



Estudio topográfico para el análisis del riesgo en el terraplén del puente del río Arenales, acceso circunvalación sureste, ciudad de Salta. Argentina

Topographic study for the risk analysis in the embankment of the Arenales river bridge, southeast ring road access, city of Salta. Argentina

Quispe, Carmen ¹ ✉ - Visich, María ²

Recibido: 2 de abril de 2019 • Aceptado: 7 de abril de 2020

Resumen

Los estudios topográficos revisten interés en el análisis de los riesgos geológicos ya que proporcionan las herramientas adecuadas para efectuar mediciones, cálculos y comparación de las modificaciones producidas en el terreno y en obras civiles, como consecuencia del accionar de diferentes procesos exógenos. En el terraplén del puente del río Arenales los procesos que causan alteraciones y riesgos están representados por la dinámica erosiva del cauce del mencionado río y por la erosión retrocedente provocada por cursos temporales. Estos últimos proceden de los relieves ubicados al este de la traza de la autopista, correspondiente a la avenida de circunvalación sureste, la que coincide con uno de los accesos a la ciudad de Salta.

El río Arenales es uno de los principales ríos que conforman la red hidrográfica que atraviesa la capital salteña. El puente que lo traspone, en el tramo investigado, forma parte de las obras principales correspondientes a la autopista. Los estudios topográficos, realizados desde 2015 al 2018, permitieron calcular las variaciones en la profundidad y amplitud de las cárcavas ubicadas al este del puente y en los sectores de riesgo detectados en la margen derecha del río, surcos de erosión. Se determinó además el volumen de material desplazado por los procesos mencionados y acumulado en la llanura de inundación próxima al talweg. Para el análisis de los riesgos se realizaron perfiles longitudinales y transversales, complementándolos con la detección de los factores antrópicos.

Palabras clave: Riesgos naturales, cárcavas, topografía.

Abstract

Topographical studies are of interest in the analysis of geological risks since they provide the appropriate tools to carry out measurements, calculations and comparisons of the modifications produced in the terrain and in civil works, as a consequence of the action of different exogenous processes.

1. Cátedra de Topografía- Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Salta. Avenida Bolivia Nº 5.150 Código Postal Nº 4.400. Salta (Capital), Provincia de Salta, Argentina.

✉ agrimcar@hotmail.com

2. Cátedra de Geomorfología- Facultad de Ciencias Naturales - Universidad Nacional de Salta. Avenida Bolivia Nº 5.150. Código Postal Nº 4.400. Salta (Capital), Provincia de Salta, Argentina.

On the embankment of the Arenales river bridge, the processes that cause alterations and risks are represented by the erosive dynamics of the riverbed and by the retrograde erosion caused by temporary courses. These last ones from the reliefs located to the east of the highway trace corresponding to the southeast ring road, which coincides with one of the entrances to the city of Salta.

The Arenales River is one of the main rivers that make up the hydrographic network that crosses the capital of Salta. The bridge that transposes it, in the section investigated, is part of the main works corresponding to the highway. The topographic studies, carried out from 2015 to 2018, allowed to calculate the variations in the depth and amplitude of the gullies located to the east of the bridge and, in the sectors of risks detected on the right bank of the river, furrows erosion. The volume of material displaced by the mentioned processes and accumulated in the floodplain next to the talweg was also determined. Longitudinal and transversal profiles were made to analyze the risks, complementing them with the detection of anthropic factors.

Keywords: *Natural risks, gully, topography.*

INTRODUCCIÓN

Morfogenéticamente la ciudad de Salta, Capital se encuentra ubicada en una unidad de origen fluvial, coincidente con un valle intermontano limitado al este y al oeste por unidades de origen estructural denudativo. El desarrollo del ejido capitalino se extiende hacia la ladera y el pie de monte de ambas unidades estructurales.

En este trabajo se hará referencia a los estudios topográficos efectuados para el análisis del riesgo en un sector de la unidad del este correspondiente al tramo medio de la Sierra de Mojotoro. Este cordón montañoso de rumbo submeridiano está representado, entre otros, por los cerros Chachapoyas, San Bernardo y La Pedrera. El acceso a la ciudad, desde el este, puede realizarse por tres vías de comunicación, la primera por el denominado Acceso Norte que atraviesa la quebrada de Chachapoyas, la que bisecta el primero de los relieves mencionados. El segundo acceso corta el tramo medio del cerro San Bernardo, mientras que el tercero se lleva a cabo por la circunvalación sureste, ubicada en el pie de monte del cerro La Pedrera. Esta última es relevante por ser la zona en la que se concentra el trabajo. La primera salida de la circunvalación, en dirección norte, conecta la RN N° 9 con el Parque Industrial y el centro capitalino, en tanto que la segunda salida, en dirección oeste, transpone un puente que cruza el río Arenales, el que forma parte de las obras correspondientes a una autopista. El puente fue construido en 2010 con la finalidad de unir el acceso a la ciudad por la RN N° 9, con la RP N° 68, conectando de este modo el Valle de Lerma con los valles Calchaquíes. Esta obra optimizó la calidad de vida de los vecinos ubicados en los barrios emplazados en la zona este del ejido capitalino, mejorando la circulación y por consiguiente la seguridad vial.

El puente, que tiene una longitud de 100 m y dirección este-oeste, fue construido en la llanura de inundación, afectando las terrazas de la margen izquierda del cauce. La obra civil estrangula la sección del curso de agua por lo que genera riesgos naturales. La estructura del puente está conformada por un tablero simple, los estribos y doce pilas. Estas últimas son impactadas por la dinámica de la corriente. El estribo y el talud del lado sureste del puente son erosionados por el escurrimiento pluvial procedente del cerro La Pedrera, el que genera cárcavamientos de dimensiones variables provocando la inestabilidad del estribo y el talud del terraplén de la avenida. Por otro lado, la amplitud de la cárcava disminuye la distancia entre éste y el talud norte de un ex vertedero generando la exposición de los

residuos que lo constituyen. Las pilas y el estribo del lado oeste se ubican sobre la llanura de inundación del cauce y sobre los niveles superiores de las terrazas fluviales. En este sector, los componentes citados precedentemente están afectados por procesos relacionados con la dinámica erosiva fluvial, al igual que las pilas del tramo medio del puente.

