



# Caracterización geotécnica de los flujos de tierra en las barrancas del río Paraná, en Santa Elena, provincia de Entre Ríos, Argentina

**Javier SOFFIANTINI<sup>1</sup> y Ernesto BRUNETTO<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>LAGEO, Laboratorio de Geología de Llanuras – CICyTTP (CONICET-Prov. de Entre Ríos UADER), Diamante – Entre Ríos

Email: soffiantinij1975@gmail.com

**Editor:** Sergio Sepúlveda

Recibido: 1 de septiembre de 2022

Aceptado: 23 de febrero de 2023

## RESUMEN

La ciudad de Santa Elena, ubicada en el noroeste de la provincia de Entre Ríos, expone enormes barrancas sobre la costa del río Paraná. Además del magnífico escenario natural que exhibe la ciudad, la actividad retrocedente de las barrancas, representa una verdadera amenaza geológica para los habitantes del lugar. Este fenómeno se manifiesta mediante súbitos y repentinos movimientos gravitacionales. El último episodio causante de grandes daños fue en 2016, coincidente con un periodo de grandes lluvias y crecidas extraordinarias del río Paraná producto de un fuerte El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). El evento húmedo aumentó considerablemente el nivel del río y la saturación de los sedimentos que conforman las barrancas. A partir de un detallado reconocimiento de campo que incluyó estudios estratigráficos y reconocimiento de los principales rasgos dejados por el movimiento gravitacional, junto con datos aportados por una serie de 6 perforaciones geotécnicas, fue posible construir un modelo de remoción en masa. Las características geomorfológicas y los parámetros geotécnicos medidos en las perforaciones sugieren la ocurrencia de un proceso de tipo Flujo de Tierra. La identificación de las causas que precipitan la desestabilización de la barranca junto con un adecuado modelo interpretativo de remoción en masa permite adecuar las obras de ingeniería factibles de mitigar o neutralizar potenciales daños.

**Palabras clave:** Geomorfología, Geotecnia, Flujo de Tierra, El Niño-Oscilación del Sur

## ABSTRACT

*Geotechnical characterization of the landslides in the Paraná river cliffs of Santa Elena, Entre Ríos province, Argentina.*

Santa Elena city in the Entre Ríos province exposes huge cliffs along the shorelines of the Paraná River. This scenario of the city provides a wonderful view of the river. However, the height and the steep slopes of these cliffs pose a permanent hazard to people that live there. Landslides are the main cause of backward movement of the cliffs. Both the stratigraphic features and the increase of water saturation by infiltration play an essential role to trigger this type of landslides. The last big episode of landslides occurred in 2016, simultaneously with a strong El Niño Southern Oscillation event (ENSO), which caused high precipitation and flooding of the Paraná River. Through exhaustive fieldwork, we could recognize the main structures that characterize the landslide mechanism. Additionally, new data provided by six geotechnical boreholes helped us to understand the mechanism that triggers the landslides. The observed geomorphic features and geotechnical information suggest that this is a case of Earthflow process. An appropriate interpretation of the type of movement and the identification of the causes, could be used to predict and build suitable engineering works to mitigate the impact of the landslides.

**Keywords:** Geomorphology, Geotechnics, Earthflow, El Niño-Southern Oscillation

## INTRODUCCIÓN

Como sucede en gran parte de la costa del río Paraná, donde sus orillas se encuentran surcadas por grandes taludes verticales que constituyen las barrancas, la ocurrencia sistemática de procesos de remoción en masa es una verdadera amenaza. Los procesos gravitacionales provocan un acelerado retroceso de la barranca con la consiguiente transferencia de sedimentos hacia el río. En ambientes de llanuras, las características estratigráficas y la dinámica fluvial e hidrogeológica, condicionada por las fluctuaciones climáticas y la acción antrópica, son las principales causas de la inestabilidad, haciendo que la gravedad actúe y desencadene el colapso (Cruden y Varnes 1996). Entre los factores detonantes que pueden iniciar el movimiento y producir la inestabilidad de la ladera o barranca se cuentan las lluvias intensas, sacudidas sísmicas o socavación (Crozier 2004). Los controles geológicos condicionantes representan las características fundamentales del material que compone la ladera o barranca, que comprende la litología, composición mineralógica y textural y la estructura (Borgatti y Soldati 2010). En conjunto, determinan el comportamiento geomecánico.

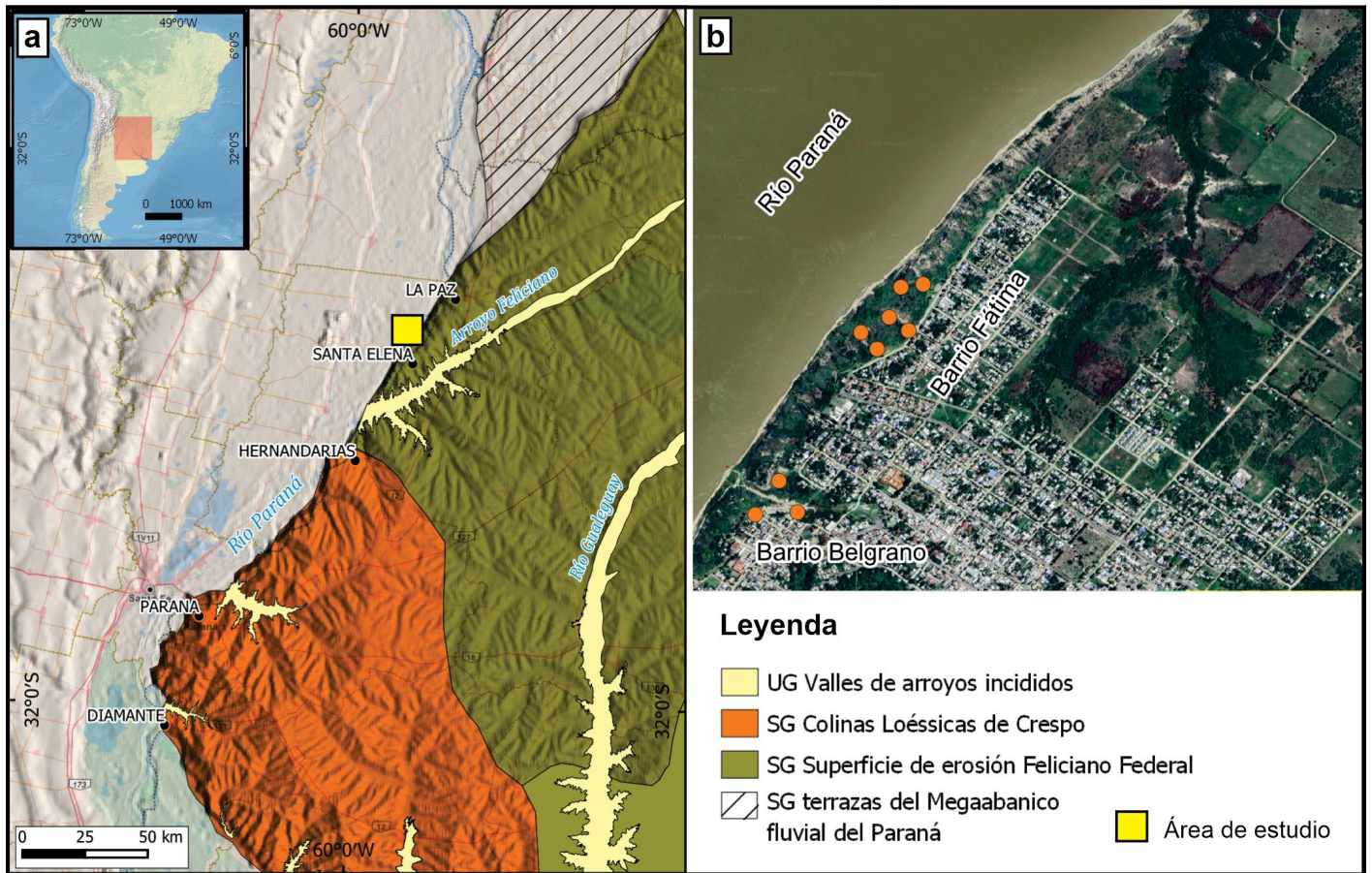
La ciudad de Santa Elena, ubicada a 100 km al norte de Paraná, ciudad capital de la provincia de Entre Ríos (Fig. 1a), no escapa a esta problemática. La cercanía de los sitios afectados por el movimiento con el ejido urbano ocasiona un importante perjuicio sobre la población y generan importantes daños económicos y riesgo para la comunidad. En Santa Elena, las observaciones de campo evidencian una marcada diferencia con los movimientos gravitacionales ocurridos en otros sitios de la provincia, respecto a los acontecidos en las ciudades de Diamante y Paraná. Estas diferencias, manifestadas en los rasgos geomorfológicos que dejó el movimiento, sugieren que los deslizamientos de Santa Elena obedecen a un tipo diferente de remoción en masa y que el mismo se encuentra controlado por otros factores (Sanguinetti 2005). La configuración composicional de las barrancas es el factor principal que condiciona el tipo de mecanismo de remoción en masa. En este sentido, cuando se analizan los movimientos gravitacionales sobre la costa del río Paraná y la estratigrafía que afecta, resulta fundamental la diferencia constitutiva al norte y al sur de la ciudad de Paraná. Al Norte, las barrancas exponen sobre el río sucesiones de arenas cuarzosas bien seleccionadas de la Formación Ituzaingó, y arcillas esmectíticas y limos de la Formación Hernandarias (Iriondo 2010). Mientras que, hacia el Sur, aparecen secuencias intercaladas de arenas y arcillas plásticas de la Formación Paraná, cubiertas por limos calcretizados de

la Formación Puerto General Alvear (Grupo Punta Gorda en sentido amplio). Al Sur, desaparecen las arenas fluviales de la Formación Ituzaingó (Iriondo 2010). Esta diferencia litoestratigráfica, que expresa una diferencia composicional de los taludes sobre el nivel del río, controla el comportamiento geomecánico y por consiguiente el modo en que retrocede la barranca (Sanguinetti 2005). Habitualmente se ha postulado que el inicio de los deslizamientos ocurre en la parte alta de la barranca, afectando la columna de loess superior, por acción de sobrecargas del acuífero libre durante lluvias intensas (Díaz et al. 2005). Este mecanismo genera deslizamientos de suelos sobre planos de falla con base en el contacto entre el loess y las arcillas subyacentes de Fm. Hernandarias que actúan como sustrato impermeable (Díaz et al. 2005). Este modelo propuesto ha sustentado el desarrollo de obras de contención en la localidad de Santa Elena que ha sido afectadas durante el episodio de 2016. Por otra parte, se ha interpretado que los procesos de caídas de bloques (bloques de calcretes de Fm. Ituzaingó y calcretes de Formación Puerto General Alvear) por socavación de las arenas fluviales de la Fm. Ituzaingó en la base de la barranca, es un proceso secundario, en el sector de Hernandarias y Santa Elena (Sanguinetti 2005).

Sobre la base de nuevos datos, el presente trabajo tiene el objetivo de caracterizar el tipo proceso de remoción en masa ocurrido en Santa Elena, mediante el análisis de parámetros geotécnicos medidos a través de una serie de perforaciones. Los avances en la comprensión del proceso de remoción en masa que opera en la costa de Santa Elena, junto con la identificación de los factores controlantes, permitirá ampliar el enfoque para mitigar, planificar y ejecutar obras de ingenierías adecuadas, que favorezcan la desaceleración y/o la neutralización del retroceso de la barranca.

## ÁREA DE ESTUDIO

La localidad de Santa Elena, Noroeste de la provincia de Entre Ríos, donde ocurrieron los deslizamientos del episodio de abril de 2016 (Fig. 1b), se localiza sobre las márgenes del río Paraná, en un sector de su cuenca media de Argentina (Fig. 1a). En el barrio Fátima, sobre la barranca del río, se deslizó un frente de casi 200 metros, afectando la infraestructura vial (Fig. 2). En la zona del vecino barrio Belgrano también se produjeron deslizamientos que afectaron viviendas e infraestructura urbana (Fig. 2).



