



Identificación de unidades ambientales para la construcción de territorios sustentables a partir de estudios geológicos

María A. GRÍGOLO¹, Aixa I. RODRÍGUEZ^{1,2}, Antonella SOTTILE¹, María A. PITTALUGA³, Marcelo GONZÁLEZ¹, Patricia MARTINEZ¹, Federico LINCE KLINGER¹

¹ CONICET - Universidad Nacional de San Juan- Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNSJ-FCEFYN)- Instituto Geofísico Sismológico Ing."F.S. Volponi "(IGSV).

² CONICET- Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPha)

³ UNSJ-FCEFYN- Instituto de Geología "Dr. Emiliano P. Aparicio" (INGEO) - Gabinete de Geología Ambiental

Email: María Agustina Grígolo (ago.grigolo@gmail.com) Aixa I. Rodríguez (aixarodriguez@conicet.gov.ar); Antonella Sottile (antonella.sottile.1989@gmail.com); María A. Pittaluga (mapitta70@gmail.com); Marcelo González (gmarcelo804@gmail.com); Patricia Martínez (patricia.signos@gmail.com); Federico Lince Klinger (flinceklinger@gmail.com).

Editor: Ricardo A. Astini

Recibido: 14 de Mayo de 2023

Aceptado: 14 de Marzo de 2024

RESUMEN

En este trabajo se presenta un caso de estudio en el territorio de Angaco, ubicado al norte del Valle de Tulum, provincia de San Juan. En este territorio existen grandes extensiones de terrenos incultos, con potencial para el crecimiento urbano-rural. La falta de planificación y conocimiento del medio físico ha generado la ocupación antrópica de zonas afectadas por problemas de desertificación, anegamiento, contaminación, incendios, salinización, licuefacción de suelos, fenómenos de remoción en masa y sismicidad. El objetivo del trabajo consiste en realizar un diagnóstico del medio físico a fin de definir unidades ambientales (UA) que permitan gestionar el uso del territorio. Debido a las condiciones estructurales de la región de estudio, además de los estudios de Geología del Cuaternario, se incorpora el conocimiento del subsuelo como variable de control para definir estas unidades. Para ello se realizaron mediciones geofísicas gravimétricas y magnetométricas de los cuales se interpretaron fallas y estructuras que permitieron definir cuatro unidades ambientales, con sus sobrecargas y valor ambiental. El conocimiento detallado del medio físico dentro del Ordenamiento Territorial, a través de la geología permitió establecer lineamientos de manejo del suelo y prever posibles escenarios de planificación.

Palabras clave: ordenamiento territorial, geología del Cuaternario, rural, sobrecarga, geofísica.

ABSTRACT

Environmental Units Identification for sustainable territories, based on geological studies.

This paper presents a case study of the Angaco territory, located to the north of the Tulum Valley in the province of San Juan. Within this territory, there are exist vast expanses of uncultivated land with the potential for urban-rural growth. Insufficient planning and a lack of comprehension of the physical environment have resulted in anthropogenic occupation of regions impacted by desertification, flooding, pollution, fires, salinization, soil liquefaction, landslides, and seismic activity. The objective of this study is to conduct a diagnosis evaluation of the physical environment to define environmental units (EUs) that enable effective land management. Due to the structural conditions of the study region, in addition to Quaternary Geology studies, subsoil knowledge is incorporated as a control variable to define these units. For this purpose, gravimetric and magnetometric geophysical measurements were executed, providing data for the interpretation of faults and structures. This interpretation enabled the identification of four environmental units, complete with their overlays and environmental value. The detailed understanding of the physical environment within the context of Land-use Planning, facilitated by geological insights, has allowed for the formulation of soil management directives and the foresight of potential planning scenarios.

Keywords: Land-use Planning, Quaternary Geology, Rural, Overloads, Geophysics.

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista geológico la provincia de San Juan (Fig. 1) se desarrolla en el frente de deformación activo de los Andes Centrales, dentro del segmento de subducción subhorizontal pampeano (Ramos et al. 2002) (Fig. 2a) con un régimen compresional principal, conformando un área de elevada actividad sísmica, de las mayores conocidas en el territorio argentino (Costa et al. 2006, 2020). Esta condición tectónica ha intervenido en la distribución de los recursos como el agua y el suelo en el Valle de Tulum (Suvires 2004, Rodríguez et al. 2016, 2018, 2021).

Existen sistemas de fallas que afectan el basamento impermeable plioceno de las cuencas hidrogeológicas y a los sedimentos más jóvenes que rellenan la cuenca, afectando total o parcialmente el movimiento del agua (Rocca 1969). Las más importantes son el sistema de fallas de Tulum y la falla de Ullúm-Zonda (Rocca 1969, Zambrano y Suvires 2008).

El departamento Angaco se ubica al norte del Valle del Tulum. Allí se observa, en los últimos años, una tendencia de crecimiento poblacional y se advierte la presencia de grandes extensiones de terrenos incultos en áreas de alta peligrosidad natural, que se están destinando para los nuevos usos requeridos: crecimiento urbano-rural, industrial y recreativo. El ordenamiento territorial (OT) frente al problema detectado se considera relevante y necesario. Éste permite la ocupación ordenada y uso sostenible del territorio.

El medio físico, dentro de la dimensión ambiental, es el soporte físico del sistema territorial. El conocimiento de ese medio soporte garantiza la sostenibilidad ambiental, ya que ofrece las bases para saber dónde habitar, evitando la contaminación, el deterioro y desaparición de recursos, afectación de la vida en cualquiera de sus formas.

En la actualidad la falta de planificación y usos del suelo del territorio, ha generado la aparición de algunas problemáticas como: suelos agotados y explotados por malas prácticas, que llevan a una disminución en el cultivo anual, zonas afectadas por crecientes o anegamientos, problemas de desertificación, salinización, contaminación por residuos sólidos urbanos, incendios, bienes afectados por licuefacción, deslizamientos de detritos y degradación del paisaje (PLAM SJ 2023).

En zonas con sismicidad activa como la presente, se ha demostrado que el estudio del medio físico, debe incorporar estudios de subsuelo y aspectos geológicos relevantes como presencia de fallas, depocentros tectónicos, altos, etc., ya que los mismos controlan no sólo los peligros naturales, sino también a los recursos que necesita la población para desarrollarse social, económica y culturalmente, como el recurso hídrico

subterráneo, superficial, los suelos, el paisaje, los recursos mineros, entre otros (Rodríguez et al. 2021). La geomorfología y la estructura regional del área ejercen control sobre la configuración de la cuenca de agua subterránea de donde se extrae agua para consumo y actividades económicas. Ambos determinan el sentido de circulación del agua subterránea dando lugar a un acuífero libre instalado en el abanico aluvial y a un acuífero confinado en la antigua planicie aluvial (Rocca 1969). De este modo, las unidades geomorfológicas e hidrogeológicas se expresan con diferencias granulométricas, que aparte de influir en las características de los acuíferos que contienen, lo hacen también en las texturas y en el régimen de humedad de algunos perfiles de suelos del Valle de Tulum (Suvires 2004).

Teniendo en cuenta esto, en la presente investigación se estudió la dimensión ambiental a partir de observaciones, análisis e interpretaciones geológicas como base de conocimiento para la construcción de territorios sustentables. Se realizaron mapeos geomorfológicos con identificación de la red de drenaje con cauces, paleocauces y suelos. Se efectuaron mediciones geofísicas gravimétricas y magnetométricas regionales y locales para el estudio de estructuras en el subsuelo. La integración de los datos sobre el medio físico mencionados permitió delimitar diferentes Unidades Ambientales (UA) para definir las bases del OT del Departamento de Angaco. Los resultados de esta investigación contribuyen a generar lineamientos para las autoridades a cargo de la planificación territorial. Se brinda información sobre los usos más adecuados en el territorio de Angaco: áreas de conservación, suministro de agua, suelos para proveer de alimentos, áreas para industrias, sitios de preservación del patrimonio geológico, paisajístico, sectores para actividades recreativas y desarrollo urbano-rural. Todo ello teniendo en cuenta las sobrecargas naturales intrínsecas del medio, lo cual permitirá gestionar el uso del suelo y los riesgos socio-naturales que puedan desarrollarse y garantizar el bienestar y sostenibilidad del medio de quienes lo habitan.

ÁREA DE ESTUDIO

El caso de estudio que se presenta se localiza en el Departamento Angaco, y se ubica en el piedemonte occidental de la Sierra Pie de Palo y en la zona distal norte del abanico aluvial del Río San Juan en el valle de Tulum (Fig. 1). Angaco es una localidad rural agrícola productiva. En el 2010 albergaba una población de 8.125 habitantes (INDEC 2010), mientras que la población actual es de 10.145 habitantes (INDEC 2022). La principal actividad económica es la agricultura, especialmen-