Los riesgos en ambas márgenes y en el terraplén del puente sobre la avenida Ingenieros se evaluaron considerando los diversos factores vinculados con la dinámica fluvial del río Arenales. Además, se consideraron los efectos relacionados con el componente topográfico, la acción antrópica y la dinámica pluvial vinculada con los cursos de agua, temporales, procedentes del cerro La Pedrera.

UBICACIÓN

El sector donde se realizó el análisis, correspondiente al acceso circunvalación SE, se encuentra ubicado en el Valle de Lerma de la ciudad capital de la provincia de Salta. Se sitúa en el extremo septentrional de la ciudad de Salta entre los siguientes valores de coordenadas: al NE (24° 50' 30,41" S - 65° 22' 25,12" O), al SE (24° 50' 32,57" S - 65° 22' 25,08" O), al SO (24° 50' 2,48" S - 65° 22' 29,50" O), al NO (24° 50' 31" S - 65° 22' 29,44" O).

El puente que cruza transversalmente el río Arenales, que escurre con dirección N-S, limita al NE con el Parque Industrial, al NO con tierras fiscales, al E con las Sierras de Mojotoro, al O con parcelas pertenecientes a la provincia, antiguamente usadas como cavas para la extracción de arcillas, y al S con el ex vertedero de Finca la Angostura (Figura 1).

ANTECEDENTES

Existen diferentes trabajos en los que se efectuó la caracterización geológica y geomorfológica de la provincia de Salta, incluyendo el geoambiente (Igarzábal, 1991, 1992; Perucca, 1993; Sastre, 1993). Otros incluyen la neotectónica, el riesgo geológico e impacto ambiental de la ciudad de Salta (Marcuzzi et al., 1996, 2018).

En el tramo medio de la serranía de Mojotoro, en sectores próximos a la zona de trabajo, se efectuaron mediciones topográficas para la determinación de la progresión de geoformas resultantes del accionar de procesos de remoción en masa y la dinámica hídrica (Quispe et al., 2015, 2018). Se efectuaron, además, estudios relacionados a la contaminación del río Arenales y a la

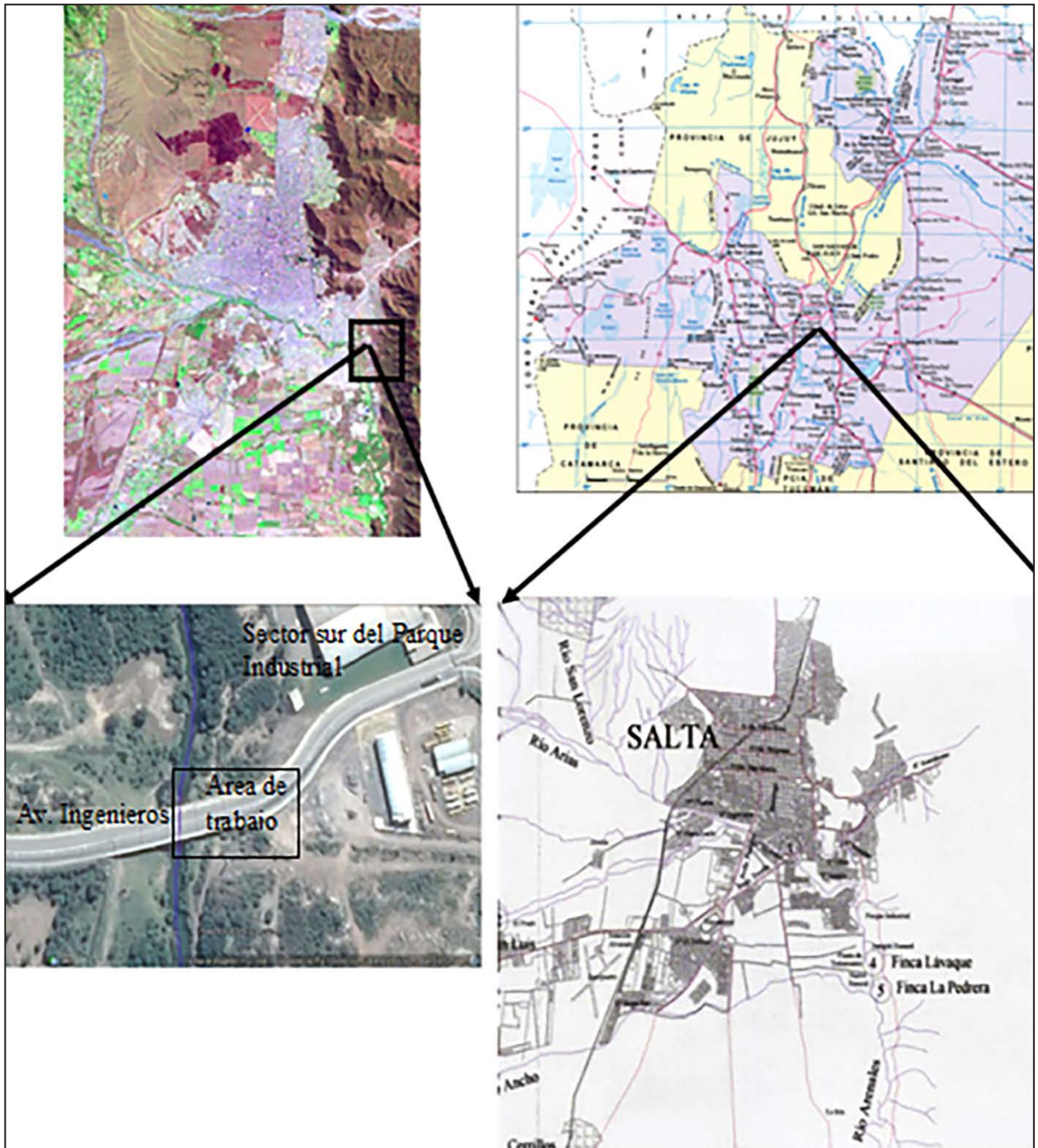


Figura 1. Ubicación del puente del río Arenales en el acceso circunvalación SE de la ciudad de Salta, Capital.

disposición, tratamiento y recuperación de un ex vertedero ubicado en las proximidades de la cárcava principal (Musso, 2001; Saiquita, 2008; Sastre, 2000).