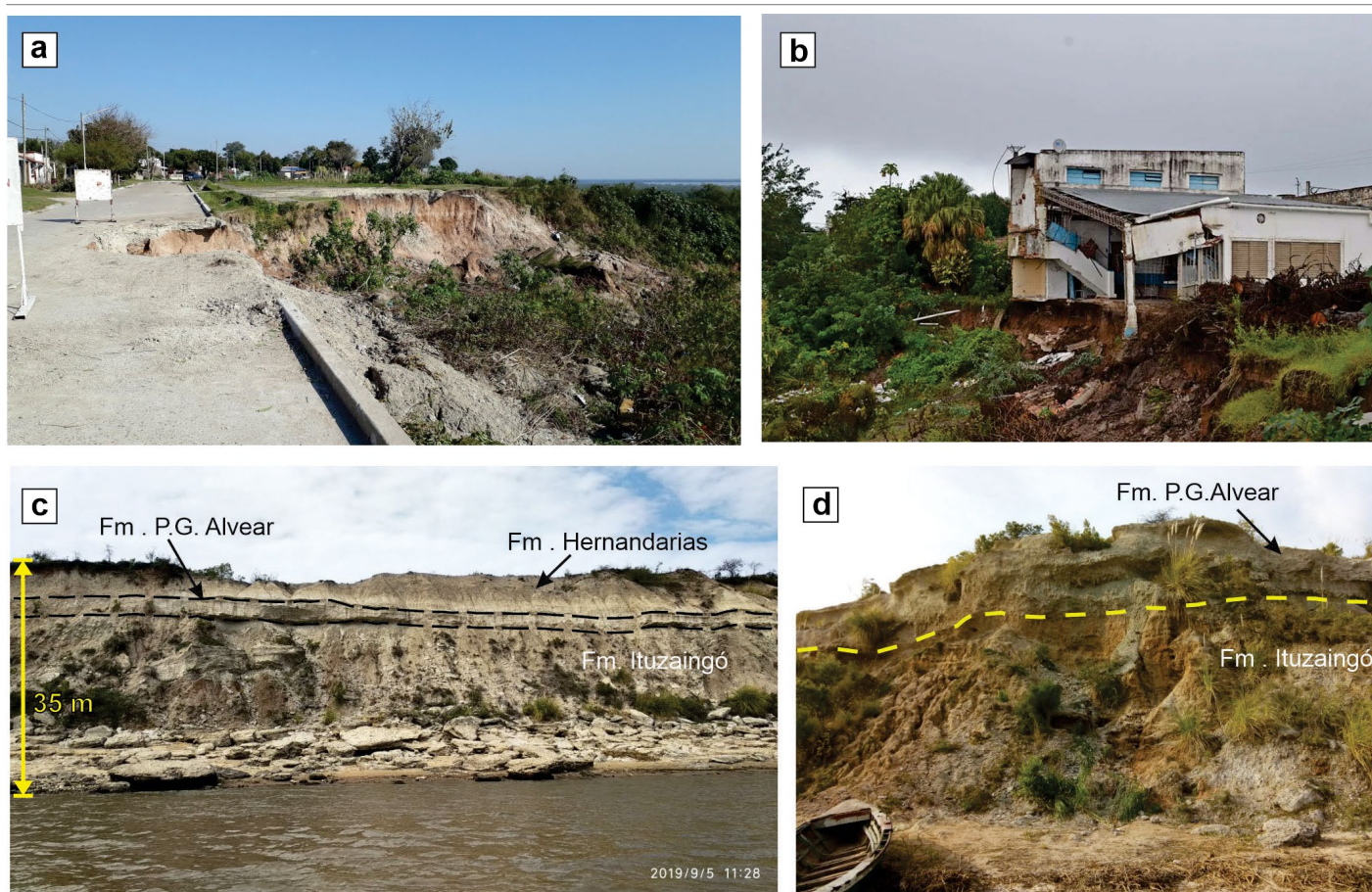
## MARCO GEOLÓGICO - GEOMORFOLÓGICO

El Noreste de Argentina (NEA) comprende la Mesopotamia, la Meseta Misionera y el Chaco Oriental. La Mesopotamia es la región que corresponde al sector Sureste de la cuenca intracratónica Chaco-Paraná, con una superficie de 180000 km<sup>2</sup>. Esta región se caracterizó por la acción geomorfológica y sedimentaria de los ríos Paraná y Uruguay durante el Cenozoico tardío, en una cuenca de antepaís distal (Brunetto et al. 2019a). La Mesopotamia Sur, comprende el Sur de Corrientes y la provincia de Entre Ríos. Es una región que se caracteriza por la presencia de antiguos paleo-humedales y fajas fluviales, que por levantamiento tectónico conforma actualmente una planicie elevada (Fig. 3).

A escala regional la principal unidad geomorfológica del sector Centro Norte de la Provincia de Entre Ríos es la superficie de erosión Feliciano-Federal (Iriondo 1998, Iriondo y Kröhling 2008) (Fig.1a). Es un sector elevado que conforma una planicie estructural afectada por la acción morfogenética

e incisión de los ríos tributarios de los ríos Paraná y Uruguay (Brunetto et al. 2019a). La superficie Feliciano-Federal es el resultado en una primera etapa de la sedimentación de los grandes cauces enterrados de los ríos Paraná y Uruguay (Iriondo y Kröhling 2008). Estos sistemas fluviales han migrado lateralmente y han depositado fajas de arena por sucesivo abandono de sus cauces (avulsión). Un ejemplo es el paleocauce del río Uruguay que generó la sedimentación de la Formación San Salvador (Iriondo y Kröhling 2007). Otro caso es el paleocauce del río Paraná, conocido como Formación Ituzaingó. Estas unidades netamente fluviales, fueron cubiertas por depósitos palustres de las arcillas que constituyen la Formación Hernandarias (Iriondo 1980,1998, Iriondo y Kröhling 2008). Dicha formación presenta una considerable cantidad de arcillas plásticas esmectíticas, formando espesores de entre 20 y 40 m. A partir de información geodésica y análisis geomorfométricos se ha inferido que esta planicie ha sufrido un suave levantamiento regional, durante el Cuaternario (Brunetto et al. 2019a). Se estima que desde el Pleistoceno Inferior- Medio (ca. 1 Ma) este sistema sedimentario ha estado



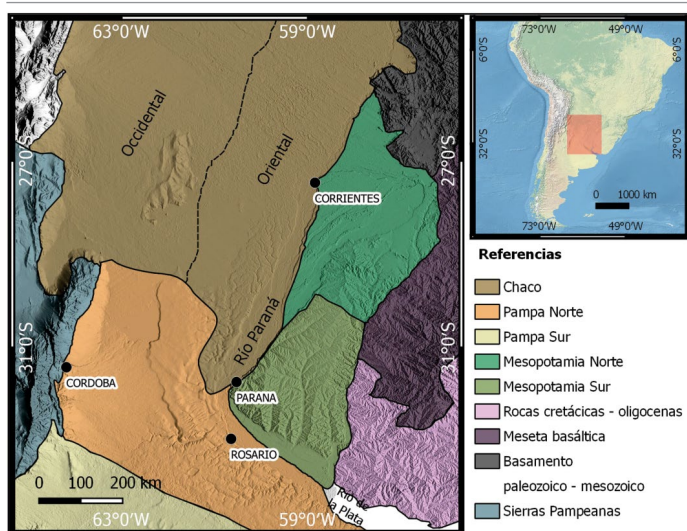


**Figura 2.** Fotos de las áreas afectadas por procesos de remoción en masa en Santa Elena: a) Fractura y desmoronamiento sobre la calle principal del barrio Fátima; b) Casa destruida por remoción en masa sobre el talud del cañadón que separa el barrio Belgrano de la zona céntrica; c) Barranca sobre el río Paraná al norte del barrio Fátima. Nótese el desarrollo del calcrete de la Formación Puerto General Alvear; d) Barranca del río Paraná en la zona centro de Santa Elena.

ascendiendo producto de deformación tectónica (Brunetto et al. 2019a, 2019b). La superficie así conformada es dominada por erosión desde el Pleistoceno Medio - Superior debido a la incisión de los cauces. La superficie de erosión actual, pre-

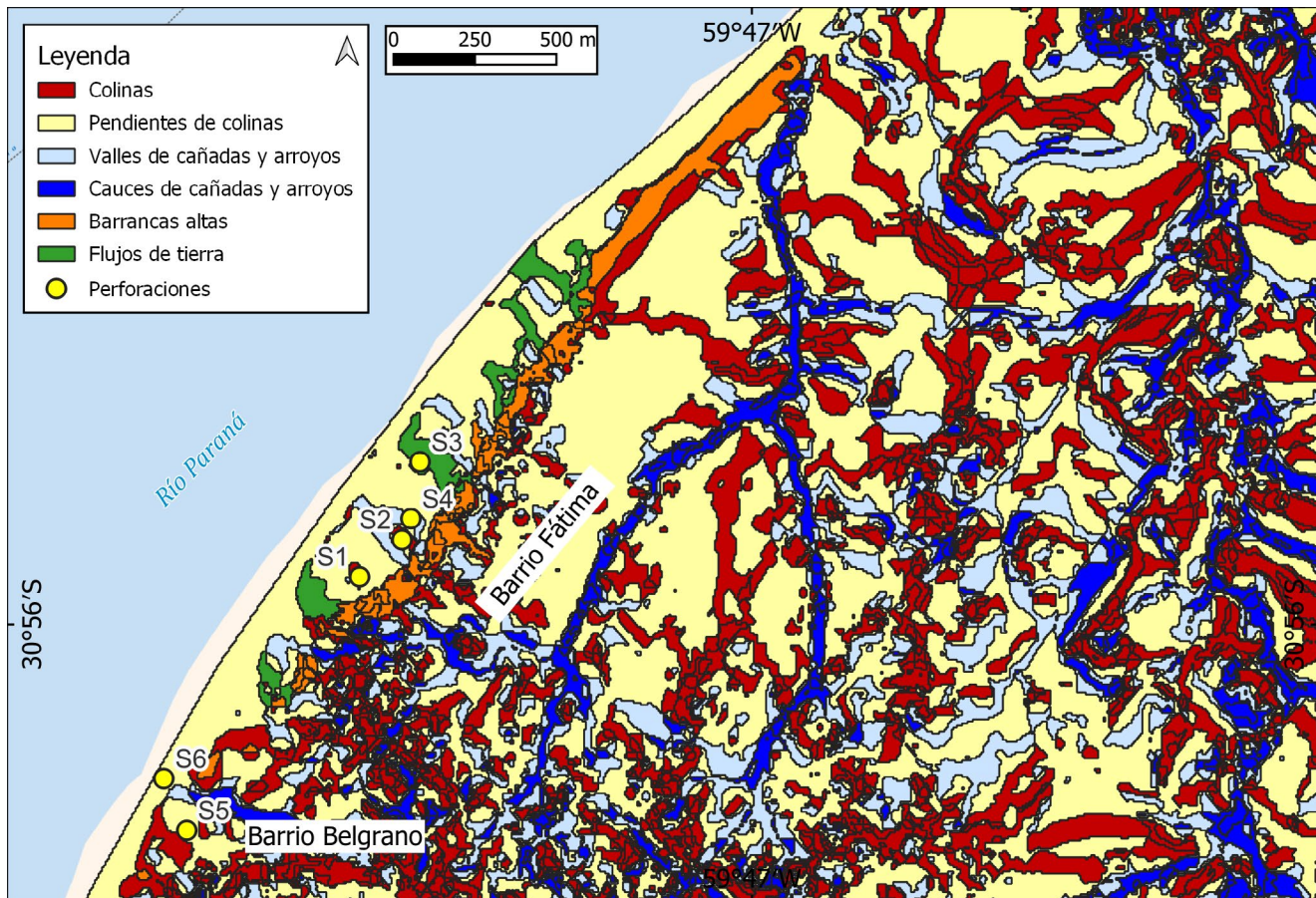
senta cotas entre 50-60 m s.n.m.

Localmente, el sector Noroeste de Entre Ríos se compone de colinas y valles de arroyos formados por erosión hídrica (Fig. 1a). La potencia morfogenética en Entre Ríos es muy alta dadas las pendientes pronunciadas de sus laderas de colinas y de los lechos de los cauces (Iriondo 1998; Brunetto et al. 2019b). Esta configuración general da lugar a erosión de materiales tanto por escurrimiento areal en forma de manto, como por corrientes encausadas formando surcos, cárcavas y cauces de arroyos (Fig. 4). Los principales eventos de remoción en masa, ocurren sobre la margen del río Paraná. Las barrancas generadas por la acción erosiva en la margen del río Paraná, presentan elevaciones entre 40 y 60 m.s.n.m. El Barrio Fátima está emplazado sobre una zona de colinas (Fig. 4). Estas colinas resultaron del desarrollo de un sistema de cárcavas canalizadas hacia al norte con sentido de drenaje general de la cuenca S-N, desembocando en el Río Paraná y de la erosión por retroceso de barrancas, sobre la margen del río Paraná (Fig. 4).



**Figura 3.** Regiones geológicas de la región Centro y Noreste de Argentina (tomado de Brunetto et al. 2019b).





**Figura 4.** Mapa Geomorfológico del área Noroeste de la localidad de Santa Elena, donde se encuentran los barrios Fátima y Belgrano.

### Marco estratigráfico del área de deslizamientos del barrio Fátima

La región Noroeste de Entre Ríos se caracteriza por la exposición en las barrancas de una columna estratigráfica de edad neógena cuaternaria, característica de un sector de la Mesopotamia Sur (Iriondo 2010, Brunetto et al. 2019b) (Fig.5). Aflora en la base, sobre el nivel del río Paraná, una sucesión de depósitos marinos de la Formación Paraná, en sus términos de mar somero abierto (Aceñolaza 2007). Estos depósitos gradan hacia arriba a términos de ambientes litorales y mixtos, correspondientes a la etapa regresiva de la ingresión del mar paranaense en la región cratónica, durante el Mioceno tardío (Pérez 2013). Sobre la anterior, se apoya una secuencia de depósitos continentales fluviales (Formación Ituzaingó de edad Mioceno tardío) (Brandoni 2013, Brunetto et al. 2013), cubiertos por depósitos palustres y de cauces pobremente canalizados de la Formación Puerto General Alvear de edad Plioceno (Candela et al. 2006, Brunetto et al. 2019). Sobreyacen potentes depósitos de arcillas esmectíticas palustres de la Formación Hernandarias, cubiertas por una columna de loess y loessoides del Pleistoceno sensu lato, correspondientes a la Formación Punta Gorda (Kröhling et al.