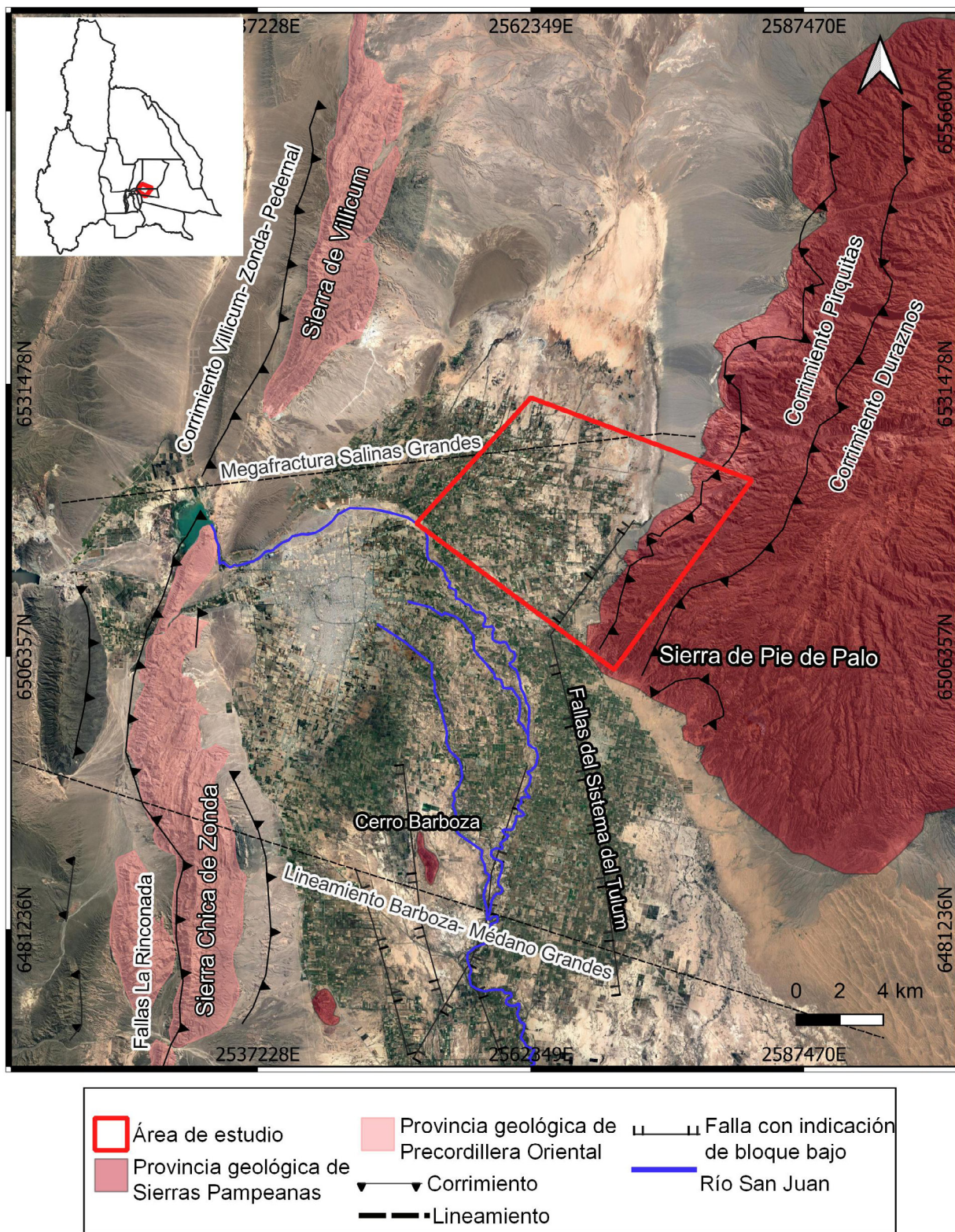


Figura 1: Ubicación del área de estudio, en el piedemonte occidental de la Sierra Pie de Palo y en la zona distal norte del abanico aluvial del Río San Juan en el valle de Tulum. Marco tectónico del Valle de Tulum. Los límites este y oeste corresponden a las provincias de Sierras Pampeanas y Precordillera respectivamente. (Rodríguez 2021). Se muestran los principales lineamientos y fallas cuaternarias en el valle de Tulum (modificado de Perucca y Ruiz 2014, Zambrano y Suvires 2008), especialmente el corrimiento principal Villicum-Zonda-Pedernal afectando Precordillera y diversos corrimientos en la Sierra Pie de Palo. En el centro del valle se ubica el sistema de fallas de Tulum (Zambrano y Suvires 2008) las dos líneas juntas indican el bloque hundido por las fallas. Además, se indican algunas fallas neotectónicas más importantes con rasgos lineales afectando el piedemonte de Precordillera Oriental.

te la vitivinicultura, también se destacan plantaciones de ajo, cebolla, melones, olivos y otros estacionales.

La región se caracteriza por un clima árido, las precipitaciones son inferiores a los 100 mm por año. Las temperaturas medias varían entre 18°C y 16°C. Los máximos de temperaturas absolutas poseen valores superiores a los 45°C, mientras que la región más fría posee valores inferiores a los 11°C bajo cero. El régimen hídrico del valle es netamente deficitario pues la evaporación excede ampliamente a las precipitaciones pluviales. Bajo determinadas condiciones atmosféricas del período comprendido entre mayo y noviembre de cada año, se suele desarrollar el viento Zonda en los valles del flanco oriental de la Cordillera de Los Andes (Poblete y Minetti 1999).

MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO

En el valle de Tulum la actividad tectónica está representada principalmente por el sistema de fallas de Tulum (Fig. 1). Se trata de fallas inversas de dirección predominante NNE-SSO (Zambrano y Suvires 2008), que limitan con los bloques fragmentados del antepaís, generando cuencas flexurales (Rodríguez 2016). Los bloques tectónicos levantados por las fallas afectan a los depósitos superficiales como los campos de dunas que se localizan por encima de los bloques elevados o las paleociénagas que se localizaban en los depocentros, además, se observa un control en los recursos hídricos superficiales (Rodríguez et al. 2018), subterráneos (Rocca 1969) y en los suelos (Suvires 2004).

La deformación neotectónica se concentra en los bordes del valle de Tulum, en piedemontes y sierras, principalmente a lo largo de las secuencias del Plioceno-Pleistoceno de Precordillera Oriental y en el piedemonte de Sierra Pie de Palo. Precordillera exhibe una falla de empuje principal hacia el Oeste, el corrimiento Villicum-Zonda-Pedernal. En los piedemontes la deformación cuaternaria se desarrolla con rasgos rectilíneos y fallas paralelas que coinciden con los planos de estratificación, y se explican por el mecanismo de flexo-deslizamiento (Costa et al. 1999, Krugh y Meigs 2001). Las fallas La Laja, Marquesado, La Rinconada, Los Berros y fallas de Cerro Salinas (Bastías et al. 1984, Martos 1987, Bastías et al. 1990) son las estructuras más significativas que muestran este estilo de deformación (Costa et al. 2006).

Suvires (2010) caracteriza a la Sierra de Pie de Palo como un gran braquianticlinal de orientación NNE, con un flanco oriental inclinado y uno occidental más suave. Dado que las rocas del basamento poseen una estructura frágil, este plegamiento se resuelve mediante centenares de fallas menores.

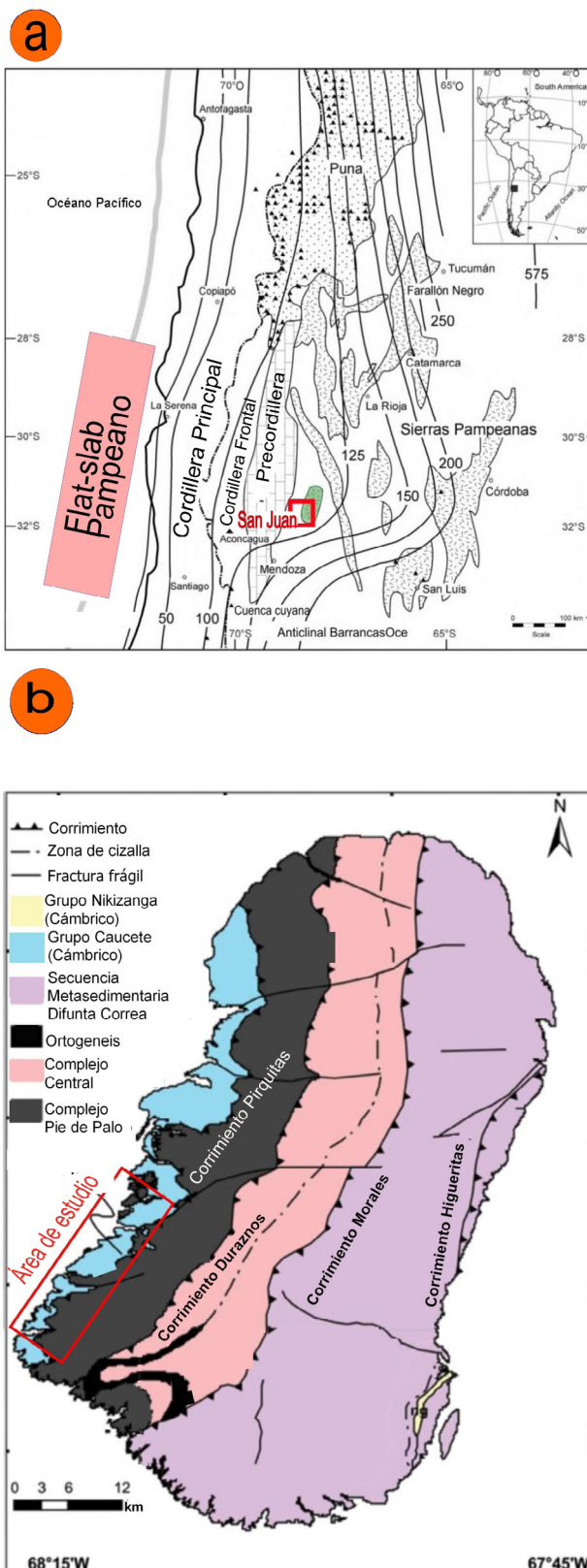


Figura 2: a) Ubicación regional del Valle de Tulum y del segmento Pampeano (Según Ramos et al. 2002) de subducción sub-horizontal en los Andes Centrales de Argentina y Chile; b) Mapa modificado de Ramacciotti et al. (2019) con las principales unidades estratigráficas de la Sierra Pie de Palo.

Otro rasgo estructural notable de la Sierra de Pie de Palo es el desarrollo de fallamiento oblicuo de rumbo N 50°E a través del bloque serrano, como la megatrazada de Salinas Grandes (Baldis et al. 1979).

Estudios de sismología indican que el sector oriental es el más activo, dado que concentra la actividad neotectónica y los epicentros de los sismos (Siame et al. 2006, Monsalvo et al. 2014). Martínez et al (1993, 2008) estudian la zona a través de la geofísica, realizaron un perfil gravimétrico que atravesó completamente la sierra de Pie de Palo en su parte media, corroborando así la existencia de una anomalía positiva sobre esta. Otros estudios aeromagnéticos cubren la región desde la sierra hacia el oeste (Chernicoff et al. 2009).

Las unidades geológicas que afloran a lo largo de la zona de estudio son: Complejo Pie de Palo, el Grupo Cauçete (Formación El Quemado y Formación Angaco) y una cubierta de depósitos cuaternarios (Cardó et al. 2012) (Fig. 2b).

El Complejo Pie de Palo es el basamento cristalino, constituido en su mayor parte por las rocas de edad Grenvilliana aflorantes en la Sierra de Pie de Palo y los cerros Barboza y Valdivia (Varela y Dalla Salda 1993, Ramos et al. 2000). Es un cinturón máfico-ultramáfico, ortogneises intermedios a ácidos asociados con rocas metasedimentarias de alto grado y megatawackes y mármoles (Ramacciotti et al. 2019).

Se encuentra yuxtapuesto sobre el Grupo Cauçete, a través de un importante corrimiento de rumbo meridiano y vergencia al oeste, denominado Corrimiento Pirquitas (Vujovich y Ramos 1994). Este Grupo está formado por rocas cuarcíticas y calcáreas afectadas por un metamorfismo de bajo grado aflorantes a lo largo del flanco occidental de la Sierra de Pie de Palo.

En el valle y piedemonte se encuentran depósitos cuaternarios provenientes de un ambiente fluvio- aluvial. En la planicie dominan depósitos finos de limos y arcillas, suelos salinos en el playa- lake y zonas distales del abanico aluvial del río San Juan y mantos de arena eólica. En el piedemonte en cambio hay depósitos gruesos y fanglomerados.

Geomorfología

En el área de estudio se distinguen tres grandes ambientes geomorfológicos: ambiente estructural, fluvio-aluvial, y ambiente eólico. El ambiente estructural está representado por las Sierras Chica de Zonda, de Marquesado, de Villicum y de Pie de Palo. Las tres primeras pertenecen a Precordillera Oriental, mientras que la Sierra de Pie de Palo forma parte de Sierras Pampeanas Occidentales. Estos cordones montañosos se originan por la presencia de corrimientos tectónicos y registran procesos de remoción en masa como caída de detritos y rocas. La Sierra de Pie de Palo presenta forma

de escudo elongado en dirección aproximadamente N-S y de unos 30 km de ancho por 78 km de largo, se caracteriza por una gran cantidad de quebradas profundas y bien marcadas, con perfiles en V y diseño de drenaje de tipo centrífugo hacia sus cuatro flancos.

El ambiente fluvio- aluvial, se localiza en el relieve intermedio y plano. Está integrado por las unidades de la planicie aluvial antigua del río San Juan, el piedemonte occidental de la Sierra de Pie de Palo y las unidades fluviales actuales del río San Juan. El piedemonte registra procesos erosivos activos principalmente asociados a la red de drenaje. La planicie aluvial, cubre la mayor superficie del área, allí dominan procesos de depositación y las unidades reconocidas son playa-lake, conos, glaciares y abanicos aluviales.

El ambiente eólico se desarrolla en el relieve plano. Se encuentran mantos de arena que se movilizan con los vientos provenientes del sector SE, probablemente del Campo de dunas "Médanos Grandes", la cual ocupa gran parte de la superficie del terreno y contiene un espesor de la arena que exceden los 100 m cubriendo una superficie superior a 2.400 km² (Tripaldi 2002). Otros campos de dunas se ubican al sur-este de los cerros Barboza y Valdivia.