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

El área de análisis se ubica en la Unidad Morfoestructural de Cordillera Oriental (Turner y Mon, 1979). El marco geológico, en este sector, está conformado por rocas correspondientes

al basamento de edad Precámbrico-Eocámbrico, Formación Puncovicana (Turner 1972); al paleozoico inferior, Cámbrico y Ordovícico, Grupos Mesón y Santa Victoria, respectivamente. Discordantemente se disponen sedimentitas Terciarias del Grupo Orán (Subgrupo Jujuy) y depósitos Cuaternarios. En la Tabla N° 1, se describe la estratigrafía de las rocas y sedimentos que constituyen cada una de las unidades formacionales representadas en la Figura 2, correspondiente al Mapa Geológico de la zona de análisis.

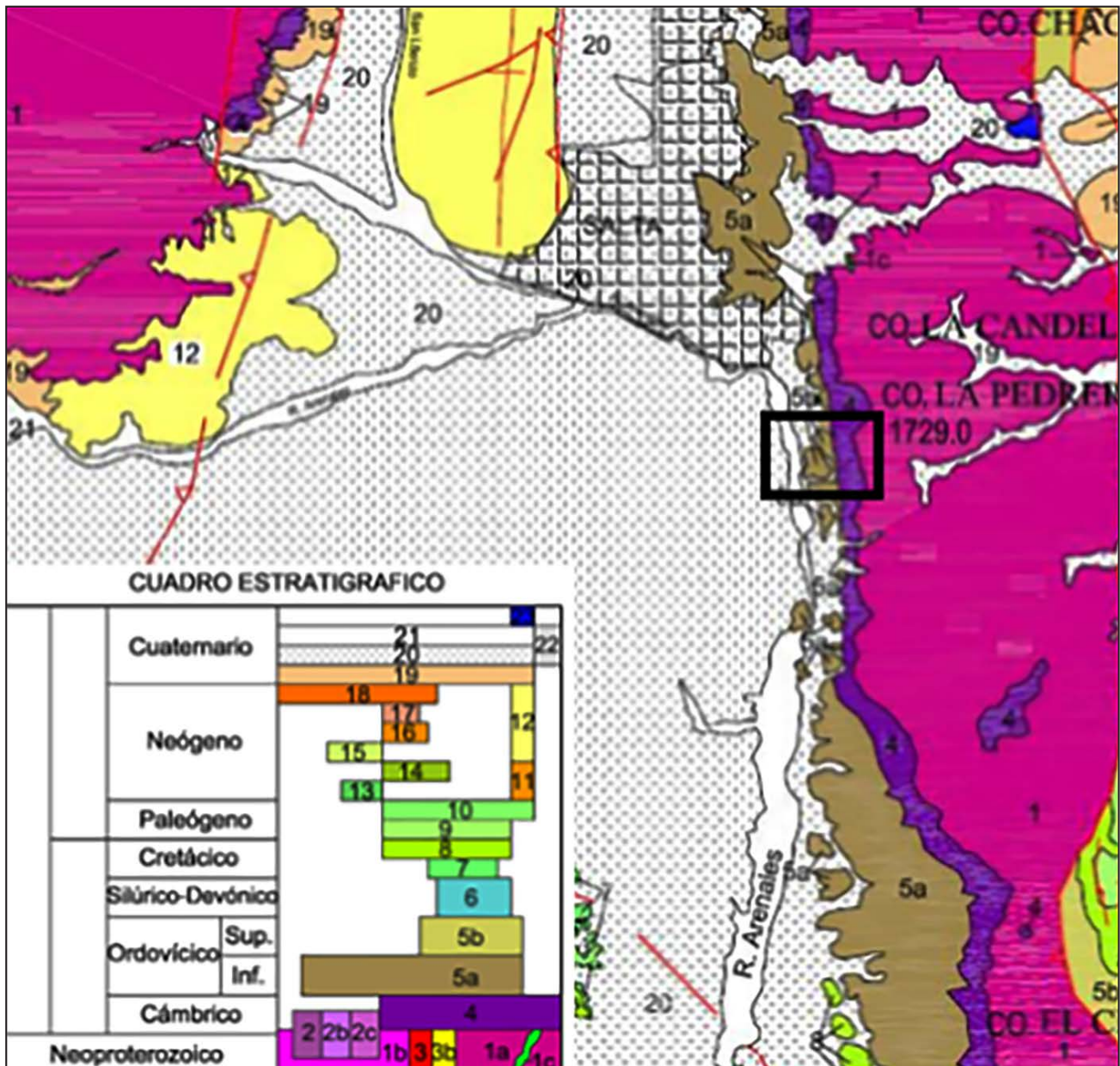


Figura 2. Geología del área de trabajo, extractado de la Hoja Geológica Salta, 2015.

Tabla 1. Estratigrafía y litología del área de estudio.

Era	Período			Estratigrafía y características geomorfológicas
Cenozoica	Cuaternario			Depósitos lacustres: Arcillas y margas. Depósitos fluviales-aluviales: Lutitas, areniscas, areniscas conglomerádicas y conglomerados. Depósitos de llanura de inundación-cauce actual
	Terciario Superior	Grupo Orán	Subgrupo Jujuy	Depósitos terrazados: Constituidos de base a techo por lutitas, areniscas, areniscas conglomerádicas y conglomerados.
Paleozoica	Ordovícico			Grupo Santa Victoria: Lutitas y arcillitas arenosas.
	Cámbrico			Grupo Mesón (Formación Campanario): Areniscas cuarcíticas y cuarcitas.
Precámbrico-Eocámbrico	Precámbrico			Formación Puncoviscana: Pizarras, grauwacas y areniscas cuarcíticas.

Se describen las formaciones terciarias y cuaternarias identificadas en los sectores afectados por la obra de circunvalación este, la autopista y el puente. Los sedimentos terciarios corresponden a los dos niveles de terrazas identificadas en la margen derecha del río Arenales. Los depósitos cuaternarios fluviales-aluviales y los depósitos lacustres coinciden con las unidades descriptas por *Gallardo et al. 1985*, correspondientes a las Formaciones Tajamar y La Viña, las que, en la zona de estudio, son afectadas por los procesos de erosión retrocedente y erosión fluvial.