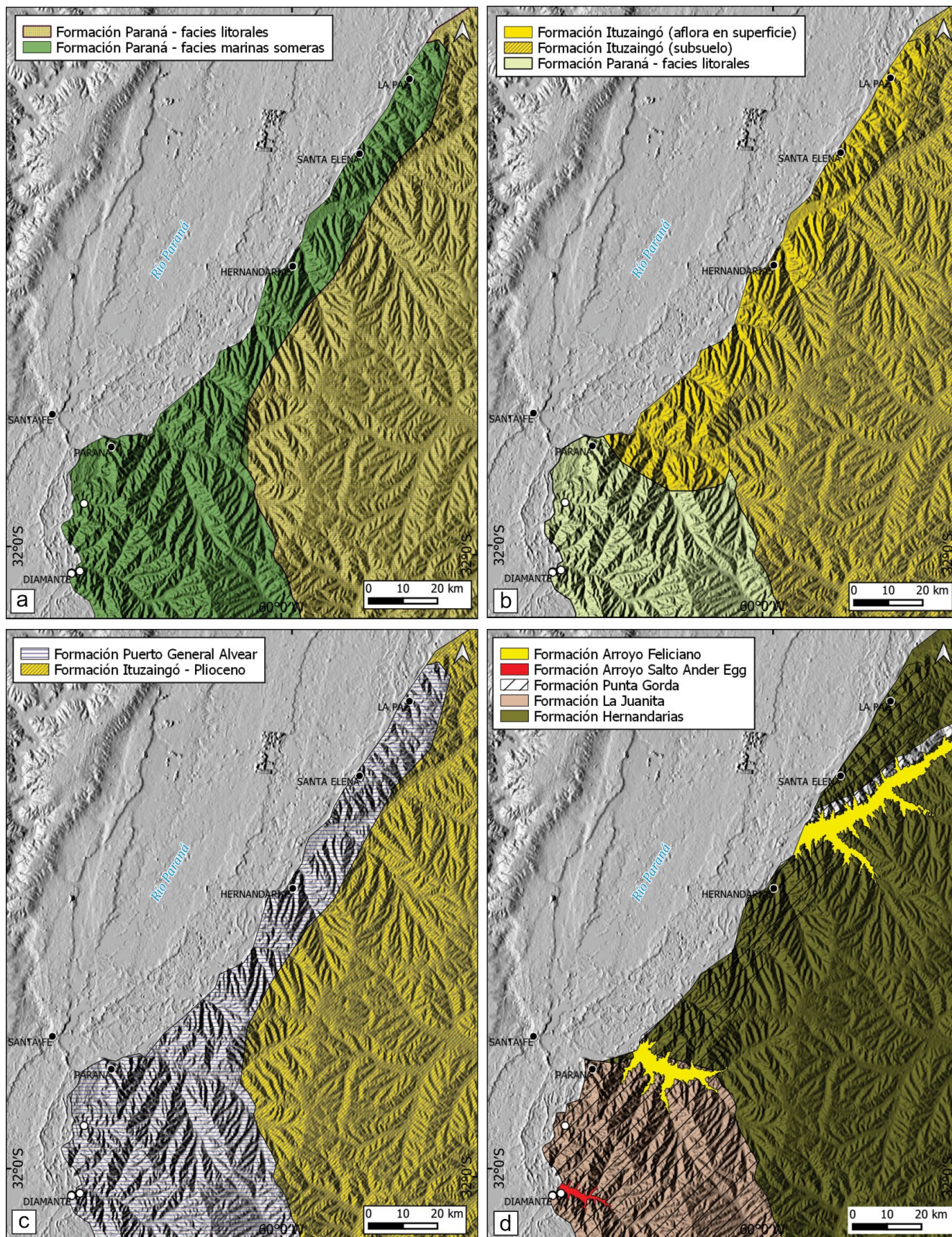
2001, Iriondo y Kröhling 2008). Estos antiguos loess están cubiertos en el techo de las barrancas por un depósito de loess de la Formación Tezanos Pinto, representativos del último Máximo Glacial (Pleistoceno tardío) (Kröhling et al. 2010, Krück et al. 2011). Se describe en detalle la columna de la localidad de Santa Elena (Cuadro 1 y Fig. 6), lugar donde ocurrieron los deslizamientos de abril de 2016.

### METODOLOGÍA

Para estudiar el proceso de remoción en masa ocurrido en la ciudad de Santa Elena nos basamos en los criterios elaborados por (Varnes 1978, Cruden y Varnes 1996). Estos trabajos sirvieron de base al USGS (*United States Geological Service*) para definir y clasificar los procesos de remoción en masa o *Landslide* (Highland y Bobrowsky 2008). La clasificación se sustenta en un exhaustivo trabajo de campo, que incluye un profundo conocimiento de la estratigrafía de los sitios y de un minucioso reconocimiento de las estructuras generadas por el movimiento.

Para definir el mecanismo que propulsa el movimiento





**Figura 5.** Mapa Geológico del Centro y NorOeste de Entre Ríos (representaciones en cortes geológicos horizontales): a) Mioceno Superior marino; b) Mioceno Superior litoral - continental; c) Plioceno; d) Cuaternario.



**Cuadro 1.** Descripción estratigráfica de litologías de las barrancas del río Paraná en el área de Santa Elena.

Unidad Estratigráfica	Litología	Estructuras	Epigénesis	Consolidación
Formación Ituzaingó.	Arenas medias a finas cuarzosas bien seleccionadas de colores blanquecinos a ocres rojizos.	Sets y cosets de capas con estratificación cruzada planar	Productos de oxidación de Fe en forma de pequeñas concreciones y de pátinas sobre granos de cuarzo. Formación de un calcrete por epigénesis hacia el techo.	Material no consolidado
Formación Puerto General Alvear	Limos silicoclásticos cementados por carbonatos.	Estrato tabular de calcrete Enrejado de placas horizontales irregulares y tabiques planares verticales de carbonatos. Rizoconcreciones verticales.	Precipitación carbonática	Material bien consolidado y frágil
Formación Hernandarias	Limos arcillosos con alto contenido de arcillas expansibles (esmectita)	Estratos tabulares. Niveles con concentración de concreciones y cristales de yeso.	Precipitación de Yeso	Material plástico y deformable con alto contenido de agua
Formación Punta Gorda	Limos pardos algo consolidados, masivos o difusamente laminados.	Estratos tabulares silicoclásticos con costras más resistentes de geometría tabular y espesores de 20-30 cm intercalados.	Niveles de paleosuelos formando un pedocomplejo (horizontes B y Ck)	
Formación Tezanos Pinto.	Limos masivos eólicos. Materiales volcánicoclásticos	Estratos maivos		

gravitacional utilizamos los principios básicos de la geotecnia o geología aplicada a la ingeniería (Holtz y Kovacs 1981). Para esto, contamos con series de datos de seis pozos geotécnicos ubicados en sitios específicos de las barrancas (Fig. 7). Las perforaciones fueron ejecutadas por la Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos con el objetivo de estudiar los procesos gravitacionales en Santa Elena (CFI, 2019) (anexo 1). En estos pozos se midió la granulometría, la resistencia a penetración mediante el ensayo SPT (número de golpes, NG), la humedad Natural (HN) y los límites de Atterberg: Límite plástico (LP), Límite líquido y el coeficiente Índice de Plasticidad (IP) (anexo 2), siguiendo los criterios y ecuaciones de Holtz y Kovacs (1981).

Los Límites de Atterberg o límites de consistencia representan límites de comportamiento o estado de suelo o sedimento expresado en contenido porcentual de agua (Holtz y Kovacs 1981). Se trata de parámetros intrínsecos de cada suelo o sedimento vinculados a las características granulométricas y mineralógicas de los materiales sedimentarios que lo constituyen. Así, un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso cuyos límites son Límite de Retracción (LR), Límite Plástico (LP) y Límite Líquido (LI). El Índice de Plasticidad (IP) representa el rango de humedad en el que el sedimento se comporta en estado plástico. Se formula como:

$$IP = LL - LP$$

El análisis granulométrico se basa en discretizar los porcentajes de las distintas poblaciones de tamaños de partí-

culas que constituyen el sedimento. En este caso, como en todos los estudios geotécnicos, el análisis granulométrico se realizó bajo los estándares de la USCS (*Unified Soil Classifications System*). Las fracciones granulométricas fueron definidas mediante los tamices TN° 4 (4.75 mm), TN° 10 (2.0 mm), TN° 40 (0.425 mm) y TN° 200 (0.075 mm), expresada en porcentaje pasante. La sumatoria de todo el material retenido en los tamices constituye la porción gruesa del suelo (*coarse-grained soil*), mientras que el material pasante del tamiz TN° 200 constituye la porción fina (*fine-grained soil*).

La grava (G%) queda definida por el material retenido en el TN°4. La arena gruesa (AG%) corresponde a la fracción comprendida entre el TN°4 y TN°10. La fracción arena mediana (AM%) corresponde a la fracción comprendida entre TN°10 y TN°40. La arena fina (AF%) corresponde a la fracción comprendida entre TN°40 y TN°200. Las partículas finas (limo y arcilla) corresponden al porcentaje que pasante del TN°200. El porcentaje granulométrico que conforma cada muestra queda expresado por las siguientes ecuaciones, considerando el peso pasante (Pa) de cada tamiz (T):

$$G\% = 100 - PaN^{\circ}4\% \tag{2}$$

$$AG\% = PaN^{\circ}4\% \times \left( \frac{PaN^{\circ}10}{100} \right) \tag{3}$$

$$AM\% = (PaN^{\circ}4\% - AG\%) \times \left( 1 - \frac{PaN^{\circ}4\%}{100} \right) \tag{4}$$

$$AF\% = (PaN^{\circ}4\% - AG\% - AM\%) \times \left( 1 - \frac{PaN^{\circ}200\%}{100} \right) \tag{5}$$

$$F\% = 100 - (G\% + AG\% + AM\% + AF\%) \quad (6)$$

$$Total = G\% + AG\% + AM\% + AF\% + F\% = 100 \quad (7)$$

El anexo 2 muestra los datos geotécnicos medidos y calculados utilizados en el trabajo.

La variación en profundidad de las propiedades geotécnicas permitió caracterizar el comportamiento mecánico de la columna estratigráfica atravesada por las perforaciones. Se reconocieron unidades geotécnicas (UG), definidas como un cuerpo de sedimentos con base y techo caracterizadas por presentar un comportamiento mecánico relativamente uniforme y diferenciado respecto a la unidad que la subyace y la que la sobryace. La correlación de pozos desde el punto de vista geotécnico y el análisis de variaciones de índices de consistencia sirvió para explorar las causas intrínsecas que promovieron la inestabilidad de los taludes mediante la generación de procesos de remoción en masa.

### IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO DE REMOCIÓN EN MASA EN SUPERFICIE

En la zona afectada por el movimiento gravitacional de sedimentos se observaron rasgos de un proceso de remoción en masa que transporta un material suelto, bajo un mecanismo de tipo flujo (Highland y Bobrowsky 2008). Esto implica una alta deformación interna, donde el sedimento fue deformado y movilizado, fluyendo súbitamente por la acción de la gravedad. En la zona afectada por el movimiento se reconocen: (1) una zona de cabecera o zona fuente caracterizada por una escarpa semicircular producto de una fractura donde el bloque externo colapsado sufrió la desintegración por licuefacción y posterior deformación plástica para fluir pendiente abajo (Fig. 8a); (2) una zona de transferencia o transporte del material, de morfología canalizada donde el material se moviliza como un flujo (Fig. 8b y 8c); (3) una zona distal de deposición, donde el material detiene la inercia del movimiento por pérdida de energía y expansión lateral (Fig. 8d-f).

Los materiales sedimentarios afectados por el flujo de materiales pertenecen al talud que forma la barranca sobre la Formación Hernandarias. Es un material fino, plástico, integrado por limos y arcillas de color gris. Dentro de la zona de transporte, es posible identificar sucesivas activaciones del proceso de remoción, marcado por escalones dados por diferencias en la competencia de los materiales. El fenómeno se extiende desde el techo de la barranca hasta alcanzar el

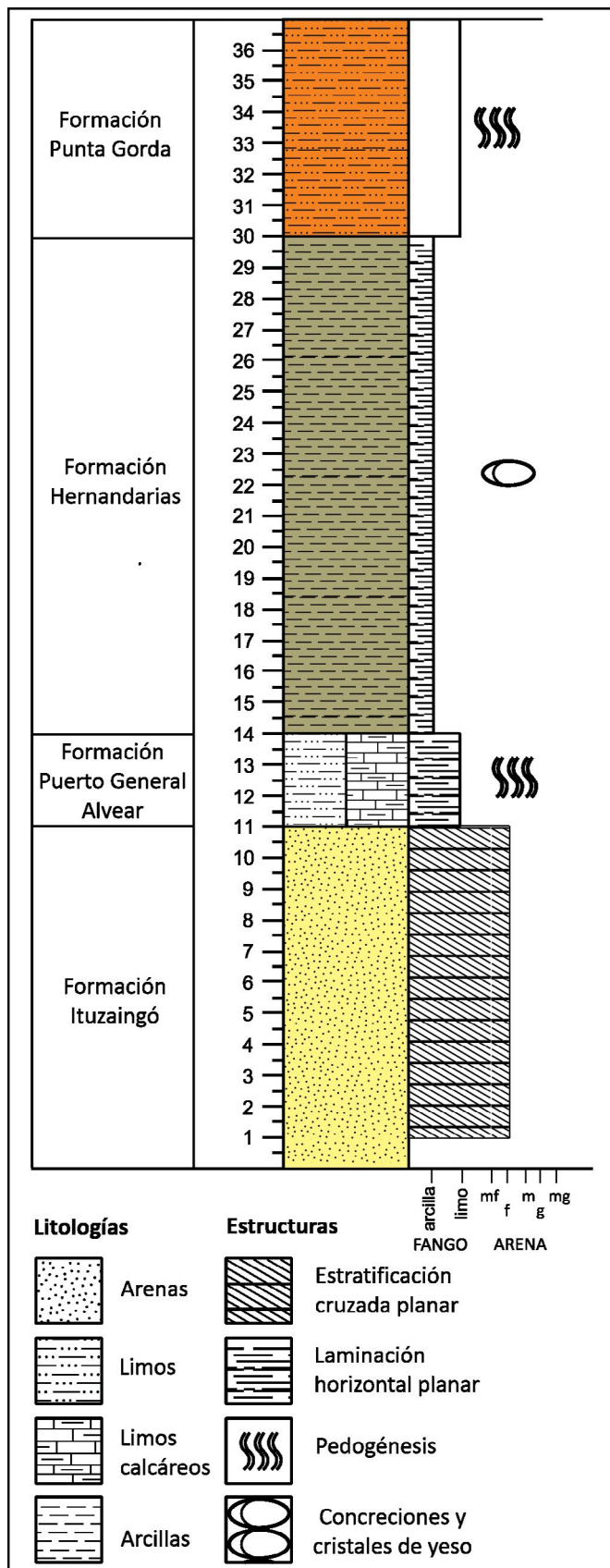


Figura 6. Columna estratigráfica de Santa Elena.