METODOLOGÍA

La metodología de trabajo consistió en aplicar las fases del levantamiento geológico y de investigación: primero la recopilación y análisis de los antecedentes bibliográficos y cartográficos sobre el área de estudio. Luego, la creación de una base de datos y tareas de fotointerpretación de imágenes satelitales.

Se confeccionaron además mapas temáticos preliminares de geomorfología, suelos y depósitos, red de drenaje. Para estas tareas se utilizaron los programas Google Earth y QGIS versión 2.18.7, que permitieron georreferenciar la información y confeccionar capas de información necesarias para la integración requerida en el OT.

En este estudio se incorporan datos del subsuelo, considerado dentro de las variables que componen el medio físico. Para ello se utilizaron los métodos geofísicos potenciales de gravimetría y magnetometría. Para las estructuras regionales se trabajó con el vuelo aeromagnético del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) del área 26, Pie de Palo y bases de datos gravimétricas del Instituto Geofísico Sismológico Volponi (IGSV). Las interpretaciones regionales se realizaron mediante el análisis de las cartas de anomalías gravimétricas de Bouguer (AB) y de Anomalías de Campo Magnético Total (AMT).

Las anomalías magnetométricas y gravimétricas residuales se emplearon para identificar e interpretar rasgos superficiales. El proceso de separación regional-residual se realizó aplicando un filtro de continuación ascendente a $h=1000$ metros sobre la anomalía magnética total, obteniendo de esta manera la anomalía regional magnética. Las anomalías magnéticas residuales se obtuvieron del mapa de Intensidad Magnética Total por sustracción de la anomalía regional. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando la opción Magmap filtro paso a paso del software Oasis Montaj. A la anomalía residual se le aplicó una reducción al polo (RTP).

La Anomalía de Bouguer se utilizó para identificar diferentes masas en el subsuelo. Aplicando los filtros adecuados, se separaron las longitudes de ondas largas (relacionada a efectos de cuerpos de gran dimensión y profundos como la discontinuidad corteza-manto) llamada Anomalía Regional. Esta anomalía, se restó de las Anomalías de Bouguer, para encontrar la Anomalía Residual, representativa de fuentes someras y de menor dimensión en el subsuelo (Hinze et al. 2013). Luego mediante diferentes técnicas de filtrado se delimitaron las estructuras de los primeros metros de la Corteza.

La obtención de datos estructurales más locales se realizó mediante mediciones a lo largo de dos perfiles desde la planicie hasta la sierra, orientados de oeste a este (Fig. 7 y 9).

Para ello se utilizó instrumental del IGSV: dos magnetómetros de campo total GEM Systems Overhauser y GSM 19 V7 y un gravímetro CG-5. La adquisición de cada dato topográfico se realizó mediante el uso de GPS diferencial de alta precisión.

El trabajo de campo consistió tanto en la verificación de los mapas generados en gabinete como para el reconocimiento de información no relevada. La adquisición de los datos geofísicos se realizó mediante la medición simultánea de dato gravimétrico, magnetométrico y de altura topográfica en la misma estación. Una vez obtenidos, se continuó con el procesado de los mismos y posterior corrección, cálculo y realce de las anomalías utilizando diferentes filtros sobre los valores del perfil.

Las cartas de anomalías residuales y los perfiles geofísicos resultantes, se incorporaron a un sistema de información geográfica junto a las capas correspondientes (geomorfología, red de drenaje y depósitos cuaternarios). Esto permitió establecer las relaciones entre la presencia de estructuras tectónicas y su influencia en el uso y comportamiento del territorio. Finalmente se definieron las Unidades Ambientales (UA), dentro de las cuales se identificaron y evaluaron los peligros tanto naturales como antrópicos, los cuales son incluidos en las sobrecargas del territorio.

Para la integración de datos se utilizaron matrices de

evaluación ambiental que permitieron el análisis de relación entre actividades, de conservación, económicas primarias, de urbanización, actividades industriales y de servicios e infraestructuras presentes en cada unidad; para luego evaluar la valoración ambiental de cada UA. Finalmente se indican algunos lineamientos territoriales sobre los usos del suelo más compatibles en cada UA.

RESULTADOS

Como resultado de las observaciones de campo y del trabajo en gabinete del análisis de imágenes satelitales se confeccionaron mapas de suelos (Fig. 3a), de depósitos, geomorfológicos (Fig. 3b) y de la red drenaje de la zona (Fig. 4a). Además, se presenta un mapa con las fallas geológicas determinadas mediante la interpretación de la información geofísica relevada (Fig. 4b).

Las fallas regionales se interpretaron desde las cartas de anomalías residuales gravimétricas y de la reducción al polo de la anomalía magnética residual (Fig. 5). En ambas cartas se advierten anomalías relacionadas con el Sistema de fallas de Tulum, situadas al oeste de la Sierra de Pie de Palo. En esa zona el drenaje adopta una red con forma marcadamente lineal en la dirección de la falla. Otro rasgo lineal observado en el drenaje se reconoció hacia el sur de la Sierra Pie de Palo, donde la red de drenaje converge hacia un cauce temporal de mayor orden con dirección NO-SE. Se asocia este rasgo a la presencia de un lineamiento estructural al sur de Pie de Palo (Fig. 5).

En la carta de anomalías gravimétricas se observan valores altos de gravedad, identificados como zona A, los cuales corresponden al basamento de la Sierra de Pie de Palo (Complejo Pie de Palo), Mientras que la carta de anomalía magnetométrica aparece una zona de bajos valores magnéticos (zona B), que asignamos a la presencia del Grupo Caucete (Fig. 5).

La zona señalada como "zona C" con una elipse amarilla en la figura 5 coincide con una divisoria de aguas en el mapa de la red de drenaje superficial. Allí el drenaje adquiere dos direcciones hacia el NE y hacia el SE.

De este análisis regional surgen tres elementos principales: una divisoria de aguas, el lineamiento sur de Pie de Palo y una de las fallas principales del sistema de fallamiento de Tulum.

Los resultados del "Perfil sur", interpretados mediante los datos magnetométricos y gravimétricos relevados de las transectas durante el trabajo de campo, se ilustran en la figura 6 donde se presenta los perfiles de anomalía gravimétrica Total,

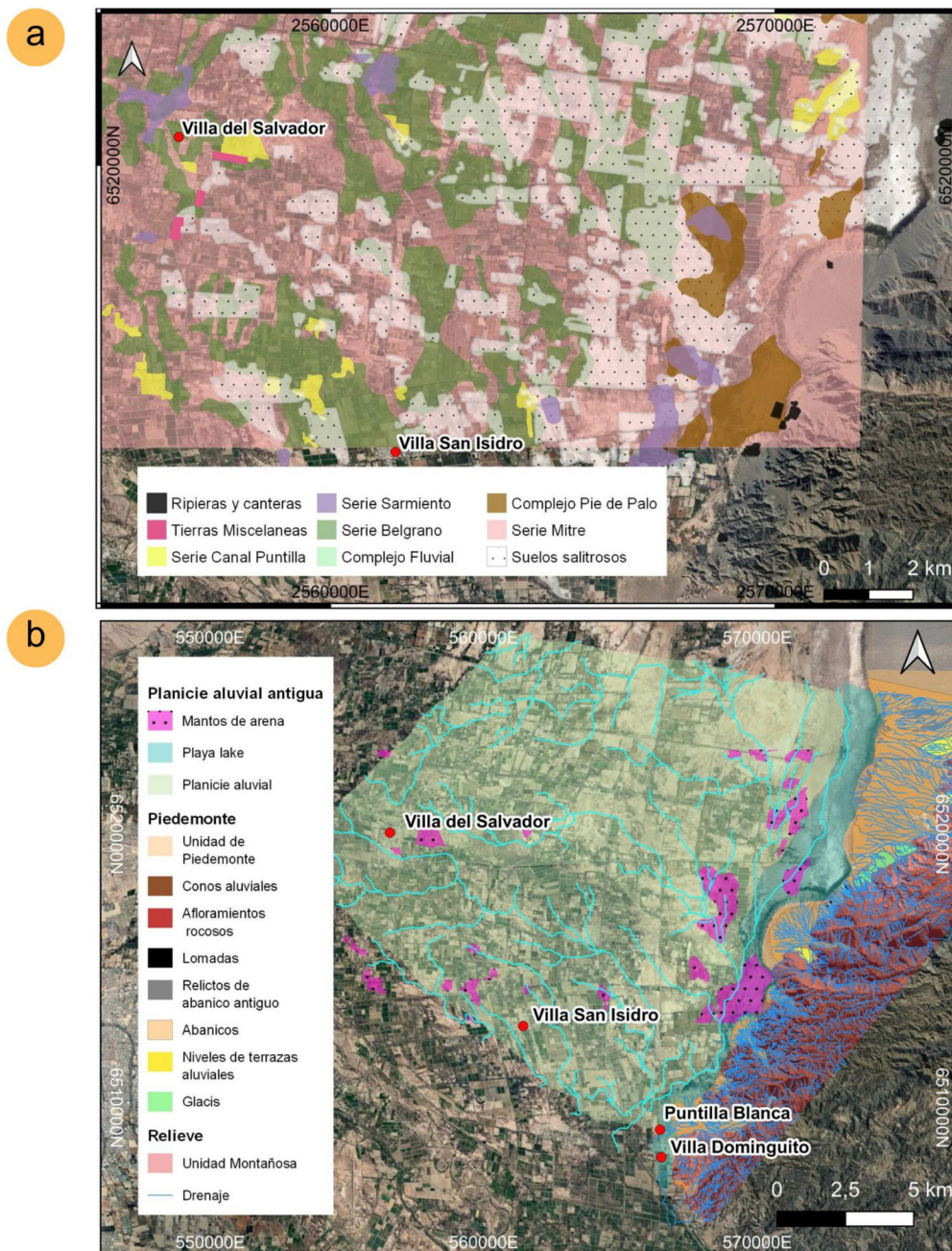


Figura 3: a) Mapa de suelos (según INTA 1976) y depósitos; b) Mapa geomorfológico local.

anomalía gravimétrica Regional, anomalía gravimétrica residual, realces de primera derivada vertical, señal analítica y el perfil de topografía (Fig. 6a).

También se observan los perfiles de la anomalía magnética total (AM), Regional, residual, reducida a polo de la AM residual (RTP), señal analítica, derivada horizontal y topografía (Fig. 6b).

En el perfil de la residual gravimétrica se perciben cuatro cambios, los cuales se identifican dentro del mismo con letras desde la A, B, C y D (Fig. 6a). Entre A y B, hay un cambio de gradiente entre los valores de gravedad que aumentan de manera gradual. Además, se registra un aumento en la altura

topográfica. Este sector se interpretó como una falla o contacto geológico y se delimitó con una línea de color rojo y el número 1 (Fig. 6a). La zona "D" muestra valores gravimétricos que se mantienen constantes y son los más altos del perfil (Fig. 6a). En esta sección el rumbo del perfil es N-S. Los límites de la zona D están resaltados en la derivada vertical por dos altos. En superficie se corresponden con los márgenes marcadamente rectilíneos de un bajo topográfico.