Terciario superior

Depósitos terrazados

Están representados por los dos niveles de terrazas que se ubican en la margen derecha del cauce actual del río Arenales. La secuencia estratigráfica está constituida, de la base al techo, por grava de muy baja selección, con matriz limo arenosa y estratificación interna. En la zona de análisis solo el nivel inferior de terrazas está afectado por la acción erosiva del cauce (Figura 3).



Figura 3. a) Niveles de terrazas en la margen derecha del río Arenales, b) Secuencia estratigráfica en el primer nivel de terrazas.

Cuaternario

Depósitos fluvio aluviales

Formación Tajamar

La Formación Tajamar fue identificada en la cárcava principal, sobre la margen izquierda del río Arenales. La secuencia estratigráfica está caracterizada, en la parte basal, por limolitas y arcillitas alternantes, con estratificación fina a mediana y niveles de concreciones calcáreas. En la parte media hay intercalaciones de arenas con estructuras sedimentarias (laminación paralela y ondulítica) dispuestas en cuerpos tabulares finos a medianos. Hacia el techo predominan las facies arenosas con intercalaciones de facies pelíticas. La Figura 4, muestra la secuencia del carcavamiento desde 2015 al 2018. La Figura 4 muestra la etapa inicial del carcavamiento, de fecha marzo de 2015 (4a) y la evolución en ancho y profundidad (4b y 4c) apreciando en las mismas la parte media y cuspidal de la formación Tajamar. La Figura 4b fue obtenida en abril de 2016 y la Figura 4c en mayo de 2018.

En el afloramiento descubierto por la erosión se reconocieron líneas de escurrimiento subsuperficial, las que aceleran la evolución del carcavamiento.

Formación La Viña

En el área de análisis fue identificada suprayaciendo a los sedimentos de la Formación Tajamar, en las secuencias expuestas en la cárcava de la margen izquierda del río Arenales.

Composicionalmente esta formación muestra variaciones laterales y verticales, caracterizándose por facies gruesas y finas. Formando parte de las primeras se reconocieron, de la base al techo, grava de muy baja selección con matriz sostén; gravas bien seleccionadas con escasa matriz y gravas con estratificación interna plana y abundante matriz areno-limoso. La facies fina está representada por depósitos de limos y arcillas. Ésta última, constituyó el sustrato de la cava utilizada y rellena como un basal, conocido como ex vertedero de Finca la Angostura, ubicado al sur de la cárcava principal de la margen izquierda del río Arenales. La Figura 5, muestra la facies gruesa de la unidad basal de la Formación La Viña y la Figura 6, la facies fina. Ésta última está representada en el perfil de una cava situada detrás de las terrazas de la margen derecha del río. La cava forma parte de una explotación a cielo abierto realizada para la extracción de arcillas.



Figura 4, a, b y c. Progresión del cárcavamiento, en la margen izquierda del puente del río Arenales.



Figura 5. Facies gruesa de la unidad basal de la Formación La Viña.



Figura 6. Facies pelítica de la Formación La Viña.



Figura 7. Surcos de erosión en la margen derecha del río Arenales.

Depósitos de llanura de inundación-cauce actual

Los depósitos cuaternarios que constituyen la llanura de inundación del cauce actual del río Arenales están representados por clastos de grava, arena, limo y arcilla, procedentes de las áreas de aporte precámbricas, cámbricas, ordovícicas y terciarias que forman parte de los relieves de la cuenca de procedencia.

La erosión retrocedente producida por el escurrimiento concentrado en la temporada estival, durante la ocurrencia de lluvias torrenciales, provoca surcos de erosión y cárcavas de profundidades y anchos variables que afectan la estabilidad de las pilas del puente. La Figura 7 muestra dos tomas en las que se aprecian cómo evolucionan las cárcavas y sus efectos en las pilas del puente.

La influencia geoambiental que provocan los procesos de erosión, tanto en el terreno próximo al terraplén del puente del río Arenales como en la llanura de inundación (ambos márgenes), es evaluada en la sección correspondiente a los estudios topográficos.

ACCIONES ANTRÓPICAS QUE IMPACTAN EN EL SECTOR DE ANÁLISIS

El área de análisis se encuentra degradada por la actividad antrópica, la que provoca impactos negativos en el ambiente. Se mencionan a continuación las que se destacan.

Alteraciones en el relieve, como resultado de la construcción del puente de Avenida Ingenieros. La ejecución de la citada obra modificó la topografía del lugar debido a la construcción de la obra civil. Los terraplenes que sostienen los estribos y las pilas del puente fueron construidos en superficies no estables litológica y espacialmente (formaciones terciarias y cuaternarias), lo que favorece el impacto producido por la erosión hídrica.

Impactos sobre el río Arenales, que en ambos márgenes del recorrido en el ejido urbano incluye en ambos márgenes áreas destinadas a la agricultura, granjas destinadas a la producción avícola o tambera y a la urbanización. En el sector analizado se destaca la actividad ganadera, que provoca en algunos sectores la compactación y en otros la remoción del material aluvional con pérdida y acumulación de material.

En la margen izquierda del río Arenales se puede apreciar la proximidad de la obra civil al talud del ex vertedero. Esta proximidad es producto en el tramo superior del carcavamiento y en el tramo medio e inferior del desmonte realizado para la ejecución de la obra civil. En la Figura 8, la que muestra el estribo este del puente del río Arenales ingresando a la ciudad desde el norte por la circunvalación este, la flecha indica la dirección de escurrimiento desde el cerro La Pedrera en dirección al río Arenales nivel de base de los cursos temporales y principales colectores.



Figura 8. Estribo este del puente del río Arenales y talud norte del ex vertedero.

A 1 m del estribo del estribo del puente se encuentra el talud norte del ex vertedero de Finca la Angostura. En este sector la erosión hídrica provoca la desestabilización parcial del talud norte y oeste del ex vertedero y la exposición de los residuos.

La Figura 9 muestra el talud oeste del ex vertedero, erosionado por la dinámica fluvial. De acuerdo a *Saiquita, 2008*, en el ex basural el sistema de saneamiento que se ejecutó para el tratamiento de los residuos fue inadecuado, sin la correcta compactación y cobertura de los residuos sólidos urbanos acumulados, situación que queda evidenciada en la exposición de los taludes. Es frecuente que con posterioridad al desenlace de lluvias torrenciales, los residuos removidos sean depositados por la corriente en las ramas de los árboles de la margen derecha. Estos tienen una altura aproximada de 2 m y los residuos son depositados a un metro con respecto del talweg, lo que indica la dinámica erosiva de la corriente fluvial. La Figura 10 muestra los residuos acumulados en la margen derecha del cauce.