**Figura 7.** Imagen de la zona afectada por remoción en masa en la ciudad de Santa Elena con la ubicación de las perforaciones geotécnicas y los perfiles interpretados.

techo del calcrete que integra la Formación Puerto General Alvear. Dicho intervalo actúa como una barrera vertical que detiene el proceso. Subyacen a la unidad calcárea las arenas sueltas compactas de la Formación Ituzaingó, que conforma un talud vertical a sub-vertical muy próximo al nivel del río (Fig. 8f).

El principal cuerpo de las remociones ocurridas en la zona afectada, presenta una longitud de 16<sup>2</sup> m de largo, 62 m de ancho, cubriendo un área de 6850 m<sup>2</sup>. Un segundo cuerpo muestra una longitud de 150 m de largo, 74 m de ancho, cubriendo un área de 6260 m<sup>2</sup>.

De acuerdo con la clasificación de la USGS (Highland y Bobrowsky 2008), basada en Varnes (1978) y Cruden y Varnes (1996), el tipo de movimiento y el material afectado permite encuadrar el proceso de remoción en masa como un típico flujo de tierra (Fig. 9). Los flujos de tierra se producen en materiales sueltos y finos (limos y arcillas) muy saturados en agua. La masa del flujo de tierra se mueve como un flujo plástico y viscoso, con una fuerte deformación interna. Un incremento en la HN sobre una condición previa de equilibrio induce al sedimento fino a la pérdida de su resistencia al corte (*shear strength*) y precipita la activación de manera casi instantánea del fenómeno de licuefacción (Highland y Bobrowsky 2008). El proceso de licuefacción implica la transformación de un material granular a líquido por el incremento súbito de la presión de poros, asociado a sacudidas sísmicas, saturación del terreno o colapso de suelos arenosos con empaquetamientos abiertos (Smalley 2004). Previamente ha

sido documentada la correlación directa entre episodios de deslizamientos en las barrancas de Paraná de Entre Ríos y períodos de lluvias intensas (Sanguinetti 2006), lo cual sugiere que estos episodios han sido los detonantes en el caso de Santa Elena en 2016.

## ANÁLISIS GEOTÉCNICO

### Unidades geotécnicas

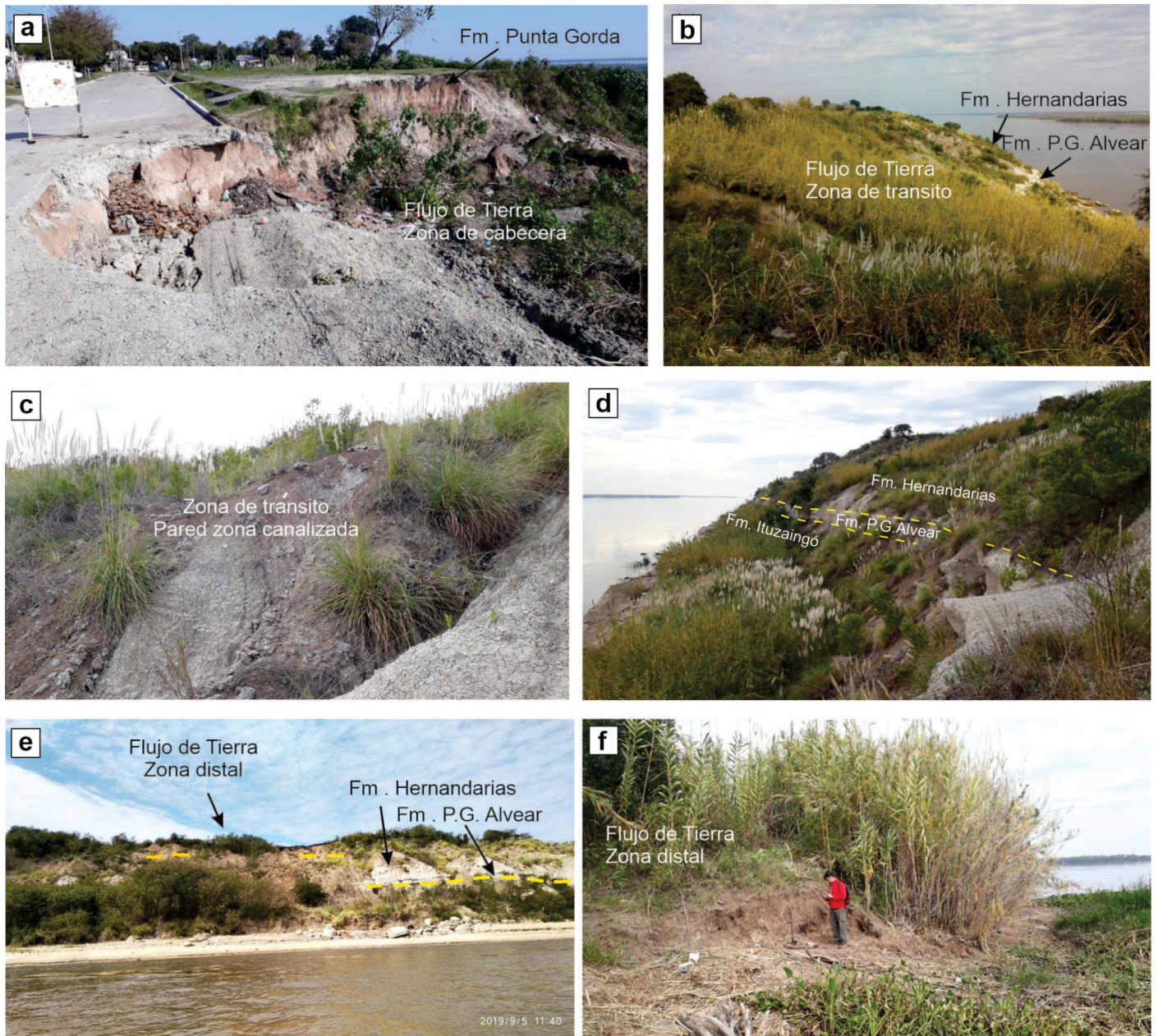
El arreglo en profundidad de los parámetros geotécnicos medidos en las seis perforaciones (Fig. 10) permite reconocer sobre la base de los diferentes índices de consistencia analizados, dos unidades geotécnicas (UG) bien diferenciadas: la Unidad Geotécnica A en la base y la Unidad Geotécnica B en el techo (Fig. 11). La Unidad Geotécnica A está integrada en su totalidad por la Formación Ituzaingó, mientras que la Unidad Geotécnica B está integrada por la Formación Puerto General Alvear en la base y por la Formación Hernandarias. A su vez, la variedad litológica dentro de la Unidad Geotécnica B, expresada por variaciones en la composición granulométrica permite discretizar internamente cuatro niveles.

### Reconocimiento de las Unidades Geotécnicas en el subsuelo

**Pozo S1:** En este sondeo se reconocieron las 2 unidades geotécnicas.

Unidad Geotécnica A: de 60 a 34 m (2.48 a 28.48





**Figura 8.** Principales rasgos diagnósticos generados por el proceso de remoción en masa que afecta a la costa de la ciudad de Santa Elena. a) Cabeecera de proceso de remoción en masa donde se observa la fractura circular y el movimiento de tipo flujo; b) vista panorámica del flujo de material movilizado en la zona de tránsito o transporte; c) Pared lateral de la zona canalizada de tránsito; d) Zona distal próxima al pie de la barranca. Nótese el colapso del material suelo (castaño) que tapiza parcialmente el calcrete (gris claro); e) Vista desde el río donde se observa la zona distal, de depositación que cubre parcialmente el calcrete; f) Depósito distal de remoción en masa que alcanza la costa del río.

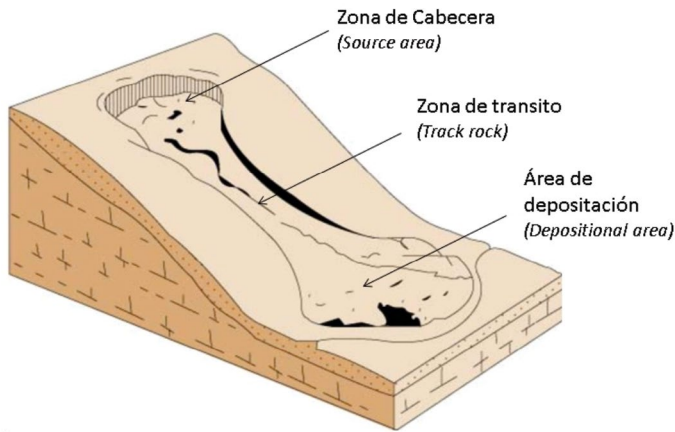
m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión monótona de arena y arena limosa (clasificación USCS: SM y SP-SM), de coloración castaño, con material fino pasante tamiz 200 que no supera el 20%. Presentan alta resistencia a la penetración (NG>50) y nula plasticidad (IP nulo).

Unidad Geotécnica B: de 35 a 0 m (29.48 a 62.48 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión donde alternan limos y arcillas. Los niveles limosos (MH) con respecto a los arcillosos presentan menor plasticidad (IP entre 20-30%). La unidad se puede subdividir a su vez en cuatro niveles: Nivel 1: 35 a 29 m

(29.48-33.48 m.s.n.m.) integrado por limos (MH) de baja plasticidad (IP <30%), Nivel 2: 28 a 16 m (34.48-46.48 m.s.n.m.) integrado por arcillas plásticas castaño claro (IP 30-50%) e intercalación de baja concentración de limos de baja plasticidad (IP<25%). Nivel 3: 15 a 5 m (47.48-57.48 m.s.n.m.) integrado por limos (MH) de baja plasticidad (IP< 30%) y delgados niveles arcillosos de alta plasticidad (IP>35%). Nivel 4: de 4 a 0 m (58.48-62.48 m.s.n.m.) Integrado por arcilla (CH) castaño oscuro y rojizas, de moderada plasticidad (IP entre 30 y 35%).

El nivel freático se detectó en 44.05 m (18.43 m.s.n.m.),





**Figura 9.** Esquema conceptual de un proceso de remoción en masa de tipo Flujo de Tierra donde se reconoce una zona de Cabecera, una zona de Tránsito y una zona de Deposición. Ver texto. Tomado de Highland y Bobrowsky (2008).

ubicándose dentro de la Unidad Geotécnica A. La Unidad Geotécnica B presenta un perfil de humedad natural (HN) relativamente seco (promedio 28,3%), superando el umbral de 30% entre 7 y 8 m (35%), 11 m, entre 17 y 20 m (36%), 26 m, 28 m, 30 m y 32 m. La HN supera el LP en 26, 19 y 11 m.

**Pozo S2:** En este sondeo se reconocieron las 2 unidades geotécnicas:

Unidad Geotécnica A: de 60 a 34 m (2.12 a 28.12 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión monótona de arena limosa muy densa (SM) de coloración castaño. Presenta niveles de material fino pasante tamiz 200 que alcanzan valores de 55%. Presentan alta resistencia a la penetración (NG>50) y nula plasticidad (IP nulo).

Unidad Geotécnica B: de 33 a 0 m (29.12 a 62.12 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión donde alternan limos (MH y ML) y arcillas de alta y baja plasticidad (CH y CL). Esta unidad si bien presenta poca plasticidad, es la que muestra los valores más altos de IP en todo el pozo (IP entre 30 y 44%). Se reconocen los cuatro niveles detectados en el sondeo S1: Nivel 1: de 33 a 27 m (29.12 a 35.12 m.s.n.m.). Es un intervalo integrado por limos (MH y ML) con baja plasticidad (IP entre 15-25%). De 33 a 32 m hay presencia de calcáreos. Nivel 2: de 26 a 15 m (36.12 a 47.12 m.s.n.m.). Intervalo compuesto por un interestratificado de arcilla (CH y CL) de coloración castaño, de moderada plasticidad (IP>30%) y limos elásticos (MH), castaños verdosos de heterogénea plasticidad. Los limos inmediatamente por debajo de los interestratificados arcillosos presentan los valores más altos de IP. Nivel 3: de 14 a 6 m (48.12 a 56.12 m.s.n.m.). Integrado completamente por limos (MH) de baja plasticidad (IP> 30%). Nivel 4: de 5 a 0 m (57.12 a 62.12 m.s.n.m.). Integrado por arcilla (CL y CH) de coloración castaño claro y castaño de baja plasticidad (IP<30%).

El nivel freático se detectó en 43.72 (18,4 m.s.n.m.), ubi-

cado dentro de la Unidad Geotécnica A. La Unidad Geotécnica B presenta un perfil de humedad natural (HN) relativamente húmedo (promedio 30.43%), que supera el 35% hasta la profundidad 20 m. Entre 20 y 29 mbbp disminuye, variando entre 20 y 25% y vuelve a aumentar entre 29 y 33 m a valores de entre 31 y 36%. La HN supera el LP entre 33 y 29 m, 20 y 18 m, 14 y 13 m, 11 y 10 m y 4 y 2 m.