La Carta magnética residual RTP (Fig. 5b) también destaca la falla 1 señalada en el perfil gravimétrico. Esta posición señalada en la figura 6b con un sombreado en celeste divide al perfil en dos zonas I y II. La señal de la RTP también marca

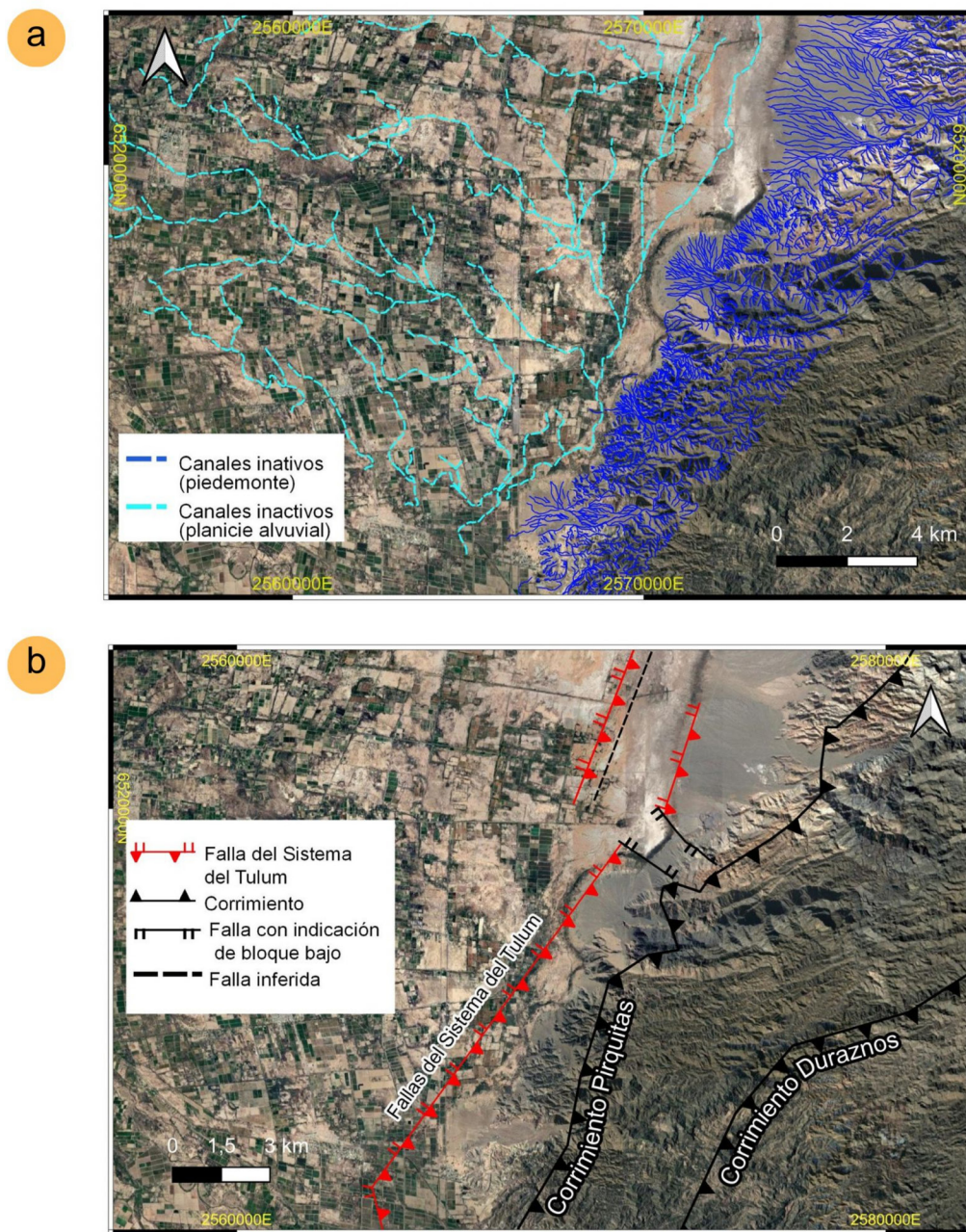


Figura 4: a) Mapa de red de drenaje de la zona de estudio identificando canales inactivos en el piedemonte y en el valle; b) Mapa de estructuras geológicas señalando corrimientos, fallas y lineamientos.

destaca esta anomalía. En la zona II se detecta un alto en el valor magnético, área sombreada de amarillo, coincidente con los bordes del playa-lake (Fig. 6b).

Los resultados geofísicos en conjunto con los datos geológicos relevados permitieron la caracterización de una toposecuencia para el Perfil Sur (Fig. 7). En la misma se identificaron tres fallas. La falla 1, señalada en el perfil como PP7, puede ser considerada como una falla regional profunda definida anteriormente en las cartas de anomalías gravimétricas. La falla 2 (PP12) posee dirección perpendicular a la sección de la toposecuencia presentada de rumbo NO-SE, y ejercería un control estructural en la zona del playa-lake (Fig. 7).

En la sección gravimétrica del “Perfil Norte” se marcan tres zonas A, B y C. En la zona A, en el perfil de la Regional gravimétrica, se perciben los valores de gravedad más bajos (Fig. 8a). El límite con la zona B está indicado por un alto en la derivada vertical gravimétrica y en la señal analítica tanto en los perfiles gravimétricos como magnetométricos.

En la zona B, la Regional gravimétrica aumenta contrastando con la zona A. La transición con Zona C está marcada por un alto magnético resaltado en el perfil de la señal analítica de la residual magnética (destacada como zona de color celeste). Las variaciones de magnetismo en este perfil se deben probablemente a cambios litológicos y no son tan evidentes los cambios como en el perfil anterior (Fig. 8b).

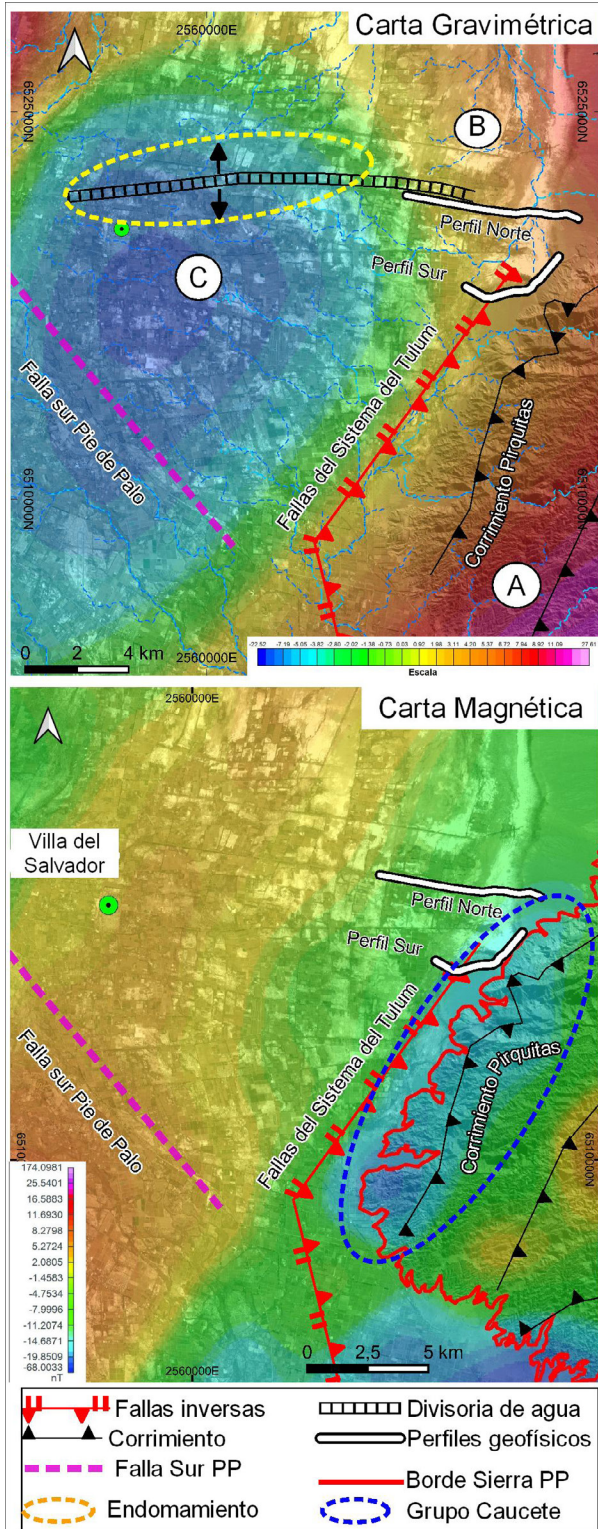


Figura 5: Correlación entre ambos métodos potenciales. Arriba: Carta de anomalía gravimétrica residual combinada con la red de drenaje de la zona. Se reconocen tres zonas: la zona A corresponde a los altos valores de gravedad (Sierra Pie de Palo), la zona B son anomalías gravimétricas con valores medios centradas en el piedemonte de la Sierra de Pie de Palo, y la zona C de bajos gravimétricos, se ubica principalmente en la cuenca del Tulum. Abajo: Carta de anomalía magnética residual reducida al polo (RTP) señalando el bajo magnético que pertenece al Grupo Caucaete.

Los perfiles con las señales magnéticas a lo largo de esta transecta presentan anomalías relacionadas con el ruido ambiental debido a la proximidad de infraestructuras urbanas como el predio San Expedito, líneas de alta tensión, tránsito vehicular constante, alambrados, etc. (Fig. 8b).

La toposecuencia del Perfil Norte, se caracteriza por cambios geomorfológicos visibles. En el punto 27 (Fig. 9), aparecen depósitos salinos, con abundante vegetación en los bordes de un ambiente tipo playa-lake. En este sector el drenaje adopta dirección N-S, por lo tanto, se interpreta allí, la presencia de la falla 4 y hacia el este la falla 5 inferidas en la interpretación geofísica.

En el PP33 se identificó una falla regional (falla 6), donde se observa un cambio en las señales geofísicas, asociadas in-situ con niveles de depósitos distales de abanicos aluviales sobre elevados respecto al nivel de base actual. Esta estructura regional podría haber modificado el nivel de base de los abanicos antiguos, generando un levantamiento de sus depósitos por sobre la zona de descarga actual, que se ubica varios metros más abajo (Fig. 9).

Unidades de Ambientales definidas

Las estructuras en el subsuelo y las aflorantes que resultan de la interpretación geofísica y estudios geológicos anteriores (divisoria de aguas, lineamiento sur de Pie de Palo, fallas del Sistema de fallamiento de Tulum y fallas menores), se utilizaron como límites para definir cuatro unidades ambientales (UA) en la zona de estudio (Fig. 10).

Las UA determinadas se diferencian, por presentar diferentes comportamientos en el drenaje, geomorfología, suelos y los depósitos cuaternarios los cuales son controlados por la tectónica de lugar (Fig. 3 y 4).

Además, en cada una se analizaron las sobrecargas territoriales, que consisten en los peligros socio-naturales que cada unidad puede presentar debido a las condiciones del medio y determinan los límites en algunos usos del suelo. Los peligros que se identificaron en este estudio fueron: suelos agotados y explotados por malas prácticas, que llevan a una disminución en el cultivo anual, zonas afectadas por crecientes o anegamientos, degradación del paisaje por actividades extractivas, problemas de desertificación, contaminación por residuos sólidos urbanos, incendios, sismicidad, procesos erosivos intensos, fenómenos de remoción en masa.