En la llanura de inundación de esta margen, se construyeron 4 pilas, las que son afectadas por la erosión fluvial la que deja al descubierto parcialmente las fundaciones. Parte del material erosionado es depositado temporalmente debajo del puente, en la llanura de inundación. Este material es transportado por la corriente fluvial elevando el nivel de base local, embalse General Belgrano (dique Cabra Corral). En ambas márgenes, sólo el segundo nivel de terrazas está afectado por la erosión fluvial.

El ex vertedero de Finca La Angostura se encuentra totalmente abandonado. No existen carteles indicadores que adviertan su clausura y tampoco la prohibición de depositar desechos. Según *Saiquita, 2008*, el mismo no posee un plan de monitoreo periódico, tarea que es de vital importancia si la pretensión del municipio es reinsertar el área al entorno paisajístico.

La acumulación de residuos sólidos sobre la superficie y en proximidades del ex vertedero genera microbasurales, con la presencia de roedores, palomas, perros y artrópodos afectando al ambiente en una situación que se incrementa con la quema de los residuos. Se detectaron en la población próxima al ex vertedero complicaciones respiratorias y en la piel (*Saiquita, 2008*).

En la margen derecha del río Arenales, sobre la que se ubican cuatro de las doce pilas correspondientes a la obra vial, al incrementarse el volumen del curso de agua en la época estival y el posterior desecamiento se provoca una reacomodación y deformación del material que cubre la fundación de las pilas y el estribo. Este proceso genera fracturas en el material favoreciendo el posterior carcavamiento (Figura 7).

ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS

Metodología

Para este estudio se realizaron salidas de campo que permitieron ubicar en ambas márgenes sectores con evidencias de erosión, los que fueron considerados como las zonas críticas en el área de interés debido a la incidencia que los surcos y las cárcavas provocan en las obras civiles. Posteriormente se efectuó la recopilación de antecedentes, con la finalidad de analizar la información vinculada con los problemas identificados, las características geoambientales y las modificaciones que tuvieron lugar en el área de trabajo.

La toma y gestión de los datos recopilados, mediciones, significó organizar un grupo de trabajo que periódicamente eligiera las áreas a relevar, con la finalidad de obtener medidas suficientes para efectuar posteriormente cálculos y comparaciones.



Figura 9. Talud oeste.

Entre los datos de interés se consideraron los siguientes:

- Extensión este-oeste del levantamiento (perfil longitudinal): 237,46 m
- Extensión norte-sur (perfil transversal de mayor longitud): 69,12 m
- Altura aproximada del puente: 7,40 m
- Longitud del puente: 100 m
- Distancia entre estribos: 96,80 m

En los trabajos de medición se emplearon instrumentos geodésicos, dos taquímetros, uno de marca LEICA TC403L con precisión tanto angular como lineal, la primera de 10" y la segunda de (3 mm + 3 p.p.m.), con alcance de 1.300 m con un prisma y 2.000 m con tres prismas. El otro taquímetro de marca SOKKIA S50RX con puntero laser, precisión angular de 5" y lineal de (2 mm + 2 p.p.m.), pudiendo efectuar mediciones sin prisma a una distancia de 400 m. Con un prisma el alcance es de 5.000 m. Ambos instrumentos poseen prisma de precisión y un procesador interno de datos para la evaluación de las observaciones (cálculo de coordenadas X, Y, Z, distancias horizontales,



Figura 10. Residuos acumulados por la corriente.

inclinada y desnivel). Se empleó también un navegador GPS marca GARMIN eTrex, memoria 24 Mb, precisión de 15 m, tiempo mínimo de adquisición de datos de unos 15", tarjeta micro SD para la transferencia de datos y un cable USB para la conexión a la PC. Este receptor GPS puede ser configurado para que indique las coordenadas Gauss Krüger. Además, se usó una cámara fotográfica marca Panasonic, modelo DMC-FS 42 con sensor de 3.648 x 2.736 pixeles (10 MP), objetivo con zoom de 4x, memoria interna y una tarjeta SD.

Las estaciones totales permitieron efectuar relevamientos en diferentes condiciones de tiempo. La accesibilidad, visibilidad y el levantamiento de tramos cortos, determinados por las irregularidades topográficas del terreno, permitieron la aplicación del método de visual convencional, es decir, un operador en el instrumento apuntando a un prisma adosado a un bastón con su porta prisma, garantizando un trabajo óptimo con precisión de las medidas según lo descrito para cada instrumento.

Los trabajos efectuados fueron los siguientes:

- Reconocimiento y selección de los sectores afectados.
- Registro fotográfico.
- Materialización de puntos fijos.
- Determinación de coordenadas de puntos fijos.
- Determinación taquimétrica de coordenadas de cada punto relevado.
- Relevamiento taquimétrico de áreas con variaciones de volúmenes.
- Levantamiento de perfiles.
- Generación y actualización de una base de datos.

- Confección de planos con resultados de diferentes períodos de levantamiento.
- Cálculos de los volúmenes de sedimentos desplazados o acumulados.

A continuación, se describen las tareas reseñadas:

- 1) El reconocimiento inicial, que se efectuó en marzo de 2015, permitió distinguir una cárcava incipiente y sectores afectados por cicatrices erosivas y por consiguiente la necesidad de realizar un análisis topográfico, el que se ejecutó antes y después de la época estival, desde noviembre de 2015 a diciembre de 2018, a los efectos de confeccionar planos comparativos. En total se realizaron 9 campañas topográficas, de las cuales 2 fueron de reconocimiento (marzo de 2015 y abril de 2016) y 7 de levantamientos topográficos.
- 2) Las tomas fotográficas permitieron obtener un registro de imágenes cuya principal ventaja es la captación rápida de las diferentes situaciones y cambios observados.
- 3) La materialización de puntos fijos, en lugares estratégicos y adecuados de manera tal que se conservaran en el transcurso del tiempo, permitió efectuar los relevamientos en diferentes períodos. Estos puntos fijos, de coordenadas predeterminadas, sirvieron de apoyo tanto para el levantamiento de perfiles como para el relevamiento planialtimétrico. La Figura 11 corresponde al denominado, en la secuencia de trabajo, Perfil Transversal N° 1, 2015-2016, realizado en el tramo inicial de la cárcava. En el plano, la denominación Cota I corresponde al relevamiento efectuado en noviembre de 2015 y Cota II en junio de 2016. La traza del Perfil Transversal está representada, en planta, en la Figura 12.