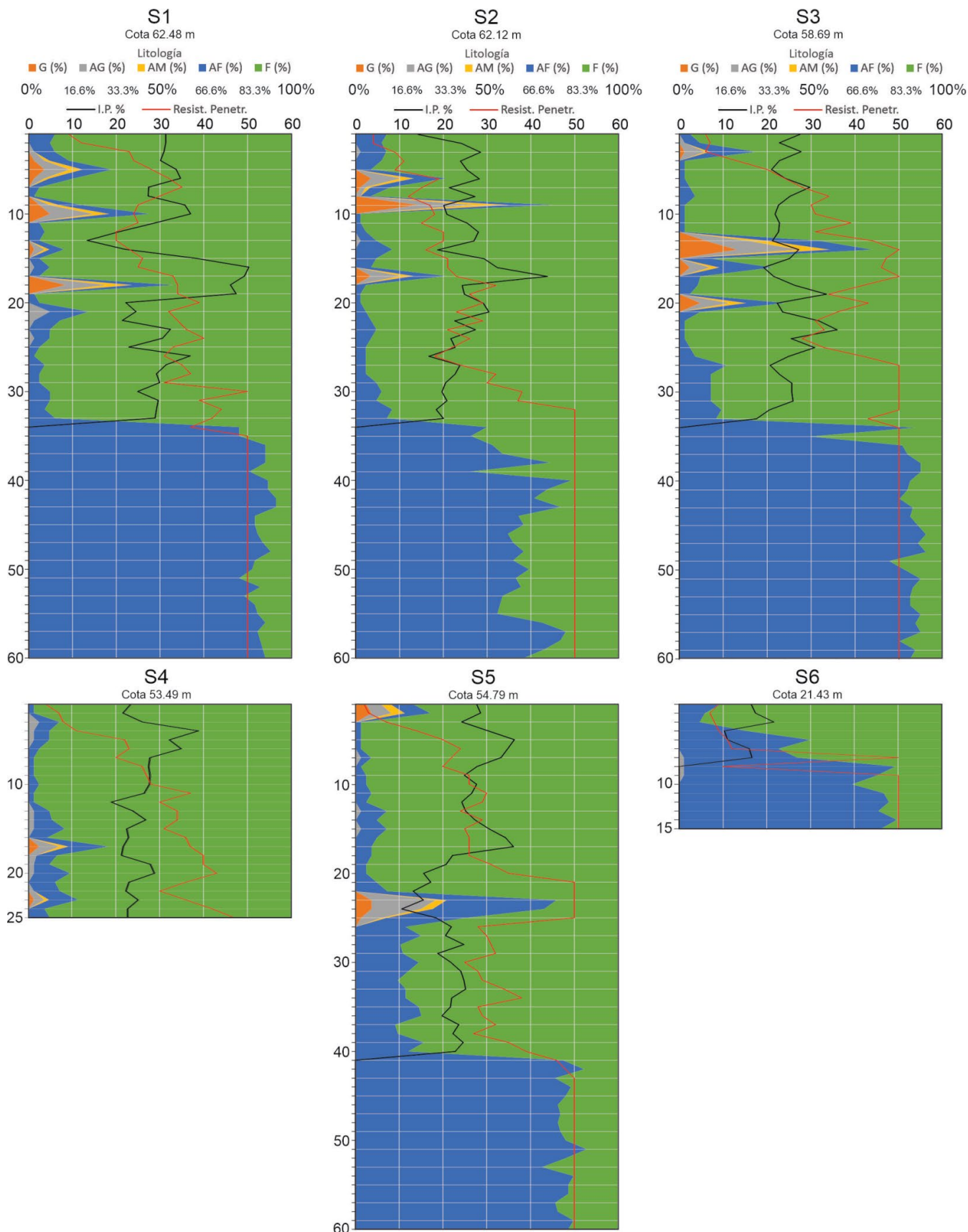
**Pozo S3:** En este sondeo se reconocieron las 2 unidades geotécnicas:

Unidad Geotécnica A: de 60 a 34 m (-1.31 a 24.69 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión monótona de arena (SP-SM y SM) de coloración castaño y castaño grisáceo con poco material fino (pasante tamiz 200 < 20%). Presenta alta resistencia a la penetración (NG>50) y nula plasticidad (IP nulo).

Unidad Geotécnica B: de 33 a 0 m (25.69 a 58.69 m.s.n.m.). Integrada por una sucesión interestratificada de limos (MH y escasos ML) y arcillas (CH) de moderada plasticidad (IP>30%). Se reconocen cuatro niveles: Nivel 1: de 33 a 27 m (25.69 a 31.69 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión de limo (MH) y arcilla (CH y CL) de baja plasticidad (IP< 25%) y alta resistencia a la penetración (NG entre 50 y 42). Nivel 2: de 26 a 12 m (32.69 a 46.69 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión dominada por arcilla (CH), de coloración castaño grisáceo, con intervalos de alta plasticidad (IP 30 y 35%). Intercalan niveles de limo (MH) castaño de baja plasticidad (IP<25%). El tramo superior presenta una alta resistencia a la penetración con valores de NG que alcanzan los 50 golpes. Nivel 3: de 11 a 6 m (47.69 a 52.69 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión monótona de limo (MH) castaños grisáceos de baja plasticidad (IP<25%). Nivel 4: 5 a 0 m (53.69 a 58.69 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión monótona de limo (MH) castaño rojizo y castaño oscuro, de baja plasticidad (IP entre 27 y 23%).

El nivel freático se detectó en 40,19 (18.5 m.s.n.m.), ubicado dentro de la Unidad Geotécnica A. La Unidad Geotécnica B presenta un perfil de humedad natural (HN) relativamente seco (promedio 28.7%), aunque en el tramo superior, de 0 y 14, alcanza un promedio de 33%. El tramo inferior, de 14 y 33 m, presenta menores valores de humedad, no superando el 30% (HN en promedio 25%). La HN supera el LP entre 14 y 13 m, entre 6 y 5 y en los 3 m.

**Pozo S4:** Este sondeo fue perforado sobre el talud integrado por material removilizado. La perforación, de 25 m de profundidad (28.49 m.s.n.m.) no alcanzó la UGA y se identificó solo la parte superior y media de la Unidad Geotécnica B. Dentro de esta unidad se reconocieron cuatro niveles: Nivel 1: de 25 a 21 m (28.49 a 32.49 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión monótona de limo (MH) castaño verdoso de



**Figura 10.** Perfiles geotécnicos de los pozos. Detalles de los parámetros geotécnicos calculados en las seis perforaciones utilizadas para caracterizar el proceso de remoción en masa.



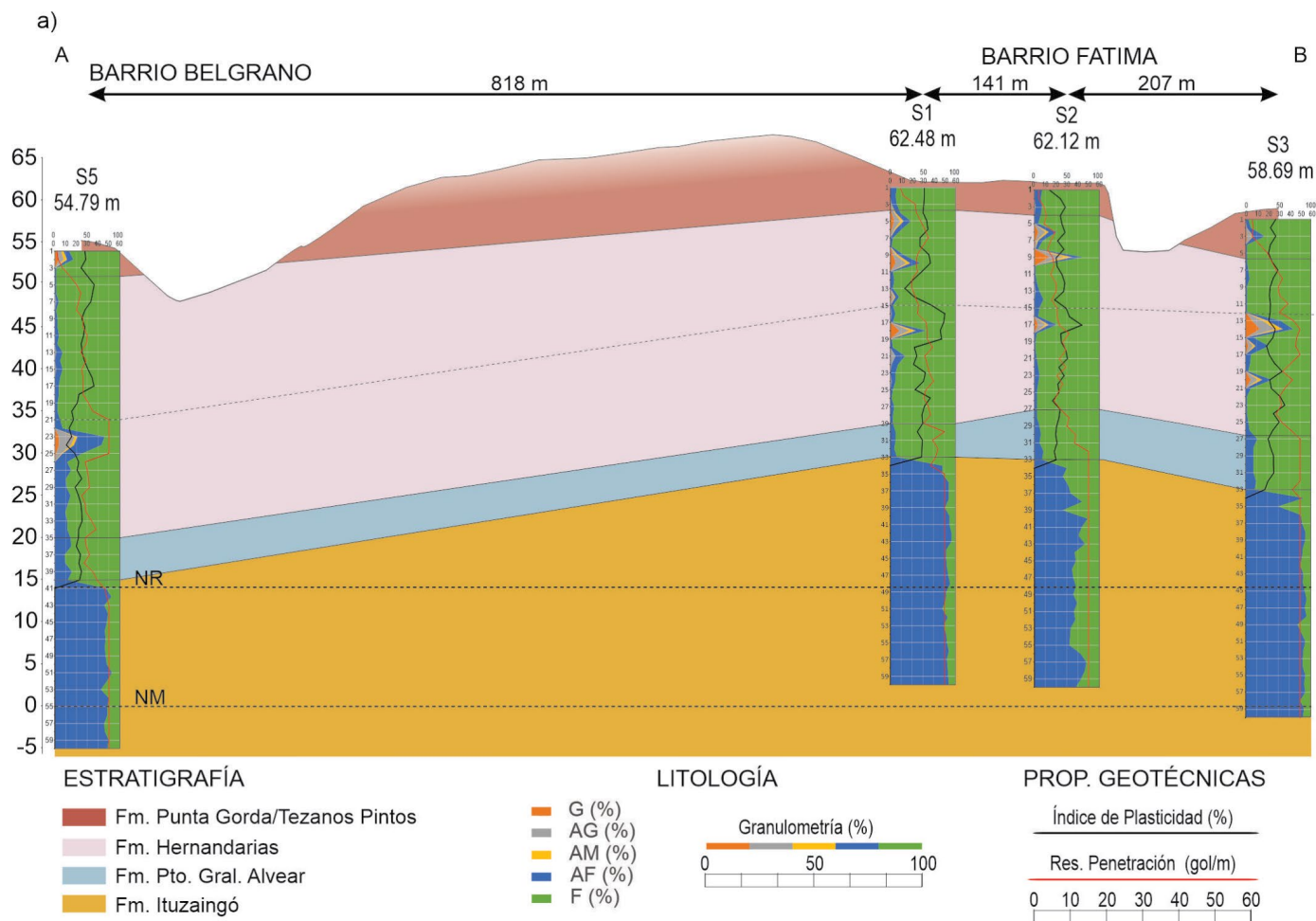
baja plasticidad ( $IP < 25\%$ ). Presenta alta resistencia a la penetración (NG entre 47 y 30). Nivel 2: de 20 a 13 m (33.49 a 40.49 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión interestratificada de arcilla (CH) de coloración castaño grisáceo y baja plasticidad ( $IP < 30\%$ ) con delgadas intercalaciones de limos elásticos (MH). Nivel 3: de 12 a 5 m (41.49 a 48.49 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión monótona de limo (MH). Presenta entre 4 y 7 m un nivel de limo arcilloso de moderada a alta plasticidad (IP entre 32 y 48 %). Nivel 5: de 4 a 0 m (49.49 a 53.49 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión de limo (NH) castaño oscuro de consistencia blanda. Representa el material removilizado que conforma el talud.

No se detectó el nivel freático. La Unidad Geotécnica B presenta un perfil de humedad natural (HN) relativamente seco (promedio 28.96%), aunque en el tramo superior, de 0 a 12 m, alcanzó un promedio de 32.88%. El tramo inferior de 12 y 25 m presenta menores valores de HN, no superando el 30% (promedio 25%). La HN supera el LP en 21 m, 8 m, 6 m y entre los 3 y 0 m.

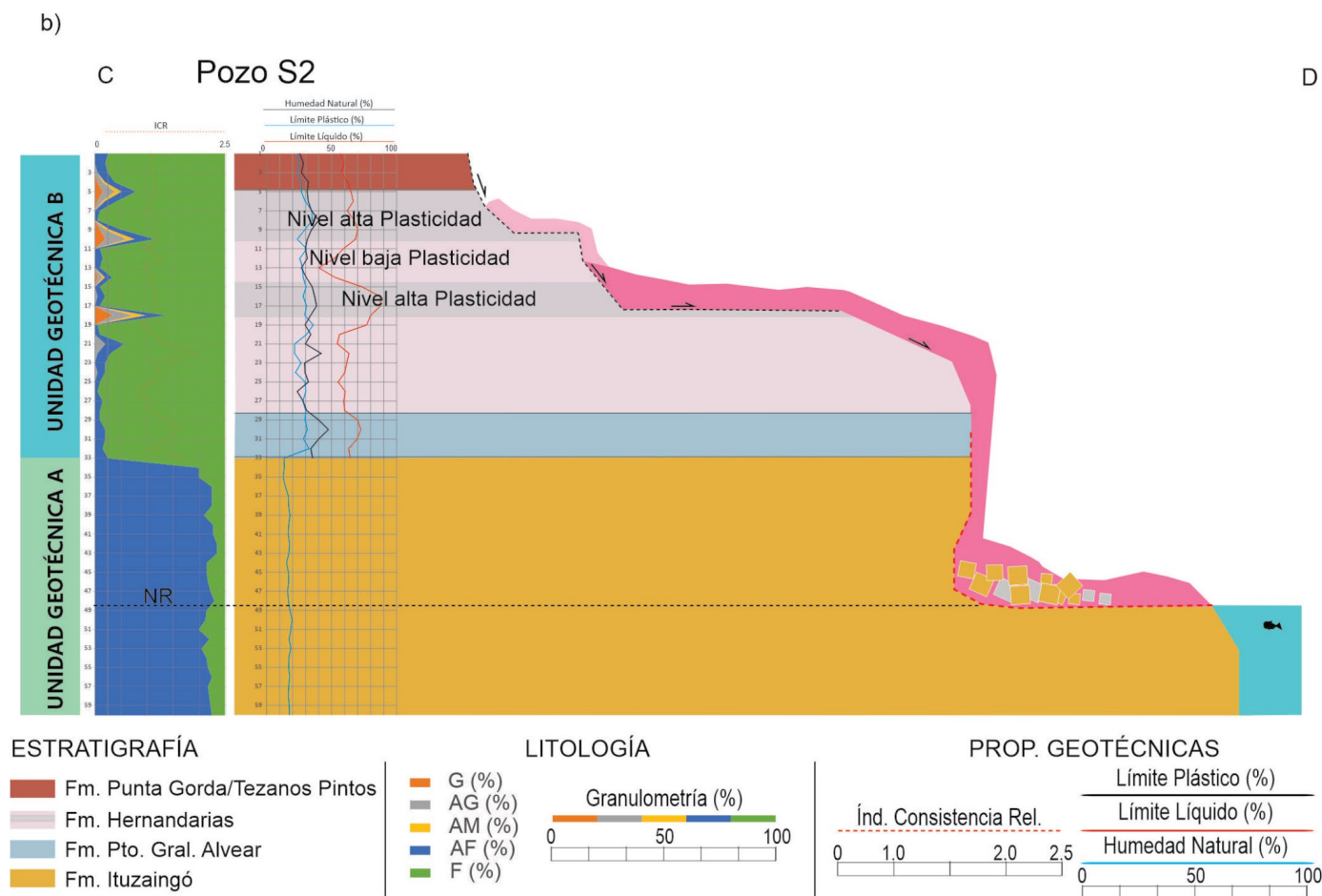
**Pozo S5:** En este pozo se reconocieron las dos unidades geotécnicas:

Unidad Geotécnica A: de 60 a 41 m (-5.21 a 13.79 m.s.n.m.). Corresponde a una sucesión monótona de arena limosa (SM) de coloración castaño, con niveles que no superan el 25% de material fino pasante tamiz 200. Presenta alta resistencia a la penetración ( $NG > 50$ ) y nula plasticidad (IP Nulo).