Unidad Ambiental 1 (UA1): En esta unidad se ubican las Villas El Salvador y San Isidro, las que poseen los núcleos de servicios para la población (Fig. 10). La unidad posee una red vial consolidada, red de servicios de electricidad, red de agua potable, canales de riego, servicio de transporte, salud

PERFIL SUR

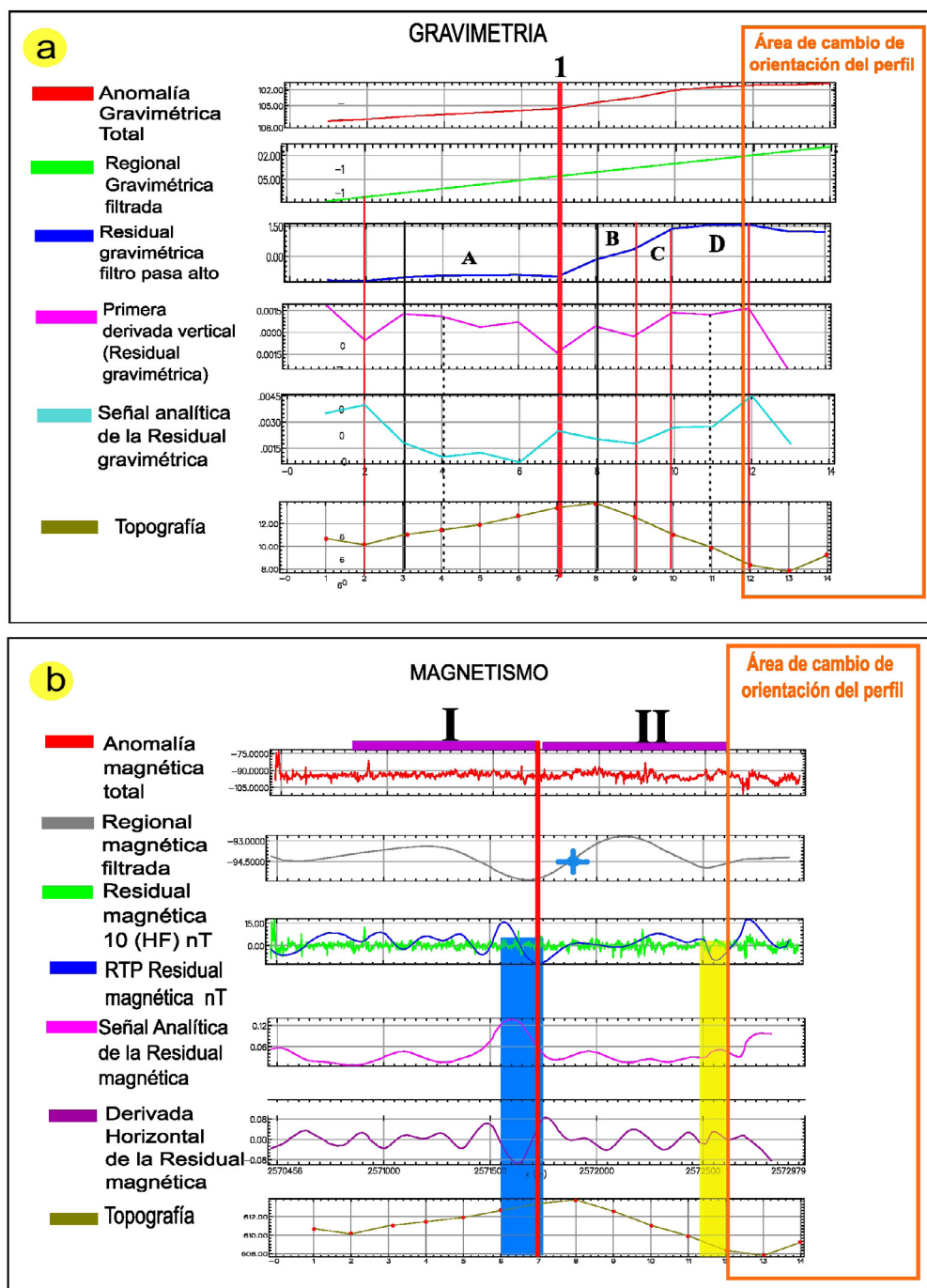


Figura 6: Perfil Sur. a) Perfil gravimétrico mostrando la anomalía Total, anomalía Regional, anomalía residual, realces de primera derivada vertical, señal analítica y topografía. b) Perfil magnetométrico mostrando los perfiles de la anomalía magnética total (AM), Regional, residual, reducida a polo de la AM residual (RTP), señal analítica, derivada horizontal y topografía.

y educación, espacios culturales, religiosos e instituciones políticas.

La UA1 se encuentra ubicada en la planicie aluvial antigua del río San Juan. La red de drenaje presenta un diseño dendrítico propio de terrenos relativamente homogéneos. No hay cambios notables en la dirección de los canales de la red de drenaje, solamente presenta ramificaciones formando ángulos agudos, en la dirección de las corrientes. Los paleocauces mapeados presentan una dirección de drenaje hacia el SO y

convergen en el lineamiento trazado al sur de la Sierra de Pie de Palo (Fig. 4b).

En cuanto a los suelos la unidad contiene suelos de la Serie Mitre, Belgrano y Canal Puntilla (INTA 1976). Los de la Serie Mitre ocupan la mayor extensión y su distribución es muy heterogénea. Los suelos incultos presentan una capa salina en superficie, y tienen un drenaje pobre. Por este motivo se dificultan las prácticas de lavado de suelos para la recuperación de los mismos. Son suelos que precisan labores

Toposecuencia Perfil Sur

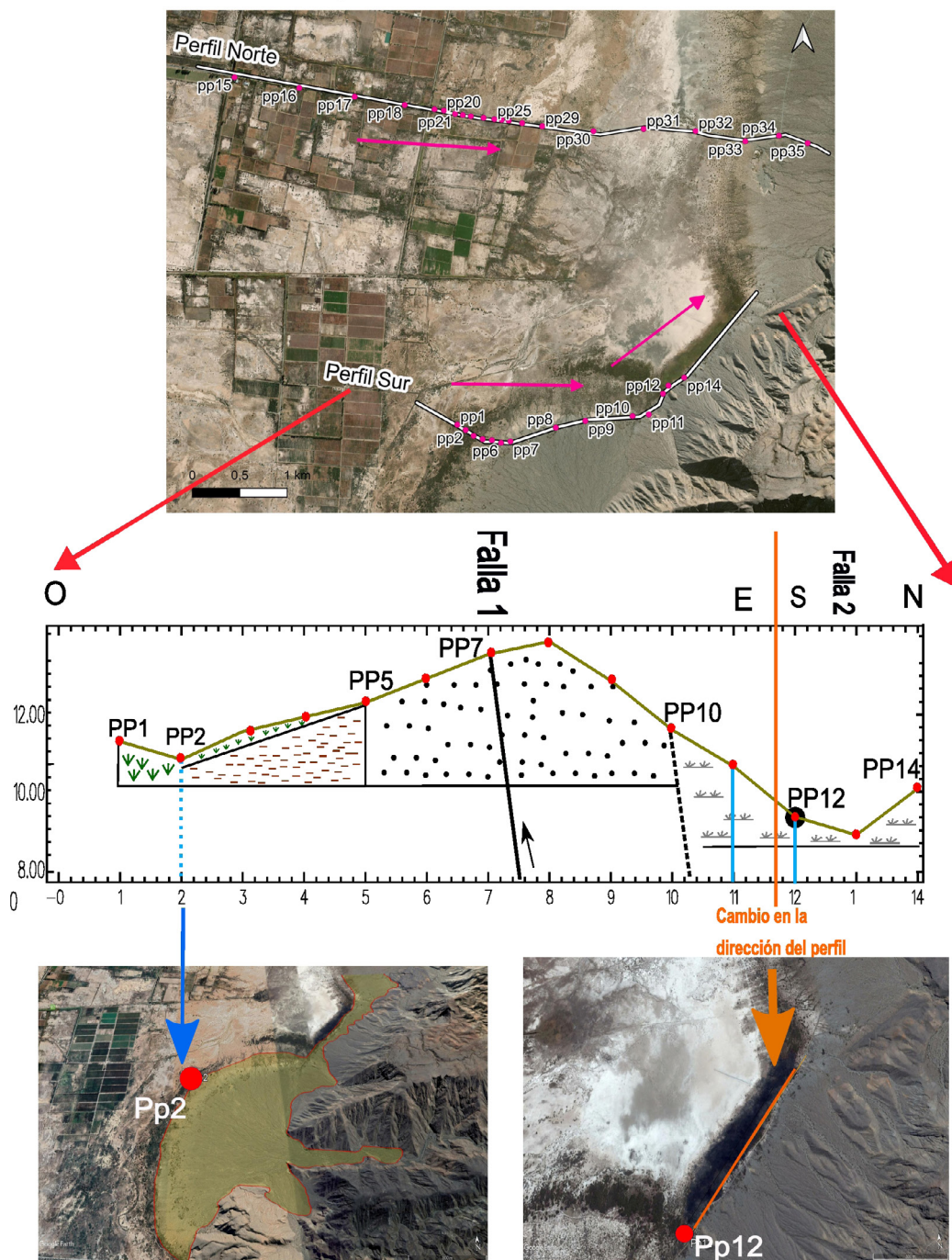


Figura 7: Toposecuencia para el Perfil Sur definida en base a la geomorfología, litología, suelos y redes de drenajes y ubicación de las fallas 1 y 2.

como arado. Otro tipo de suelos, con buen drenaje son los de la Serie Belgrano, estos, en caso de ser salinos permiten prácticas de lavado eficiente debido a la infiltración que es de alta a muy alta, poseen baja capacidad de retención de humedad (Liotta 1999). En la Serie Canal Puntilla se agrupan los suelos con una capa arenosa, bien drenados, con subsuelo de textura fina, lo que implica que estas formaciones se han desarrollado sobre la antigua planicie de inundación del río y a la vez han recibido un gran aporte de materiales eólicos.

Hacia el sur de la unidad, los mantos de arena se vuelven más abundantes, y los usos del suelo con fines agroproductivos desaparecen.

Considerando los suelos con drenaje pobre, la baja pendiente del terreno, y los registros abundantes de salinidad, en esta unidad existe riesgo de anegamiento. Además, se dan las condiciones para el desarrollo de licuefacción en caso de sismos.