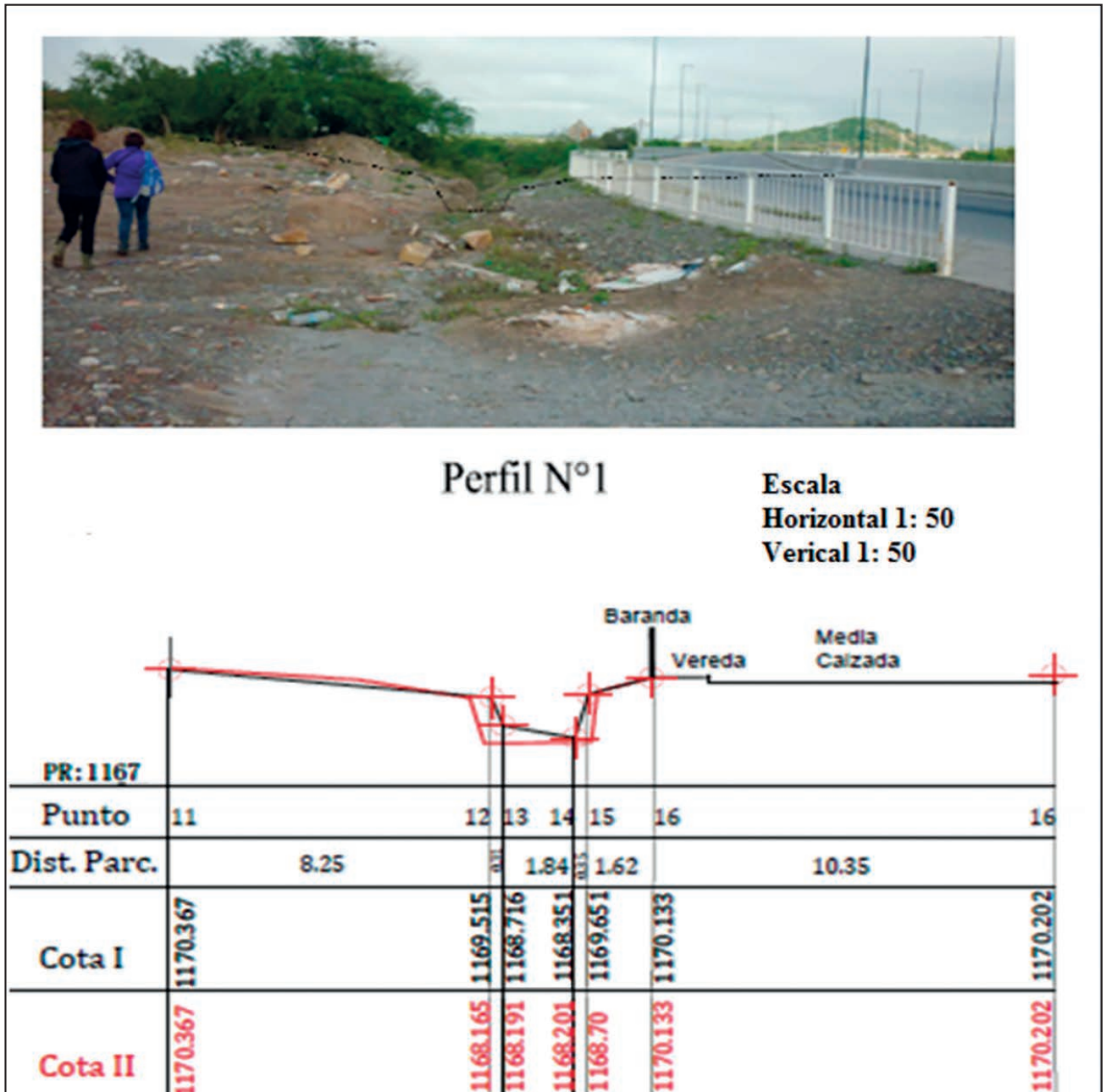


Figura 11. Perfil transversal N° 1, 2015-2016.

- 4) Debido a la ausencia, en las proximidades del lugar de trabajo, de marcas con coordenadas (x, y, z) conocidas para vincular los puntos a relevar a un sistema de coordenadas es que los valores iniciales de trabajo, correspondientes a las dos primeras estaciones, fueron determinados con un navegador GPS. Éstas fueron consideradas al centímetro como datos iniciales para el relevamiento con estación total. La posición planialtimétrica (x, y, z) de las restantes estaciones se obtuvieron con el taquímetro electrónico.
- 5) La posición relativa (x, y, z) de cada punto relevado se determinó mediante un programa interno del taquímetro electrónico. Las coordenadas de las dos primeras estaciones se determinaron con el navegador GPS y aun cuando este instrumento no posee la precisión de medición de las estaciones totales se empleó con la finalidad de establecer un único sistema de coordenadas. Todos los resultados fueron considerados al centímetro.
- 6) El reconocimiento efectuado en la etapa inicial del trabajo (marzo de 2015) permitió detectar, en una primera instancia, la formación de surcos evidenciando cicatrices que marcarían futuros desmoronamientos y posteriormente el desarrollo de cárcavas a partir de la erosión retrocedente. La distancia entre la cárcava y la infraestructura vial varía según el detalle de las Tablas 2 y 3. Las cicatrices próximas a las cárcavas definieron los sectores de levantamiento para los análisis de las variaciones del volumen removidos a través del tiempo.
- 7) Para el levantamiento de los perfiles o secciones transversales se trazó, inicialmente, un eje longitudinal.

Estos permitieron calcular la pérdida y/o acumulación de sedimentos, midiendo las variaciones en altura y amplitud de la erosión.

- 8) Las medidas iniciales de campo proporcionaron resultados suficientes para la elaboración de una primera base de datos, la que se complementó, comparó y actualizó durante los sucesivos relevamientos.
- 9) Las medidas, obtenidas de los ítems anteriores, fueron suficientes para efectuar tanto la confección de un plano con curvas de nivel y planos de un perfil longitudinal

y sus correspondientes perfiles transversales, elaborados a escala adecuada (noviembre 2015-junio 2016) (Figuras 12 y 13).