Unidad Geotécnica B: de 40 a 0 m (14.79 a 54.79 m.s.n.m.). Integrada por una sucesión interestratificada de limo (MH y ML) y arcilla (CH y CL). Porta un nivel de arena (SM) de alta resistencia a la penetración y baja plasticidad (IP entre 10 y 15%). Se reconocen 5 niveles, cuatro de estos se correlacionan con los niveles reconocidos en los pozos perforados en el barrio Fátima. Desde Base a techo: Nivel 1: de 40 a 35 m (14.79 a 19.79 m.s.n.m.). Corresponde a un intervalo constituido por arcilla (CL y CH) de coloración castaño, de moderada resistencia a la penetración (NG entre 40 y 30) baja plasticidad ( $IP > 25\%$ ). Nivel 2: de 36 a 22 m (20.79



**Figura 11.** Cortes geológicos: a) Corte longitudinal paralelo a la costa construido con los pozos perforados sobre zonas no afectadas por remoción en masa. El perfil muestra la correlación estratigráfica de las unidades que atraviesan las perforaciones; b) Corte Transversal a la barranca sobre la posición del pozo S2 (Barrio Fátima).



**Figura 11.** Cortes geológicos: a) Corte longitudinal paralelo a la costa construido con los pozos perforados sobre zonas no afectadas por remoción en masa. El perfil muestra la correlación estratigráfica de las unidades que atraviesan las perforaciones; b) Corte Transversal a la barranca sobre la posición del pozo S2 (Barrio Fátima).

a 32.79 m.s.n.m.). Intervalo constituido por limo (MH y ML) castaño de baja plasticidad. Cerca del techo se encuentra un intervalo arena (SM) y limos (ML) con alta resistencia a la penetración ( $NG > 50$ ) y baja plasticidad ( $IP < 15\%$ ). Nivel 3: de 21 a 9 m (33.79 a 45.79 m.s.n.m.). Integrado por un interestratificado de limo (MH) y arcilla (CH) de coloración castaño. Si bien muestra baja plasticidad, presenta un intervalo entre 17 y 15 mbbp de moderada plasticidad ( $IP$  entre 30 y 40%). Nivel 4: de 8 a 0 m (46.79 a 53.79 m.s.n.m.). Está constituido predominantemente por limo (NH) de coloración castaño. Presenta en el techo un intervalo de arcilla (CH) y limo (MH) de moderada plasticidad ( $IP$  entre 30 y 40%).

El nivel freático se detectó en 4.3 m (50.47 m.s.n.m.) ubicado dentro de la Unidad Geotécnica B. La misma presenta un perfil de humedad natural relativamente húmedo (promedio 29.6%), aunque en el tramo superior, de 0 y 14, alcanza un promedio de 32.27%. El tramo medio, entre 14 y 25 m, presenta valores menores de HN, con promedio de 25%. El tramo inferior, de 25 a 40 m, presenta un valor promedio de

30%. La HN supera el LP entre 40 y 34 m, entre 28 y 26 m, en 21 m, 14 m, 8 m y entre 4 y 0 m.

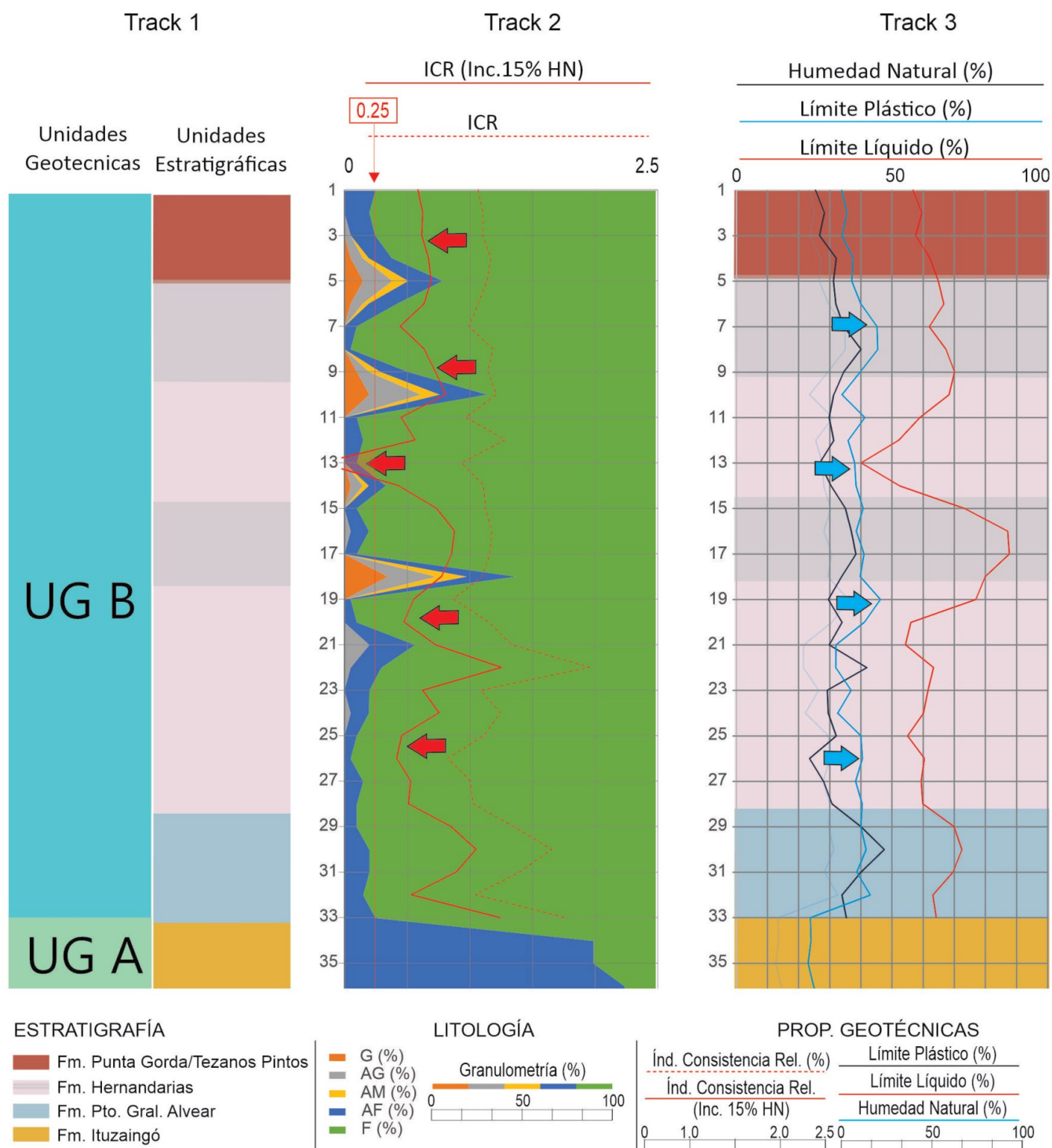
**Pozo S6:** En este sondeo se reconocieron las dos 2 unidades geotécnicas:

Unidad Geotécnica A: de 15 a 8 m (6.43 a 13.43 m.s.n.m.). Intervalo formado por arena limosa (SM) castaño claro, con porcentajes de pasante tamiz 200 entre 18 y 25%. Presenta alta resistencia a la penetración y nula plasticidad ( $IP$  Nulo).

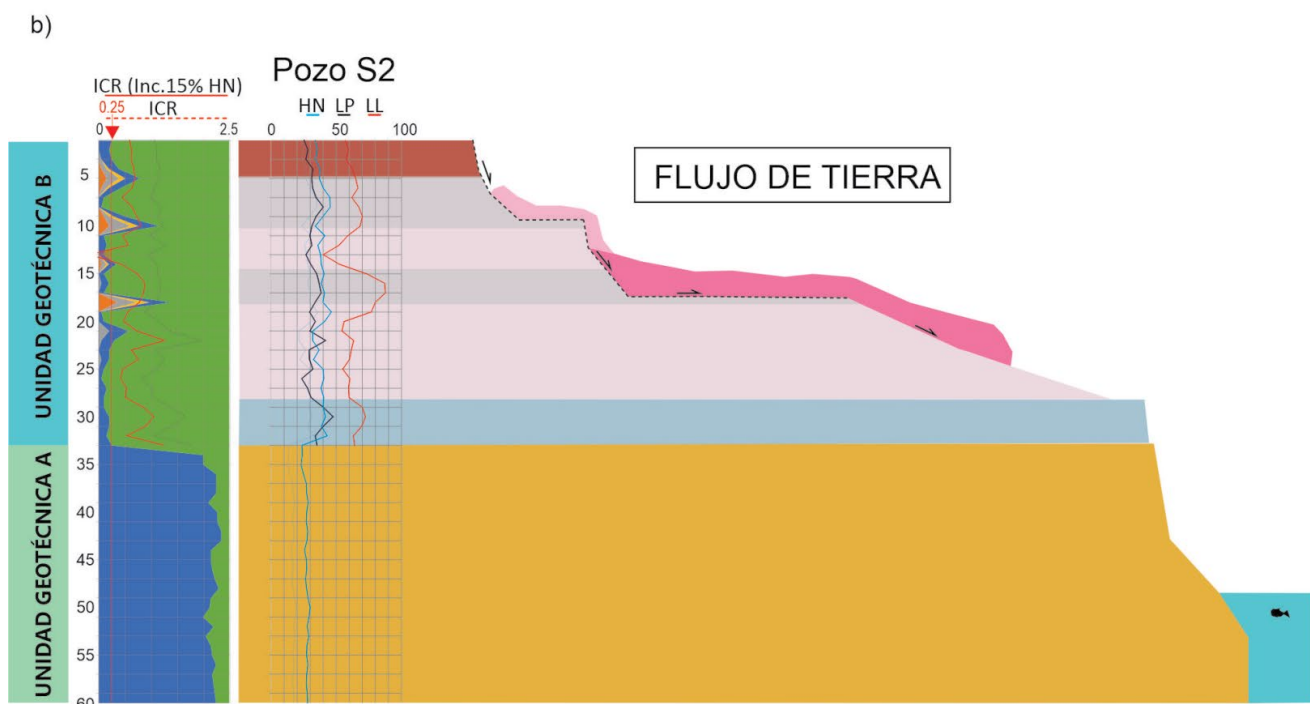
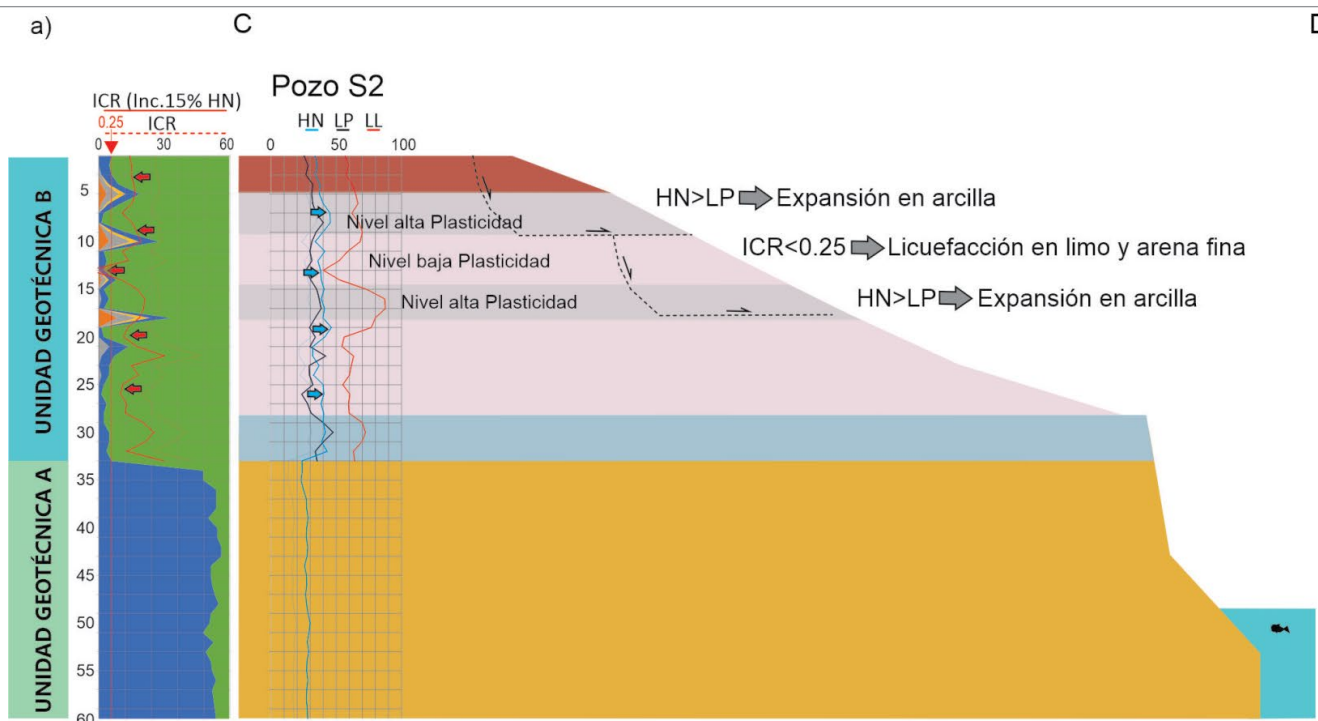
Unidad Geotécnica B: de 7 y 0 m (14.43 y 21.43 m.s.n.m.). Integrado por un interestratificado formado por arcilla (CI), limo (ML y MH) y arena (SC) de coloración castaño claro y de relativa baja plasticidad. Presenta baja resistencia a la penetración ( $NG < 10$ ). Estos parámetros permiten inferir que se trata de un material removilizado por acción de la gravedad (Nivel 5).