La divisoria de aguas actúa como límite entre la UA1 y

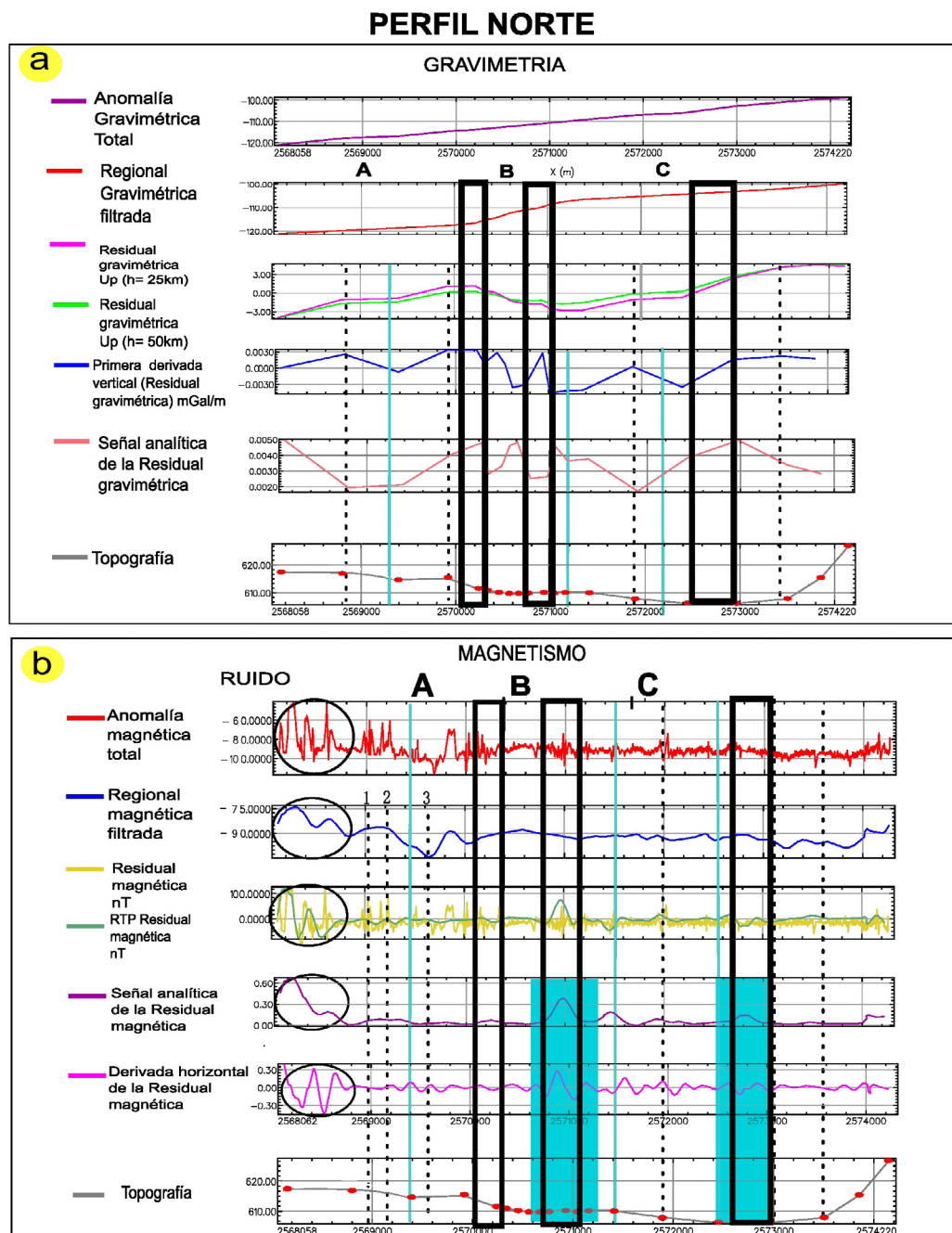


Figura 8: Perfil Norte. a) Perfil gravimétrico mostrando la anomalía Total, anomalía Regional, anomalía Residual, reales de primera derivada vertical, señal analítica y topografía. b) Perfil magnetométrico mostrando los perfiles de la anomalía magnética total (AM), Regional, residual, reducida a polo de la AM residual (RTP), señal analítica, derivada horizontal y topografía.

esta unidad.

Unidad Ambiental 2 (UA2): La red de drenaje en este sector presenta características similares a la UA1. El diseño es de tipo dendrítico, los cauces, en la mayoría temporarios, no presentan cambios bruscos en el ángulo de las ramificaciones, aunque sí en la dirección de los mismos. La dirección de escurrimiento es hacia el norte, mientras que los canales ubicados cerca de la sierra lo hacen hacia el sur-este dirigiéndose a la zona de playa- lake y escurriendo luego hacia el sur. Se reconocen numerosos paleocanales, que podrían ser parte de la red de drenaje del antiguo abanico aluvial del río San Juan. En algunos sectores de la UA2 los rastros de los

paleocanales son imperceptibles a causa de cambios en el uso del suelo como cultivos, industrias, trazado de caminos y urbanizaciones. En estas áreas se advierte sobre el riesgo de subsidencia del suelo o asentamientos diferenciales en torno a los canales. Los suelos son los mismos que en la unidad UA1, aunque existe mayor superficie de suelos salitrosos, al igual que la cobertura por las Series Mitre y Canal Puntilla.

En esta unidad el agua subterránea presenta niveles freáticos próximos a la superficie en épocas de riqueza hídrica. En la actualidad, la sequía ha generado un descenso de los niveles freáticos, y como consecuencia las perforaciones de agua subterránea para el riego de los campos productivos se

Toposecuencia Perfil Norte

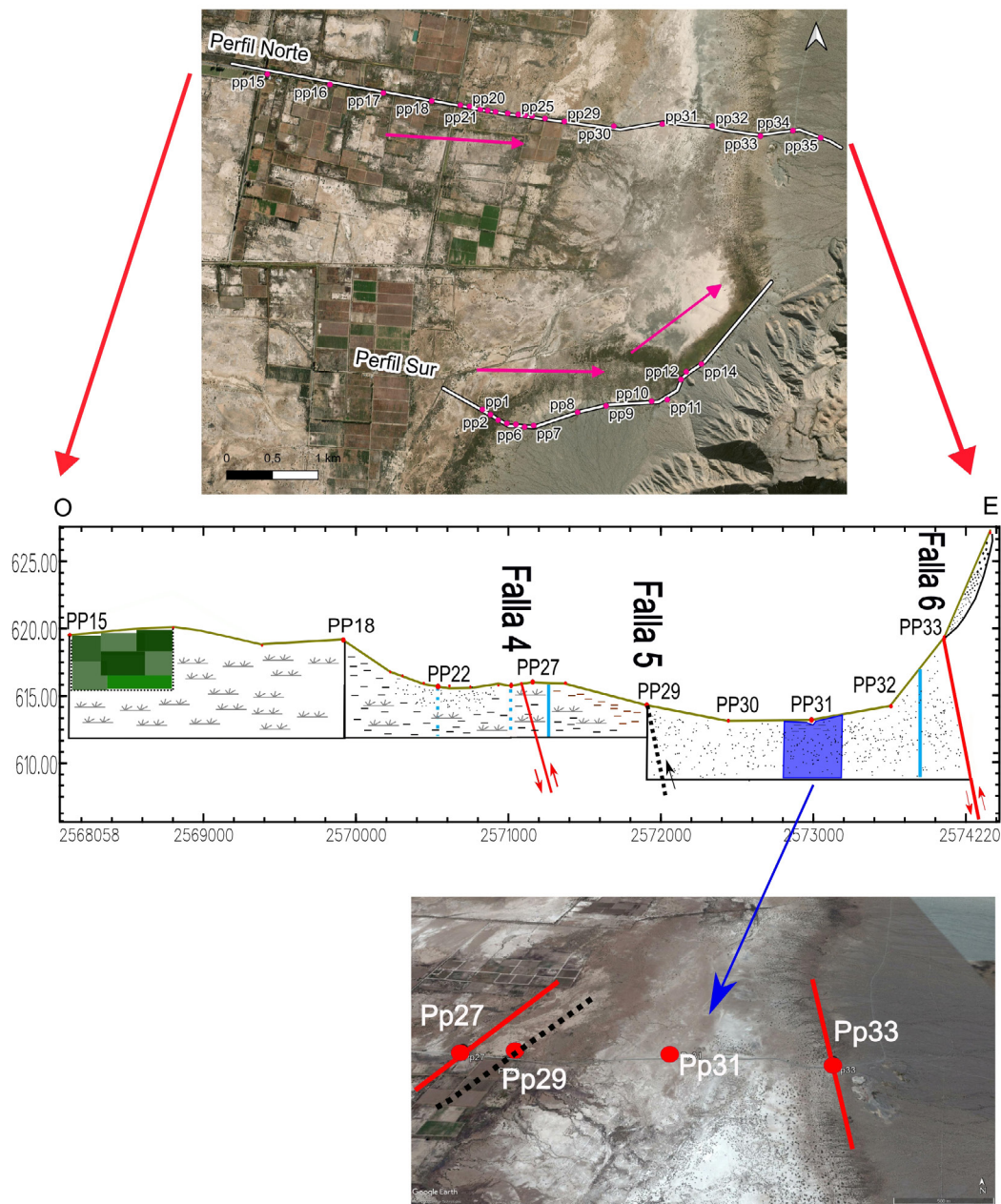


Figura 9: Toposecuencia para el Perfil Norte en base a la geomorfología, litología, suelos, redes de drenajes y ubicación de las fallas 4, 5 y 6.

han visto forzados a profundizar.

Unidad Ambiental 3 (UA3): Esta unidad está compuesta por depósitos de playa-lake. Debido a los estudios realizados, se atribuye un rígen tectónico a este bajo endorreico. Se trata de un bajo de forma elongada casi N-S, formada por suelos arcillosos-limosos cubierta en superficie por abundantes ampollas salinas (Fig. 11a). En cercanías al piedemonte se mapearon áreas más arenosas-limosas, explicadas por su vinculación con el ambiente aluvial.

Se diferencia del resto de las unidades, por presentar cauces abandonados con diseño anastomosado, que implica una serie de canales entrelazados y meandros abandonados,

típico de este sector de cuenca endorreica, en donde la pendiente es muy baja y la divagación de ríos, muy característica.

La disponibilidad de suelos salinos en el playa-lake es abundante. Aparecen los suelos del Complejo Pie de Palo (INTA 1976) en el piedemonte de la Sierra de Pie de Palo, conformado por arena.

En el sector oriental de la UA3 se localizan las partes distales de los abanicos aluviales provenientes de la Sierra de Pie de Palo, caracterizados por presentar una forma semicircular notoria. Debido a los estudios realizados, se atribuye un rígen tectónico a esta cuenca endorreica. En la zona distal, se

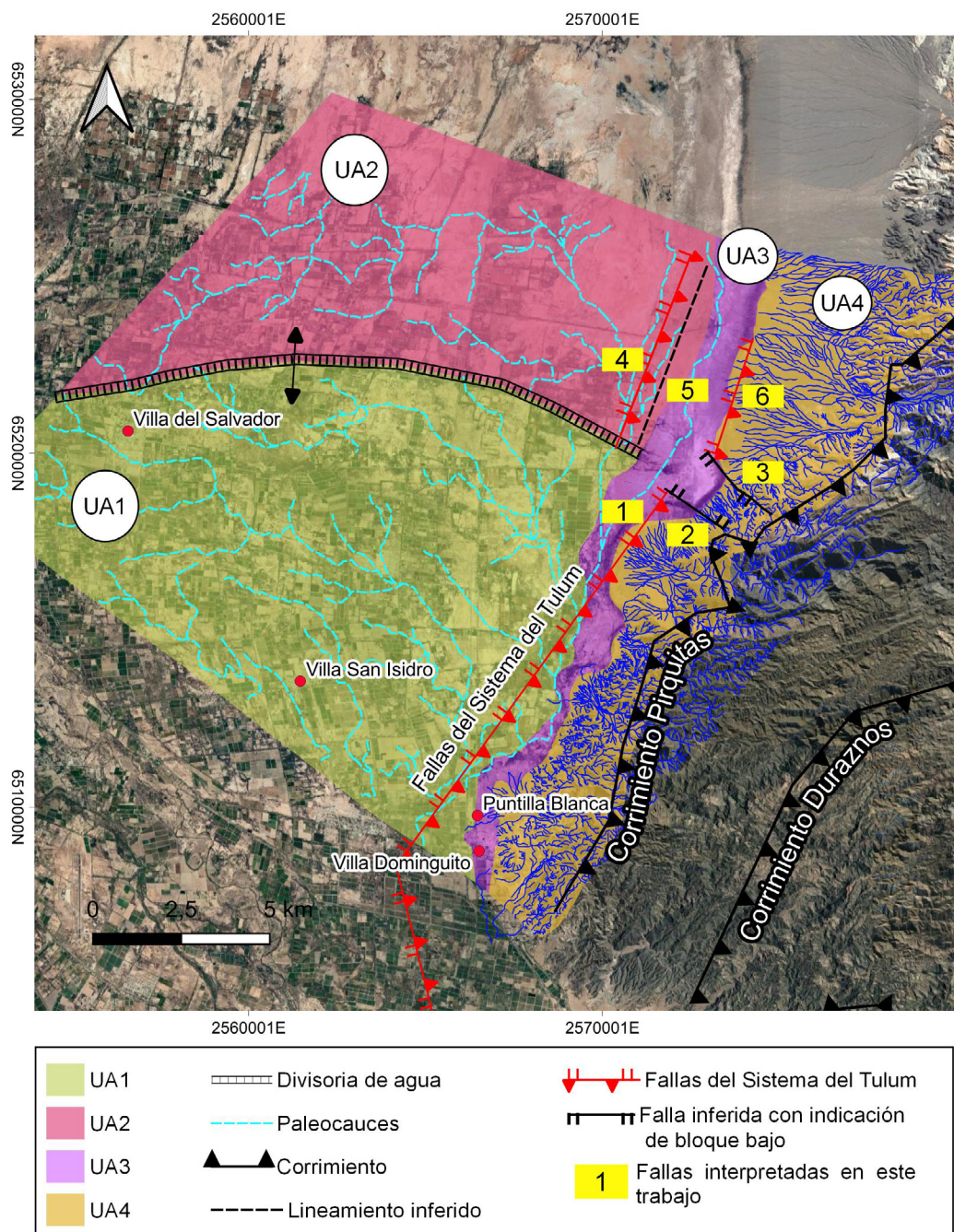


Figura 10: Unidades ambientales (UA). División realizada en base a las estructuras tectónicas principales presentes en el valle de Tulum.

