37–74. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00059-9)
- Twidale, C.R., 2007, *Bornhardts* and associated fracture patterns: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 62(1), 139–153.
- Twidale, C.R., 2009, Differentiating etch, epigene, and subaerial landforms: *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1–21. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2009/0053-0001>
- Twidale, C.R., Centeno-Carrillo, J.D.D., 1993, Landform development at the Ciudad Encantada, near Cuenca, Spain: *Xeológico de Laxe Coruña, Cuaderno do Laboratorio*, 18, 257–269.
- Twidale, C.R., Lageat, Y., 1994, Climatic geomorphology: a critique: *Progress in Physical Geography*, 18(3), 319–334. <https://doi.org/10.1177/030913339401800302>
- Twidale, C.R., Mueller, J.E., 1988, Etching as a process of landform development: *The Professional Geographer*, 40(4), 379–391. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1988.00379.x>
- Twidale, C.R., Vidal Romaní, J.R., 2004, Identification of exposed weathering fronts: *Geodinamica Acta*, 17(2), 107–123. <https://doi.org/10.3166/ga.17.107-123>
- Twidale, C.R., Vidal Romaní, J.R., 2005, Landforms and geology of granite terrains: London, UK, CRC Press, 362 p.. <https://doi.org/10.1201/9780367803407>
- Vanthangliana, V., Dinpuia, L., Walia, D., Sailo, S., Lawmkima, H., Sangi, L., Bharali, B., 2020, Polygonal Cracks in Bhuvan Sandstones of Surma Basin, North East India: *Journal of the Geological Society of India*, 95, 566–570. <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1483-3>
- Velázquez, V.F., Gomes, C.B., Capaldi, G.G., Comin-Chiaromonti, P., Ernesto, M., Kawashita, K., Petrini, R., Piccirillo, E.M., 1992, Magmatismo alcalino Mesozóico na porção centro-oriental do Paraguai: aspectos geocronológicos: *Geochimica Brasiliensis*, 6(1), 23–35.
- Velázquez, V.F., Gomes, C.B., Orué, D., Comin-Chiaromonti, P., 1996, Magmatismo alcalino do Paraguai: uma revisão e atualização das províncias: *Boletim IG-USP. Série Científica*, 27, 61–79. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v27i0p61-79>
- Velázquez, V.F., Riccomini, C., Gomes, C. de B., Kirk, J., 2011, The Cretaceous Alkaline Dyke Swarm in the Central Segment of the Asunción Rift, Eastern Paraguay: Its Regional Distribution, Mechanism of Emplacement, and Tectonic Significance: *Journal of Geological Research*, 2011, 946701. <https://doi.org/10.1155/2011/946701>
- Vento, B., Puebla, G.G., Pinzón, D.A., Prámparo, M.B., 2021, Paleoclimate Estimates for the Paleogene Neogene in Southern South America using fossil leaves as proxies: *Comptes Rendus Palevol*, 20(3), 29–48. <https://doi.org/10.5852/cr-palevol2021v20a3>
- Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B., González, P., 2006, Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models: *Geophysical Research Letters*, 33(13), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2006gl025759>
- Vidal Romaní, J.R., Twidale, C.R., 1998, *Formas y Paisajes Graníticos: Coruña, España*, Universidade da Coruña, 411 p..
- Wayland, E.J., 1933, Peneplains and some other erosional platforms: Uganda, Africa, Protectorate of Uganda, Geological Survey Department, Annual Report and Bulletin,, 1(74), 376–377.
- Wolfart, R., 1961, Stratigraphie und fauna des älteren Paläozoikums (Silur, Devon) in Paraguay: *Geologische Jahrbuch*, 78, 29–102.

White, A.F., 2002, Determining mineral weathering rates based on solid and solute weathering gradients and velocities: application to biotite weathering in saprolites: *Chemical Geology*, 190(1-4), 69–89. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00111-0](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00111-0)

Zhou, J., Lau, K.M., 1998, Does a monsoon climate exist over South America?: *Journal of Climate*, 11(5), 1020–1040. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<1020:DA MCEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<1020:DA MCEO>2.0.CO;2)