El nivel freático se detectó en 3.05 (18.38 m.s.n.m.), ubicado dentro de la UGB. La misma presenta un perfil de humedad natural relativamente húmedo (promedio 29,01%), con un tramo superior, de 0 y 4 m, que alcanza un valor de





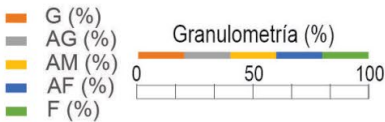
**Figura 12.** Pozos S2. Interpretación de los parámetros geotécnicos. El track 1 muestra las unidades geotécnicas interpretadas mediante los parámetros calculados. El track 2 muestra el porcentaje granulométrico y la curva del Índice de Consistencia Relativa (ICR) calculado con la humedad natural medida en laboratorio (línea llena). Un potencial aumento de humedad natural (en el ejemplo de 15% - track 3) desplaza la curva ICR hacia la izquierda. Valores de ICR que sobrepasan el umbral de 0.25 son altamente susceptibles de sufrir Licuefacción (13 m de profundidad). El track 3 grafica cómo un incremento de humedad natural (curva celeste) aumenta la posibilidad de que el sedimento sobrepase el Límite de Plasticidad e incluso se acerque al Límite Líquido (curva roja).



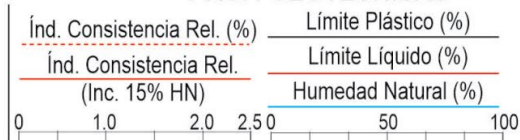
ESTRATIGRAFÍA

- Fm. Punta Gorda/Tezanos Pintos
- Fm. Hernandarias
- Fm. Pto. Gral. Alvear
- Fm. Ituzaingó

LITOLOGÍA

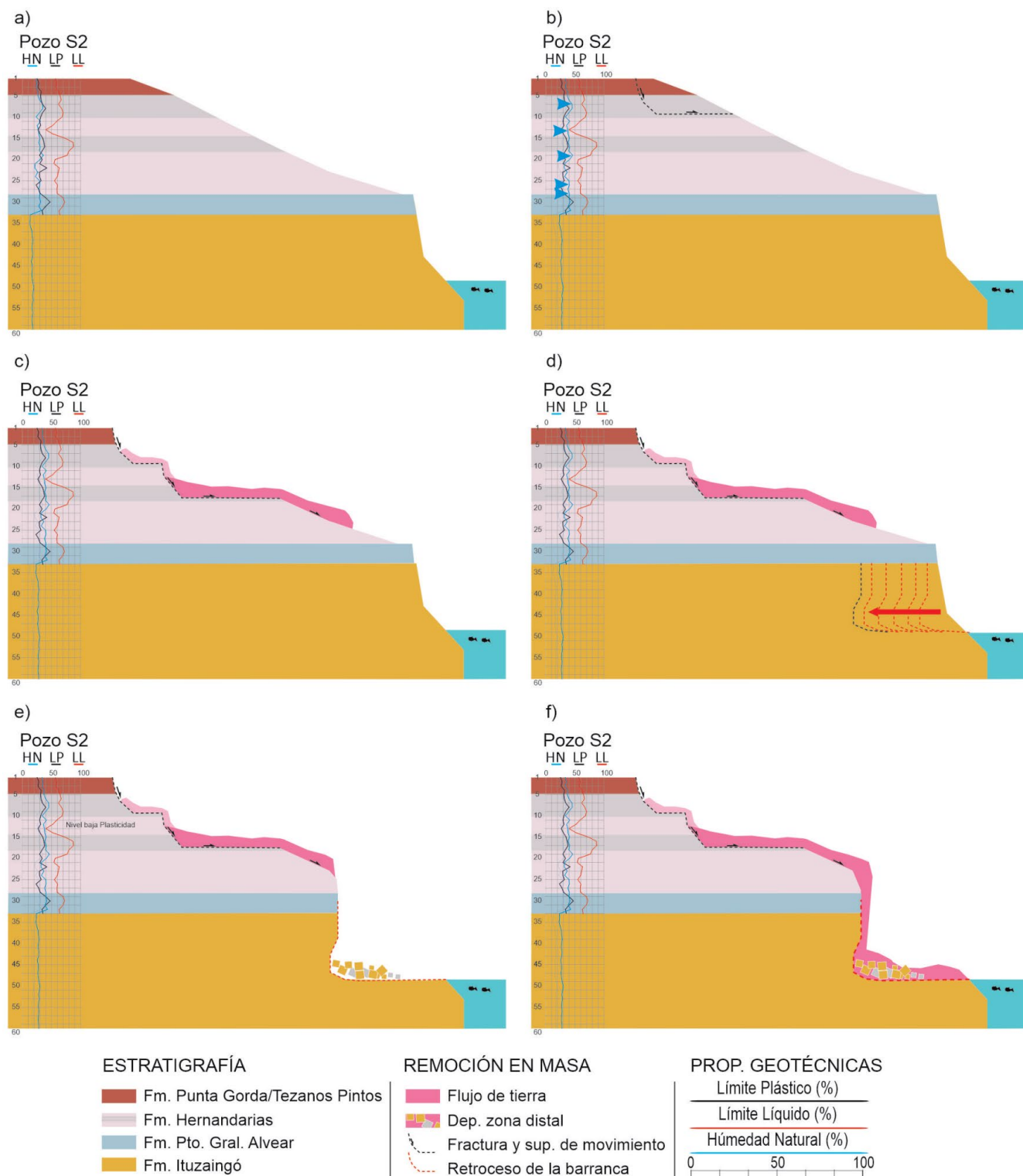


PROP. GEOTÉCNICAS



**Figura 13.** Interpretación geotécnica que explica la remoción en masa de tipo Flujo de Tierra: a) La alternancia de niveles plásticos y elásticos de bajo Índice de Plasticidad promueve la desestabilización de la barranca con la generación de fracturas verticales y superficies de desacoplos entre materiales de diferentes competencias; b) El aumento de humedad natural activa el fenómeno de licuefacción en niveles ricos en limos y arenas finas promoviendo la generación de movimiento gravitacional de tipo Flujo de Tierra.





**Figura 14.** Secuencia de procesos que propician el retroceso de la barranca en la costa de Santa Elena: a) Situación previa a un incremento de humedad natural favorecida por intensas lluvias o infiltraciones anómalas; b) El incremento de humedad natural (desplazamiento de la curva celeste hacia la derecha) cambia el comportamiento mecánico de los niveles plásticos susceptibles a la deformación. Esto induce a la aparición de las primeras fracturas en sectores más rígidos por contraste de competencia entre los distintos niveles; c) El incremento de humedad en niveles limo arenosos sienta las bases para la licuefacción del sedimento, con el consiguiente desplazamiento gravitacional de material a modo de un Flujo de Tierra; d) De manera simultánea la acción del río erosiona la parte basal y rígida de la barranca a través del colapso y derrumbe gravitacional de grandes bloques; e) El colapso origina al pie de la barranca un depósito de bloques de areniscas cementadas (Formación Ituzaingó) y calcretes de la Formación Puerto General Alvear; f) Las sucesivas reactivaciones de los Flujos de Tierra provocan el traspaso del material movilizado por sobre el calcrete, depositándose al pie de la barranca y cubriendo parcialmente los depósitos de bloques.



**Figura 15.** a) Imagen satelital de la zona costera del barrio Fátima con la ubicación de las perforaciones. En la imagen se resaltan las zonas afectadas por los Flujos de Tierra donde el material movilizado desde la zona alta alcanza la costa del río. El material de la zona distal es capturado por el río y asimilado como carga en suspensión. Nótese como la zona sometida a remoción en masa retrocede y ensancha el frente de la barranca (longitud II > longitud I); b) Mapa geológico y geomorfológico interpretado.



32.65% y un tramo inferior, de 4 a 7 m, con un valor promedio de 24.21 %. La HN supera el LP en todo el intervalo.

La Unidad Geotécnica A corresponde al tramo superior de la Formación Ituzaingó, por lo que ninguna de las seis perforaciones alcanzó la base de dicha unidad. La Unidad Geotécnica B corresponde al conjunto de formaciones plio-cuaternarias Puerto General Alvear, Hernandarias y Punta Gorda.

El anexo 2 y la figura 10 detallan y grafican los datos de los pozos. La figura 11 muestra la correlación entre los pozos (Fig. 11a) y el perfil transversal de la barranca en el barrio Fátima (Fig. 11b).

### Reconocimiento de las Unidades Geotécnicas en superficie

Los rasgos estratigráficos y geomorfológicos que conforman las barrancas en la ciudad de Santa Elena permiten reconocer las dos unidades geotécnicas definidas en las perforaciones.

El contraste litológico, junto con el aspecto geomorfológico que presenta la pendiente del talud de la barranca ayuda a la identificación de las unidades en superficie. Ambas unidades están separadas por el calcrete mantiforme, de 2 o 3 m de espesor, que integra la Formación Puerto General Alvear y que constituye la base de la Unidad Geotécnica B. El nivel calcáreo resalta claramente el contraste litológico y por consiguiente el comportamiento geomecánico de las unidades. La Unidad Geotécnica A presenta un talud empinado, subvertical, conforme a un comportamiento competente y frágil. Por el contrario, el talud de la Unidad Geotécnica B presenta un talud inclinado tapizado con material removilizado por flujos gravitacionales.

La Unidad Geotécnica A se extiende desde el pelo de agua hasta aproximadamente el primer tercio de la barranca. Corresponde al término litoestratigráfico Formación Ituzaingó (Iriondo 2010, Brunetto et al. 2013). Es una sucesión predominantemente arenosa, de arena muy fina a fina, de color amarillo y ocre y leve tonalidad rojizo. Intercalan niveles discretos de arcillas grises y castaño claro. Es un material semi-consolidado con una cierta estabilidad estructural, que conforma taludes que alcanzan los 60 a 70° y que superan ampliamente el ángulo de reposo natural de taludes de arena suelta (30°). Este sector de la barranca es sometido a un proceso de erosión hídrica por remoción y captación del material al pie de la barranca. La erosión produce colapso y derrumbe de los bloques más resistentes cementado por carbonato de calcio, siendo estos acumulados en la base de la barranca (Figs. 8e-f y 11).

Por sobre esta unidad se desarrolla el nivel de limos "calcretizados", integrados por limos grises y castaño claro, fuer-

temente cementados por carbonato de calcio epigénico que conforma una trama de tipo "enrejado", aspecto estructural que caracteriza a la unidad. Este intervalo corresponde a la Formación Puerto General Alvear y constituye la base de la UGB. Sobreimpuesto a este nivel continúa una importante sucesión de sedimentos finos, integrado por limo y arcilla de color gris y leve tonalidad castaño claro, con abundantes intercalaciones de niveles de yeso que integra el cuerpo principal de la Unidad Geotécnica B. Se trata de un material moderadamente consolidado, pero altamente cohesivo y plástico en húmedo, que forma taludes de baja pendiente. Este intervalo estratigráfico constituye aproximadamente dos tercios de la barranca. Lo integran la Formación Hernandarias, que representa más del 95% de la unidad, y la Formación Punta Gorda. Ésta última está constituida por limo de color rojo de tonalidades castaño y castaño claro que coronan la unidad (Figs. 8a y 11).

## DISCUSIÓN

### Interpretación geotécnica del proceso de remoción en masa

Los rasgos geomorfológicos reconocidos en la parte media y alta de las barrancas de Santa Elena testifican la presencia de un proceso de remoción con características que definen un tipo flujo de tierra (ver punto 4.1). De acuerdo a Varnes (1978) y Cruden y Varnes (1996) el fenómeno físico que desencadena inestabilidad del talud y precipita la formación de un flujo de tierra es la licuefacción del sedimento fino rico en fracción limo. La licuefacción del sedimento es un proceso físico en el cual la rigidez del depósito sedimentario se reduce por causa de un cambio repentino en la resistencia del material producto de la expulsión de agua intergranular. La expulsión de agua produce un aumento en la presión de los poros con la consiguiente disminución de la resistencia al corte, haciendo colapsar y fluir el material afectado sometido a los efectos de la gravedad. En términos geotécnicos, la potencial presencia de licuefacción podría deducirse a través de dos índices; del Índice de Consistencia Relativa (ICR) y del Índice de Plasticidad (IP) (Holtz y Kovacs 1981).

$$ICR = \frac{(LL - HN)}{IP} \quad (8)$$

$$IP = LL - LP \quad (9)$$

Donde ICR representa el Índice de Consistencia Relativa,

LL el Límite Líquido, HN la Humedad natural, IP el Índice de Plasticidad y LP el Límite Plástico.

El ICR expresa cuán cerca se encuentra la HN del LL en relación al Índice de Plasticidad. Cuando el ICR tiende a cero (e incluso adquiere un valor negativo) el sedimento posee un contenido de HN que se acerca a su LL, haciendo que el sedimento se comporte como un fluido viscoso. En el caso extremo, si la HN sobrepasa el LL, el sedimento pierde totalmente la resistencia al corte y convierte al material sedimentario en un fluido.

Por otro lado, el IP expresa el rango de humedad óptimo para que el sedimento se comporte de manera plástica (e.g., el sedimento se deforma sin perder la cohesión). Las arcillas tienen IP altos que sobrepasan el 40%, mientras que los limos tienen un IP bajo, menor al 15% (Holtz y Kovacs 1981). Si el IP es pequeño se acerca la brecha de humedad entre el LP y LL, por lo que un aumento de HN hace que el sedimento pase bruscamente del estado sólido y elástico al estado de flujo, con una pérdida súbita de la resistencia al corte (*shear strength*).