- 10) El cálculo de volumen se efectuó empleando el Método de la Sección Media. Este método, aplicado en dos secciones sucesivas, ya sea en corte o en relleno, se funda en la hipótesis que el volumen entre dos perfiles transversales consecutivos es la media de ambas superficies multiplicadas por la distancia entre las mismas.

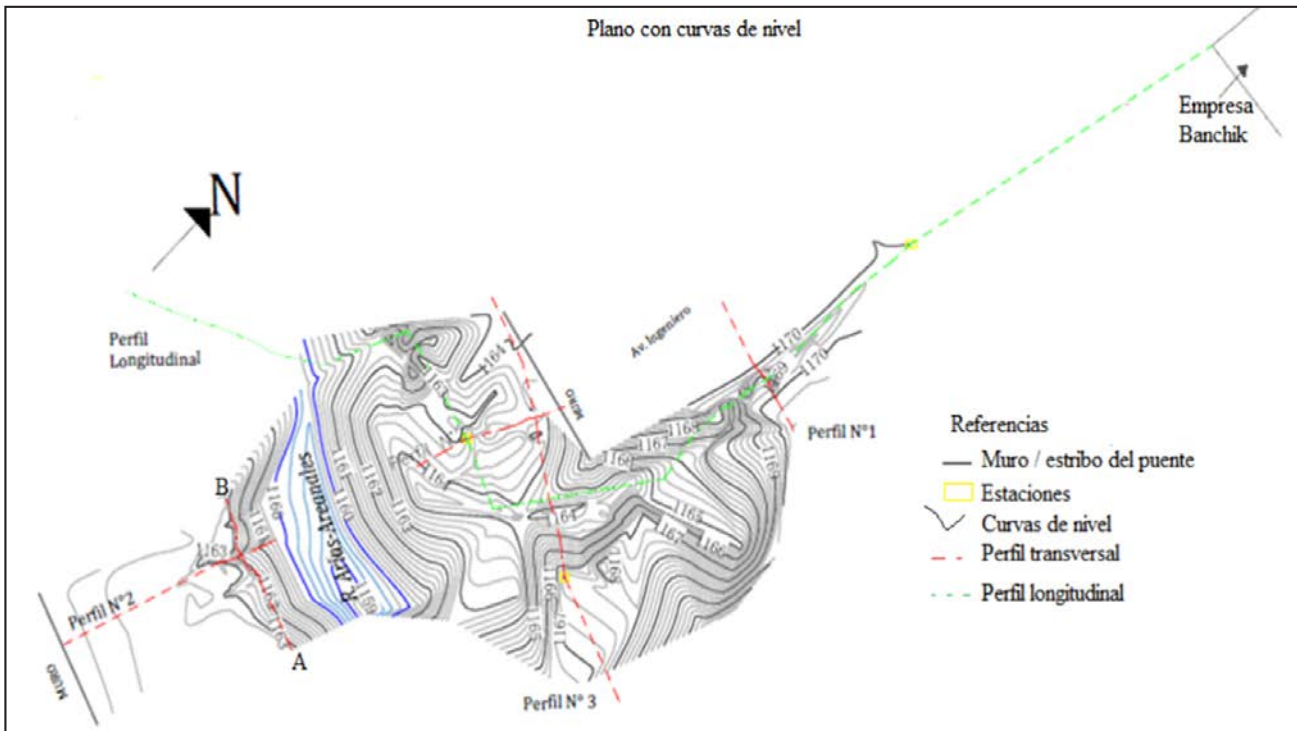


Figura 12. Plano con curvas de nivel de la zona de análisis.

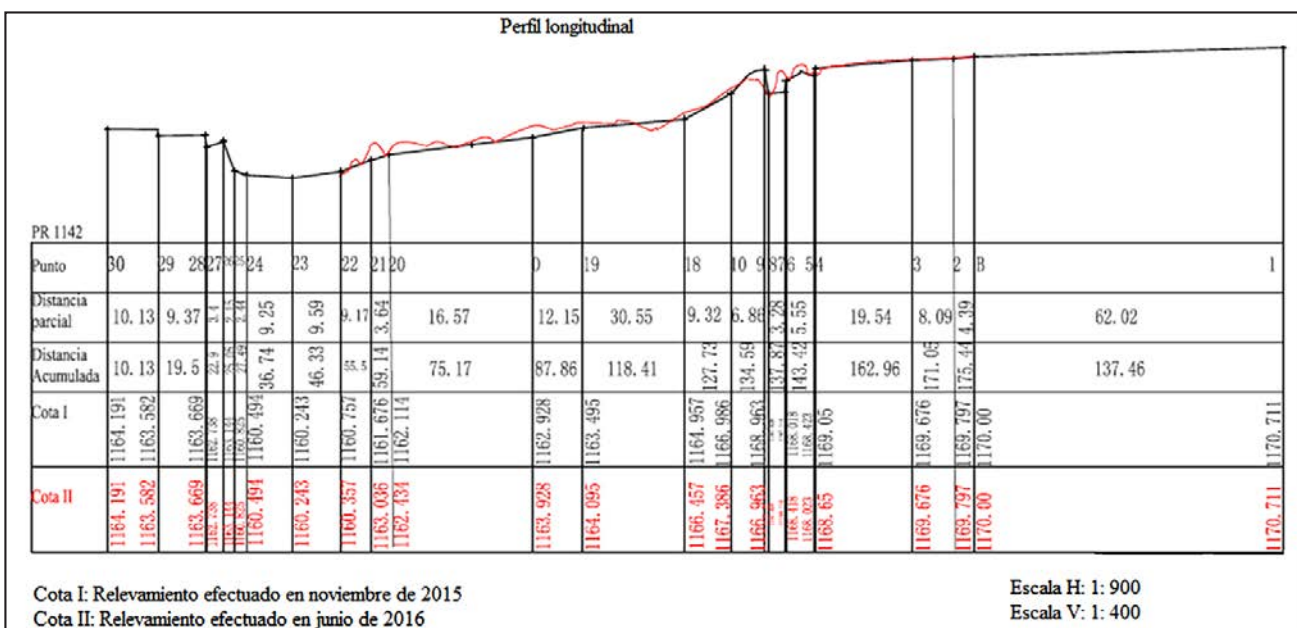


Figura 13. Perfil longitudinal de la zona de análisis.