ha podido identificar una falla a través de los estudios geofísicos, donde aparecen suelos limo-arcillosos que retienen agua y favorecen el crecimiento de vegetación nativa, la que conforma bosquечitos de flora nativa alineados con esta zona de mayor humedad y es hábitat para la avifauna local (Fig. 11b). Un rasgo del playa-lake es la alternancia de la geometría del mismo, pasando de sectores más alargados a otros rectangulares, dejando en evidencia estructuras oblicuas a la falla principal, tal como la falla 3. Hacia el norte de la unidad se observan variaciones de salinidad en épocas de mayor humedad. Por el contrario, hacia el sur existe un avance de materiales eólicos sobre los depósitos salinos.

Como sobrecargas en la UA3 hay evidencias de incendios intencionales por quema de basura o arbustos, siendo una mala práctica que se observa en toda la región como método de limpieza de campos (Fig. 11c). Algunos focos se propagan hacia áreas pobladas afectándolas. De acuerdo a un estudio del recurso hídrico en esta región (Lohn 1970), el agua subterránea aumenta su salinidad a medida que nos acercamos a la Sierra Pie de Palo, con valores muy altos para la UA3.

Unidad Ambiental 4 (UA4): Abarca el piedemonte occidental y la ladera occidental de la Sierra de Pie de Palo. La UA4 está caracterizada geomorfológicamente por presentar abanicos aluviales activos e inactivos con un diseño “distribu-

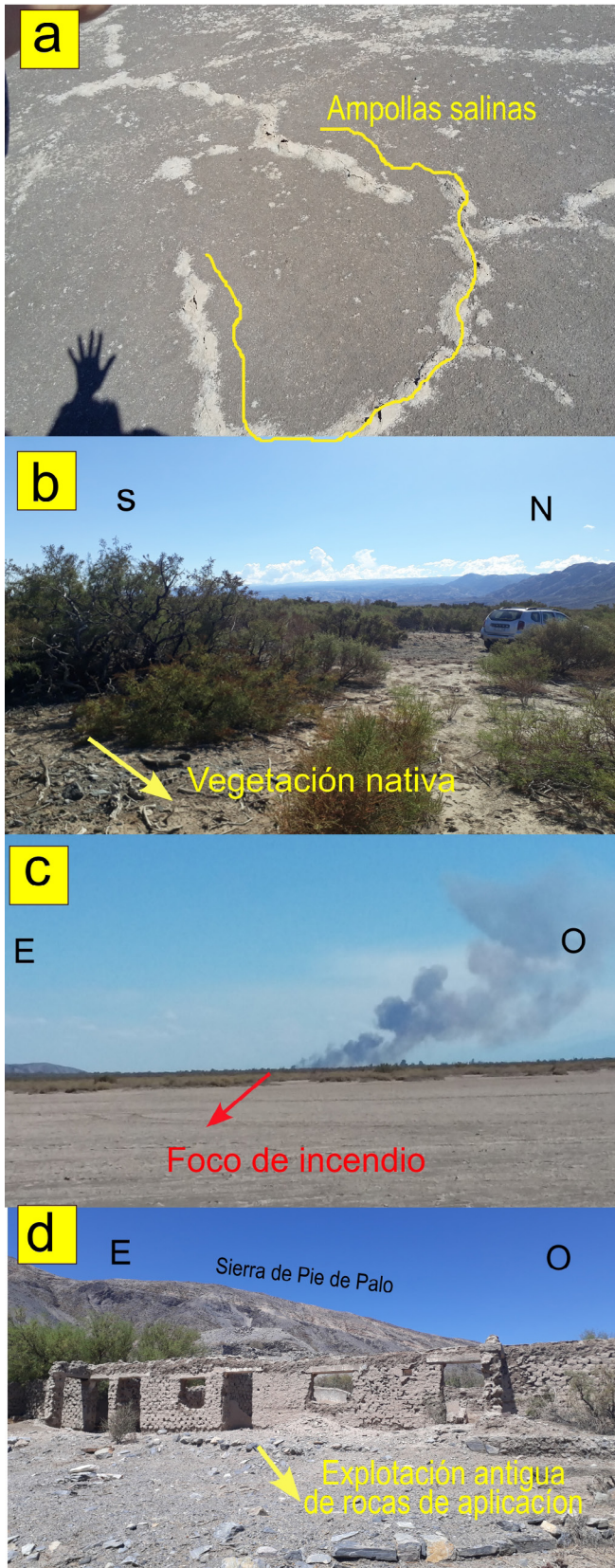


Figura 11: Fotografías de campo. a) Ampollas salinas y rasgos antrópicos de vehículos sobre el playa- lake; b) Vegetación nativa densa sobre el sector distal de los abanicos aluviales; c) Incendios intencionales por quema de basura o arbustos; d) Explotación antigua de rocas de aplicación.

tario” en la red drenaje en la zona pedemontana. En cambio, en la ladera occidental de la Sierra, predominan los diseños, “rectangular y enrejados”. Los primeros son propios de zonas fuertemente diaclasadas, donde los tributarios se cortan entre sí formando ángulos rectos. Mientras que en los diseños enrejados los tributarios desaguan en los de orden inferior según ángulos medianamente rectos y deben su trazado a la presencia de estratos fuertemente plegados.

La UA4 exhibe sobrecargas debido a procesos erosivos fluviales, que en la zona se generan durante la época de verano por la acción de lluvias torrenciales. Los deslizamientos de detritos y desprendimientos de rocas son numerosos en esta zona. También es abundante material suelto en las laderas debido a las acciones de explotación minera para rocas de aplicación (Fig. 11d). Tanto las precipitaciones repentinas como los sismos pueden actuar como factores de activación para el movimiento de estos materiales.

DISCUSIONES

Tanto las estructuras tectónicas superficiales, como las deformaciones generadas por estructuras más profundas ejercen un control importante en la distribución de los suelos y en el comportamiento hídrico de la zona de estudio. Teniendo en cuenta las interpretaciones realizadas a través de los valores de anomalías gravi-magnetométricas y estudios en la red drenaje, el suelo, los depósitos recientes y la geomorfología, se generó un mapa de estructuras principales para delimitar unidades ambientales en el departamento Angaco, al norte del Valle del Tulum. Se observa que los cambios locales generados por las estructuras a nivel de planificación territorial son importantes porque permiten detectar problemas de anegamiento, procesos erosivos, sismicidad, disponibilidad de agua, localización de suelos con limitaciones de salinidad, sequía, así como suelos con prioridades de conservación tanto para cultivos como para el crecimiento y conservación de la flora y fauna nativa.

Las condiciones de subsuelo como las incorporadas en este estudio, no son consideradas en los diagnósticos del medio físico existentes para la planificación territorial, salvo en las caracterizaciones de los recursos subterráneos. Se observa en el caso de Angaco, al igual que en la zona sur del valle de Tulum, que las condiciones del subsuelo tienen un control de primer orden en el resto de las variables que componen al medio físico. Este es soporte de todas las demás dimensiones del territorio.

El límite entre la UA1 con la UA2 es una divisoria de agua identificada en gravimetría como una posible flexión, la cual

genera que los cursos de agua descarguen desde este sitio hacia el sur y norte. El límite sur puede asignarse al Lineamiento sur de Pie de Palo.

La UA3 fue definida por fallas ubicadas al frente de la Sierra, asignadas al sistema de fallamiento del Tulum, por su continuidad hacia el sur y a la falla 4 aquí mencionada. Además, esta unidad presenta variaciones internas debido a la presencia de las fallas 2 y 3 identificada en esta investigación. Por su parte, LA UA4 fue definida a partir de las fallas 1 y 6.

De todas las unidades, la UA1 es la que alberga los centros poblacionales más importantes. Las condiciones de las redes de servicios presentes en esta unidad (escuelas, centros de salud, barrios, estructuras eclesiales, entre otras), constituyen las razones por las cuales se han desarrollado nuevos núcleos poblacionales, avanzando en un proceso lento sobre los suelos fértiles y disminuyendo las áreas que proveen alimentos en el mercado interno local.

Se advierte además que las urbanizaciones deben prever los sistemas y la planificación necesarias para evitar anegamientos frente a suelos de poca capacidad de infiltración.

En cada UA se evaluó su vocación natural, la cual ésta característica permite la elaboración de propuestas que garanticen la sostenibilidad del ambiente y la convivencia con el resto de las dimensiones territoriales.

La UA1 puede ser considerada como un ecosistema urbano a raíz de las modificaciones antrópicas existentes. Las condiciones naturales originales del territorio se modificaron fuertemente, en ellas se encuentran las localidades urbanas de la Villa del Salvador y la Villa San Isidro. A su vez es un ecosistema protector y tiene un valor ecológico muy alto porque se localiza sobre una cuenca de agua subterránea, y de esta área se extrae agua para las actividades económicas de la región. También se caracteriza por ser una zona agro-productiva con gran cantidad de hectáreas cultivadas, principalmente de viñedos, olivos y melones, entre otros estacionales que garantiza la seguridad alimentaria de sus habitantes. Se propone que la expansión urbana necesaria se disponga en esta unidad, con las medidas de regulación necesarias para la conservación de las zonas rurales que definen al norte del valle. Otros usos compatibles dentro de la unidad son los espacios verdes públicos, y los equipamientos urbanos, etc.

La vocación de la UA2 puede ser considerada como un ecosistema agroproductivo y rural. Provee de frutas y verduras a la población interna y externa de la región. Se sugiere a la UA2 como un área potencial para garantizar la soberanía alimenticia. El valor ambiental que tiene es alto, principalmente por el valor productivo de sus suelos y el valor ecológico debido a la presencia de industrias agrarias y ganaderas,

turismo religioso como es el caso del predio San Expedito, agroecológico y geositios. La salinidad del suelo y la sequía son limitantes para la extensión de la actividad agrícola. La licuefacción es un factor de sobrecarga muy relevante debido a las condiciones del suelo y a la presencia de fallas.