Valores bajos de ICR e IP favorecen a la licuefacción del sedimento, ante aumentos de humedad. Por lo tanto, en condiciones naturales, un pequeño aumento en la saturación de agua (HN) como consecuencia de intensas lluvias o filtraciones anormales por efectos antrópicos, dentro de depósitos sedimentarios ricos en limos con un IP bajo, disminuye considerablemente el ICR (Fig. 12). Esto potencia la licuefacción con la consiguiente ocurrencia de un flujo de tierra, si el depósito se encuentra sometido a los efectos de la gravedad.

En el caso de las barrancas de Santa Elena, la desestabilización del talud formado sobre la Formación Hernandarias (unidad que integra mayormente la UGB) se precipita debido a la susceptibilidad a la licuefacción que tiene sus niveles ricos en limos interestratificados entre niveles de arcillas y yeso de alta plasticidad. Los niveles de alta plasticidad, al encontrarse sometidos a saturaciones de agua que superan el umbral de plasticidad ( $HN > LP$ ), adquieren un comportamiento plástico, se deforman y se mueven. El movimiento sacude a los niveles ricos en limo saturados de agua y desencadena el fenómeno de licuefacción, haciendo que la columna estratigráfica pierda sustento, colapse y fluya por acción de la gravedad. El colapso genera la fractura externa y semicircular que constituye la cabecera del flujo de tierra (Highland y Bobrowsky 2008). El material en movimiento adquiere el comportamiento de un flujo de material suelto altamente saturado. La ocurrencia de niveles de alta plasticidad dentro de la UGB genera la repetición de sucesivos flujos de tierra en la zona de tránsito, hasta alcanzar la base y el contacto con los calcretes de la Formación Puerto General Alvear. Una vez que los materiales movi-

lizados por los sucesivos flujos de tierra alcanzan el escalón generado por la diferencia de competencia entre la Unidad Geotécnica A y la Unidad Geotécnica B, el material cae y se deposita en la base de la barranca (Fig. 13).

De manera sincrónica, la Formación Ituzaingó que constituye la Unidad Geotécnica A es sometida a un proceso de erosión y retroceso originado por la acción hidráulica del río que socava la base de las barrancas. La inestabilidad de la barranca formada sobre esta unidad, se produce por movimientos de caída de bloque que integran las formaciones Puerto General Alvear e Ituzaingó. El avance del material removilizado por el flujo de tierra alcanza la parte baja de la barranca y cubre los depósitos de caída. La interrelación entre ambos mecanismos de remoción en masa, generadores tanto de rasgos erosivos, de transporte y sedimentación, configuran una línea de costa compleja. En ella alternan sectores de barrancas limpias, en los que se expone la sucesión estratigráfica característica de la zona, con presencia de bloques desprendidos por caída, con sectores de barrancas sucias integrados por materiales movilizados por flujos de tierra provenientes de la formación Hernandarias y transportados hasta la parte bajo de la costa (Figs. 8d-f y 14).

Si bien la observación de campo y la interpretación del proceso de remoción en masa que interviene en Santa Elena muestra similitud con las conclusiones alcanzadas en los estudios previos (Sanguinetti, 2005), las perforaciones y los datos geotécnicos del presente estudio posibilitaron un mayor alcance del análisis. Permitieron un mejor ajuste para definir el modelo de remoción en masa que produce el retroceso de las barrancas de Santa Elena. En los estudios anteriores se interpretó que la zona con preponderancia para formar flujos de tierra era exclusivamente el nivel sedimentario integrado por limos loésicos de la parte superior de la Unidad Geotécnica B (Formación Punta Gorda). Se propuso que este nivel se descalza y se moviliza sobre las arcillas de Formación Hernandarias originando un flujo de tierra en forma de lenguas de 3-4 m de espesor y 100 m de longitud (Sanguinetti 2005). Las perforaciones permitieron reconocer niveles de alta plasticidad dentro de la Formación Hernandarias que actúan como zonas de alta movilidad, desencadenante del flujo de tierra cuando la HN supera el LP ( $HN > LP$ ). En este trabajo se concluye que la zona favorable para generar movilización de tierra incluye a toda la Unidad Geotécnica B. En consecuencia, los pulsos de flujos de tierra son susceptibles de ocurrir dentro de una columna de 30-40 m de espesor, y no sólo los cuspidales 6-10 m de la Unidad Geotécnica B como se proponía anteriormente (Sanguinetti 2005). Esto explicaría el gran volumen de material movido en la zona de transferencia o transporte, notablemente mayor al involucrado en la zona de



cabecera (cuerpos de remoción de hasta 165 m de longitud).

Por otra parte, y en correspondencia con lo observado por Sanguinetti (2005), el presente estudio permite afirmar que la principal causa que dispara el flujo de tierra es el exceso hídrico (HN), vinculado a la infiltración de agua de origen antrópico provenientes de la ciudad. Las fugas y pérdidas en los sistemas de servicios parecen ser más preponderantes que las características hidráulicas de los acuíferos semiconfinados que contienen las formaciones Hernandarias e Ituzaingó. En las Figuras 1b, 4 y 15, puede observarse que el sector donde han ocurrido los flujos de tierra coincide con el área urbanizada. Hacia el Norte, la barranca es más estable y ha sido menos afectada por este tipo de fenómenos de remoción en masa. Sobre este nivel de base de condición de humedad de los sedimentos, las precipitaciones ocurridas durante la temporada de lluvias durante un evento ENSO fuerte como fue el registrado en 2015-2016 (NOAA, 2022), dispararon los deslizamientos durante 2016 en Santa Elena.

## CONCLUSIÓN

El retroceso de las barrancas de Santa Elena es el producto combinado de dos procesos de remoción en masa, (1) por caída (*fall*) de bloques en la parte inferior de la barranca (Unidad Geotécnica A) y (2) por movimiento de tipo Flujo de Tierra (*earthflow*) en la parte superior (Unidad Geotécnica B). Este último proceso de remoción en masa es el que representa una amenaza para la población localizada en cercanías de las barrancas, tanto en el barrio Fátima como en el barrio Belgrano (Fig. 15).

Los datos aportados por las perforaciones muestran que los materiales finos que integran la Unidad Geotécnica B (Formación Hernandarias) contienen intercalaciones de materiales finos de alta y baja plasticidad. Al encontrarse éstos bajo la influencia de una saturación de agua (o humedad natural - HN) anormalmente alta, la humedad supera el umbral de resistencia mecánica ( $HN > LP$ ), provocando que el sedimento se mueva y licúe en los niveles ricos en limos. Finalmente precipita el colapso y el movimiento gravitacional cuando el material deformado se encuentra bajo la influencia de la gravedad.

Los pozos próximos a la zona urbana (S1, S2, S4 y S5) presentan umbrales de HN relativamente altos en toda la Unidad Geotécnica B (>30%), situación que marca un aporte continuo de agua antrópica. El aumento de la humedad ocasiona en algunos sectores de la columna casos que la HN supere el LP ( $Hn > LP$ ) desencadene finalmente el flujo de

tierra. Esto explicaría la alta frecuencia de flujos de tierra en el entorno a las zonas urbanas como en los barrios Fátima y Belgrano. El sondeo S3 levemente alejado del ejido urbano muestra un gradiente inverso de HN denotando un aporte superficial por acción antrópica.

El análisis de imágenes ópticas y de Modelos Digitales de Elevación (DEM) muestra expansión retrocedente del intervalo estratigráfico Unidad Geotécnica B en el sector contiguo al barrio Fátima, en contraste al sector no urbanizado localizado al norte del barrio donde se aprecia mayor estabilidad del talud en el tiempo. Este punto demuestra el efecto directo de la acción antrópica.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Estabilización de Barrancas de las localidades de Diamante y Santa Elena, 2019, financiado por el Consejo Federal de Inversiones (CFI) en convenio con la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos.

Agradecemos al Ing. Cristián Gietz por la confianza y permitirnos participar del proyecto sobre los deslizamientos de la provincia de Entre Ríos. Agradecemos al Dr. Eduardo Díaz por guiarnos en el proyecto y las enriquecedoras discusiones. Agradecemos a la Mg.Sc. M. Cecilia Zalazar por la elaboración de productos finales de geomorfometría y cartografía.

## REFERENCIAS

- Aceñolaza, F.G. 2007. Geología y recursos geológicos de la Mesopotamia Argentina. INSUGEO. Serie Correlación Geológica 22: 1-160, San Miguel de Tucumán.
- Borgatti, L. y Soldati, M. 2010. Landslides and climate change. En: Alcántara-Ayala, I. y Goudie, A.S. (eds.), *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge University Press, 87-95, Cambridge.
- Brandoni, D. 2013. Los mamíferos continentales del "Mesopotamiense" (Mioceno Tardío) de Entre Ríos, Argentina. *Diversidad, edad y paleobiogeografía*. En: Brandoni D. y Noriega J.I. (eds.), *El Neógeno de la Mesopotamia argentina*. Asociación Paleontológica Argentina, Publicación Especial 14: 179-191, Ciudad autónoma de Buenos Aires.
- Brunetto, E., Noriega, J.I. y Brandoni, D. 2013. Sedimentología, estratigrafía y edad de la Formación Ituzaingó en la Provincia de Entre Ríos, Argentina. En: Brandoni D. y Noriega J.I. (eds.), *El Neógeno de la Mesopotamia argentina*. Asociación Paleontológica Argentina, Publicación Especial 14: 13-27, Ciudad autónoma de Buenos Aires.
- Brunetto, E., Sobrero, F. S. y Gimenez, M. E. 2019a. Quaternary defor-

- mation and stress field in the Río de la Plata Craton (Southeastern South America). *Journal of South American Earth Sciences* 91: 332-351.
- Brunetto, E., Zucol, A.F., Schmidt, G.I., Noriega, J.I., Patterer, N.I., Brea, M. y Franco, M.J. 2019b. Estratigrafía del Plioceno de la Mesopotamia Argentina 263. *Opera lilloana* 52: 263-286.
- Candela, A.M., Noriega, J.I. y Reguero, M.A. 2007. The first Pliocene Mammals from the Northeast (Mesopotamia) of Argentina: Biostratigraphic and Paleoenvironmental significance. *Journal of Vertebrate Paleontology* 27 (2): 476-483.
- Consejo Federal de Inversiones 2019. Estabilización de Barrancas en las localidades de Diamante y Santa Elena - Estudios básicos de Santa Elena, Provincia de Entre Ríos (inédito), Tomo I: 131 p. Paraná.
- Crozier, M.J. 2004. Landslides. En: Goudie, A.S. (ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge: 605-608, London.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. 1996. Landslide types and processes. En: Turner A.K. y Schuster R.L. (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Research Council, Transportation and Research Board 247: 36-75, Washington D.C.
- Díaz, E.L., Dalla Costa, O.A. y Sanguinetti, J.A. 2005. Relaciones entre niveles acuíferos y deslizamientos de barrancas en Entre Ríos. Soluciones mediante sistemas drenantes. Informe técnico (inédito), 12 p., Entre Ríos.
- Highland, L.M. y Bobrowsky, P. 2008. *The Landslide Handbook. A Guide to Understanding Landslides* 1325, 60 p., Virginia.
- Holtz, R.D. y Kovacs, W.D. 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall Editor, 733 p., New Jersey.
- Iriondo, M.H. 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. *Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, 11: 125-141.
- Iriondo, M. 1998. Excursion Guide: Province of Entre Ríos. *International Joint Field Meeting: Loess in Argentina: Temperate and Tropical*. INQUA-PASHCLIP-UNER-CECOAL (inédito), 3: 19 p., Paraná.
- Iriondo, M.H. 2010. *Geología del Cuaternario en la Argentina*. Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino, 437 p. Santa Fe.
- Iriondo, M.H. y Kröhling, D.M. 2007. La Formación El Palmar (Informalmente Formación Salto Chico) y el Acuífero San Salvador, Entre Ríos. V Congreso Argentino de Hidrogeología, Volumen extendido: 433-441, Paraná.
- Iriondo, M.H. y Kröhling, D. 2008. Cambios ambientales en la cuenca del Uruguay (desde el Presente hasta dos millones de años atrás). *Universidad Nacional del Litoral*, 358 p. Santa Fe.
- Kröhling, D.M. 2001. Quaternary loess-paleosol sequence of southwestern Entre Ríos Province, Northern Pampa, Argentina. VI International Symposium and field workshop on paleopedology. *Universidad Autónoma de México, Abstracts: 27-28*, México.
- Kröhling, D., Passeggi, E., Zucol, A., Erra, G., Aguirre, M., Miquel, S., González, A., y Brea, M. 2010. Multidisciplinary analysis of the last glacial loess at the NE of the Pampean aeolian system. XVIII International Sedimentological Congress: 518. Mendoza.
- Kruck, W., Helms, F., Geyh, M.A., Suriano, J.M., Marengo, H.G. y Peireyra, F. 2011. Late Pleistocene-Holocene History of Chaco-Pampa Sediments in Argentina and Paraguay. *E&G Quaternary Science Journal*, 60: 188-202.
- Pérez, L. 2013. Nuevo aporte al conocimiento de la edad de la Formación Paraná, Mioceno de la provincia de Entre Ríos, Argentina. En: Brandoni D. y Noriega J.I. (eds.), *El Neógeno de la Mesopotamia argentina*. Asociación Paleontológica Argentina, *Publicación Especial* 14: 7-12, Ciudad autónoma de Buenos Aires.
- Sanguinetti, J.A. 2005. Sobre geomorfología, mecanismos de deslizamientos y loess en Santa Elena. Informe técnico (inédito), 7 p., Entre Ríos.
- Sanguinetti, J.A. 2006. Relación entre períodos lluviosos y deslizamientos en zonas de barrancas. Informe técnico (inédito), 3 p., Entre Ríos.
- Smalley 2004. Liquefaction. En: Goudie, A.S. (ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge: 624-625, London.
- Varnes, D.J. 1978. Slope Movement Types and Processes. En Schuster R.L. y Krizek R.J. (eds.), *Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board. National Academy of Science, *Special Report*: 11-33, Washington D.C.