La UA3 posee un valor ecológico alto en cuanto a su función hidrogeología, correspondiendo al área de desagüe de la región. Favorece el funcionamiento de las UA1, UA2 y UA4 ya que el agua drena desde estas unidades hacia el nivel de base de la UA3. Al presentar áreas más húmedas, se conservan bosques nativos que favorecen la infiltración, desarrollo de suelos, protección contra la desertificación y hábitat de flora local sobre la UA3. También presenta numerosas sobrecargas como anegamientos, salinidad, subsidencia del suelo y falta de soporte. Asimismo, si se planifican caminos es necesario un mantenimiento periódico en estos sectores.

Por último, la UA4 tiene un valor ambiental diversificado por sus altos valores ecológico, paisajístico, cultural y productivo. Alberga actividades de recreación, de turismo aventura y minería. Como sobrecargas se identifican movimientos de laderas y deslizamientos de detritos. La unidad presenta numerosas fallas activas. Los niveles de abanicos activos, tienen canales fuertemente incididos por donde circula el agua durante las esporádicas lluvias.

En la UA4 aparecen industrias dedicadas a la explotación de rocas de aplicación. En el área minera se sugiere el control ambiental, cumplimiento de la aplicación de herramientas de evaluación de impacto ambiental para garantizar la sostenibilidad de los recursos y el paisaje.

El paisaje desde esta unidad es único en la región, y lo que la convierte en una atracción turística., Algunas laderas ofrecen ventanas de observación geológica, como pliegues y estructuras que resultan atractivas para actividades de geoturismo, y se pueden proponer como sitios de conservación que contribuyan al desarrollo de los pobladores locales, actuando como guías, con posibilidades de venta de productos artesanales.

CONCLUSIONES

El territorio analizado en este estudio, se ubica en una zona árida al oeste de la Sierra de Pie de Palo, donde los recursos naturales son escasos y la tectónica ejerce un control sobre estos, condicionando los espacios para habitar.

En este trabajo se aplicaron técnicas geofísicas para caracterizar el subsuelo y de esta manera también el medio físico. A partir del estudio regional se delimitaron tres estructuras principales: una divisoria de aguas, el lineamiento sur de Pie

de Palo y una falla que, debido a su continuidad con el Sistema de Fallamiento de Tulum, fue asignada al mismo. También, se identificaron fallas locales a través de mediciones en perfiles gravimétricos y magnetométricos locales cercanas a los centros urbano-rurales. Los perfiles proporcionaron evidencias que permitieron definir diferentes fallas como las fallas 1, 4, 5 y 6 (que formarían parte del Sistema de fallamiento de Tulum) y las fallas 2 y 3 de dirección NO-SE, las cuales constituirían estructuras limitantes de un bajo endorreico transversales a las estructuras principales N-S de la zona. La falla 6 controla en superficie, a los afloramientos de depósitos de abanicos distales, que se encuentran varios metros sobre elevados del nivel de base actual.

Los estudios geomorfológicos, de suelos, depósitos y drenaje superficial muestran relación con las estructuras geológicas. Como áreas representativas se construyeron dos toposecuencias que vinculan ambientes superficiales, suelos, drenaje con las fallas caracterizadas. A partir del análisis de estas toposecuencias se interpreta que la unidad de playa-lake al oeste de la sierra, la ubicación de los suelos salinos y las variaciones en las direcciones y diseños de drenaje del área presentan un origen tectónico.

Tanto las fallas como la divisoria de aguas se emplearon como barreras naturales para la definición de las 4 unidades ambientales propuestas para el norte del Valle de Tulum. Las estructuras tectónicas delimitadas actúan controlando las áreas de almacenamiento de agua, el tipo de suelo, la distribución de la vegetación, la intensidad de los procesos erosivos, microclimas y las sobrecargas. Las UAs son importantes para la gestión territorial de los departamentos de Angaco y San Martín. A partir de ellas se sugieren lineamientos territoriales para el buen uso del suelo, el conocimiento de los peligros naturales del territorio, las actividades más compatibles a desarrollar, posibilidades y limitaciones intrínsecas a cada unidad, a fin de promover políticas públicas territoriales que no estén desligadas del medio físico.

Los resultados obtenidos desde la geología y geofísica enriquecen el conocimiento geológico de la zona, y aportan datos robustos para caracterizar al medio físico, que es soporte de las dimensiones sociales, culturales, políticas y económicas del territorio.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue posible gracias al financiamiento otorgado por CONICET. También, fueron indispensables las bases de datos e instrumental geofísico del Instituto Geofísico Sismológico Volponi, Universidad Nacional de San Juan. Se

agradece el aporte de los revisores de la revista que han llevado a una mejora sustancial del artículo.

REFERENCIAS

- Baldis, B., Uliarte, E. y Vaca, A. 1979. Análisis estructural de la comarca sísmica de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 34: 249-310.
- Bastías, H., Weidmann, N. y Pérez, M. 1984. Dos zonas de fallamiento Pliocuaternario en la Precordillera de San Juan. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 329-341, San Carlos de Bariloche.
- Bastías, H., Uliarte, E., Paredes, J., Sánchez, A., Bastías, J., Ruzycki, L. y Perucca, L. 1990. Neotectónica de la provincia de San Juan. 11° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 228-244, San Juan.
- Cardó R., Díaz, I. y Catnich, J. 2012. Carta de Minerales Industriales, Rocas y Gemas 3169-IV, San Juan. Provincia de San Juan. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 401: 63 p, Buenos Aires.
- Chernicoff, C. J., Vujovich, G. I. y Van Staal, C. R. 2009. Geophysical evidence for an extensive Pie de Palo Complex mafic-ultramafic belt, San Juan, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 28 (4): 325-332.
- Costa, C., Rockwell, T., Paredes, J. y Gardini, C. 1999. Quaternary deformations and seismic hazard at the Andean orogenic front (31°-33°, Argentina): a paleoseismological perspective. 4° International Symposium on Andean Geodynamics, Proceedings: 187- 191, Paris.
- Costa, C., Audemard, F., Bezerra, F., Lavenu, A., Machette, M. y París, G. 2006. An overview of the main Quaternary deformation of South America. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61: 461-479.
- Costa, C., Alvarado, A., Audemard, F., Audin, L., Benavente, C., Bezerra, F.H. y Santibanez, I. 2020. Hazardous faults of South America; compilation and overview. *Journal of South American Earth Sciences* 104: 102837.
- Hinze, W., Von Frese, R. y Saad, A. 2013. Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications, Cambridge University, 502 p, United Kingdom.
- INDEC 2010. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. República Argentina. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-CensoProvincia-999-999-70-000-2010>
- INDEC 2022. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. República Argentina. https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/poblacion/cnphv2022_resultados_provisionales.pdf
- INTA 1976. Estudios de Suelos y Drenaje de los valles de Tulum, Ullum y Zonda. San Juan. Argentina. Estación Experimental Agropecuaria. 1, 2, 210 p (inédito), San Juan.
- Krugh, W. y Meigs, A. 2001. Secondary deformation associated with active basement involved folding; Late Quaternary flexural-slip faulting and kink-band migration, Sierra de Villicum, San Juan, Argentina. Geological Society of America Annual Meeting, Abstracts with Programs 33: 393, Massachusetts.

- Lohn, P. 1970. Hidrogeoquímica en los valles de Tulum y Ullum-Zonda, provincia de San Juan. Estudio de la salinidad del agua subterránea y superficial. Plan de Agua subterránea. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Consejo Federal de Inversiones, 70 p., San Juan.
- Martínez, M.P., Robles, J.A., Introcaso, A. y Giménez, M.E. 1993. Acorramiento y estudio estructural en la sierra de Pie de Palo a través de datos gravimétricos, San Juan, Argentina. 3° Congreso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Actas 2: 1144-1149, Río de Janeiro.
- Martínez, M. P., Perucca, L. P., Giménez, M. E. y Ruíz, F. 2008. Geomorphological and geophysical features of the deep structure of southern Pie de Palo, Sierra Pampeanas. *Revista De La Asociación Geológica Argentina* 63(2): 264-271.
- Martos, L. 1987. Evidencias de movimientos neotectónicos en una terraza de edad Holocena, La Rinconada, San Juan. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 263- 265, San Miguel de Tucumán.
- Monsalvo, G., Alvarado, P., Sáez, M. y Linkimer, L. 2014. Deformación sísmica reciente de la sierra de Pie de palo, provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71(2): 260-266.
- Perucca, L. y Ruiz, F. 2014. New data on neotectonic contractional structures in Precordillera, south of Río de La Flecha: Structural setting from gravity and magnetic data. San Juan, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 50: 1-11.
- Poblete, A. G. y Minetti, J. L. 1999. Configuración espacial del clima de San Juan, Síntesis del Cuaternario de la Provincia de San Juan. 11° Reunión de Campo del CADINQUA, INGENIO. Instituto de Geología, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. e Instituto de Geografía, Facultad de Filosofía, Humanidades y Artes, Universidad Nacional de San Juan, San Juan.
- Ramacciotti, C.D., Casquet, C., Baldo, E.G., Alasino, P.H., Galindo, C. y Dahlquist, J.A. 2019. Late Cambrian – Early Ordovician magmatism in the Sierra de Pie de Palo, Sierras Pampeanas (Argentina): implications for the early evolution of the proto-Andean margin of Gondwana. *Geological Magazine* 157(2): 321-339.
- Ramos, V., Cristallini, E. y Pérez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Ramos, V., Vujovich, G., Cardó, R., Pérez, L., Pelichotti, R., Godeas, M.C., Pucci, J.C., Bercowski, F., Bordonaro, O. y Chernicoff, C.J. 2000. Hoja Geológica 3169-IV, San Juan. Provincia de San Juan. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín 243, 93 p., Buenos Aires.
- Rocca, J. 1969. Geología de los valles de Tulum, Ullum y Zonda. Plan de Agua subterránea. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Consejo Federal de Inversiones, 180 p., San Juan.
- Rodríguez, A., Christiansen, R., Suvires, G., Lince Klínger, F. y Martínez, P. 2016. Structural features of the Southern Tulum fault System, western central Argentina, through gravimetric data and geomorphologic analyses. *Journal of South American Earth Sciences* 72: 159-168.
- Rodríguez, A., Martínez, P. y Suvires, G. 2018. Water resource distribution and tectonics in the Tulum valley, Western Central Argentina. *International Journal of Hydrology* 2: 55–59.
- Rodríguez, A. I., Ocaña, R. E., Flores, D., Martínez, P. y Casas, A. 2021. Environment diagnosis for land-use planning based on a tectonic and multidimensional methodology. *Science of The Total Environment* 800: 149514.
- Siame L., Bellier O. y Sebrier, M. 2006. Active tectonics in the Argentine Precordillera and western Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(4): 604-619.
- Suvires, G. 2004. Distribución de los suelos en función del relieve y de la neotectónica en la región sureste de la provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59(3): 376-384.
- Tripaldi, A. 2002. Sedimentología y evolución del campo de dunas de Médanos Grandes (provincia de San Juan, Argentina). *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 9(1):65-82.
- Varela, R. y Dalla Salda, L. 1993. Geocronología de Rb-Sr de metamorfitas y granitoides del tercio sur de la Sierra de Pie de Palo, San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 47(3): 271-276.
- Vujovich, G.I. y Ramos, V.A. 1994. La faja de Angaco y su relación con las Sierras Pampeanas Occidentales. Actas 7° Congreso Geológico Chileno, Actas 1: 215-219, Concepción.
- Zambrano, J. y Suvires, G. 2008. Actualización en el límite entre sierras Pampeanas occidentales y Precordillera Oriental, en la provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (1): 110-116.