La expresión empleada para cuantificar la pérdida de suelo va a depender de la forma de la cárcava. En general cada sección contemplada configura una forma de trapecio, lo cual lleva a considerar la amplitud de la parte superior de la cárcava, la amplitud del fondo y la profundidad. Los resultados que se obtienen aplicando este procedimiento son aproximados ya que sólo se miden puntos representativos del perfil. La Figura 14 muestra la forma geométrica en dos secciones consecutivas.

RESULTADOS

Los resultados que se obtuvieron aplicando estudios topográficos se realizaron sobre la base de la comparación entre las mediciones efectuadas desde noviembre de 2015 hasta diciembre de 2018 en la cárcava de la margen izquierda y en las cárcavas de la margen derecha.

Margen izquierda del río

Los indicios de la erosión retrocedente, detectados durante el primer reconocimiento efectuado en marzo de 2015, permitieron establecer los sectores donde se eligió el lugar de inicio de las

mediciones planialtimétricas y realización del trazado de perfiles, Figura 15.

Como resultado de los levantamientos efectuados en noviembre de 2015, mayo y junio de 2016 se confeccionó el Perfil Transversal N° 1 (*Paniagua Ortiz, 2016*) que se muestra en la Figura 11. Sobre esta base se compararon los perfiles del 2018.

Las notables modificaciones del terreno observadas durante el relevamiento efectuado en diciembre de 2018 requirieron, en un tramo de 7,80 m, del trazado de tres perfiles transversales. El primero al inicio del carcamaviento, coincidente con la erosión al que se denominó Perfil N° 3a, el segundo, Perfil N° 2a, a 5,26 m del primero y el tercero, Perfil N° 1 (coincidente con el Perfil N°1 del 2015, Figura N° 12) a 2,54 m del segundo. Se describen el Perfil N° 1a y el N° 3a. El N° 1 por la notable variación en amplitud y profundidad y el N° 3a por corresponder al tramo o sector de inicio.

Perfil N° 1: Se ubica entre el talud del ex-vertedero y la traza de circunvalación sureste. Para la comparación entre las mediciones realizadas en noviembre de 2015 y las de diciembre de 2018, se confeccionó el Perfil de la Figura N° 16.

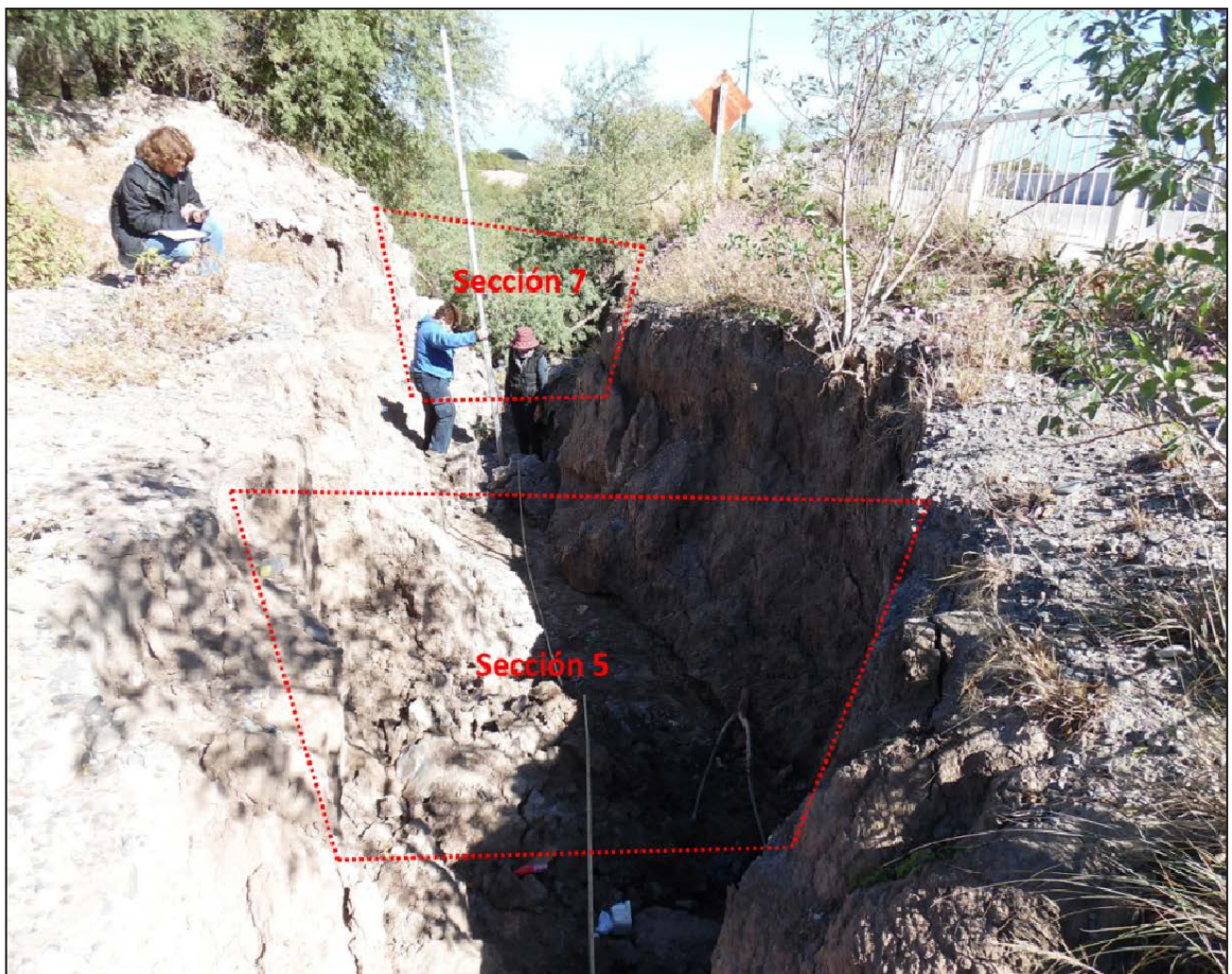


Figura 14. Formas geométricas en dos secciones consecutivas.



Figura 15. Evidencias de la erosión retrocedente.

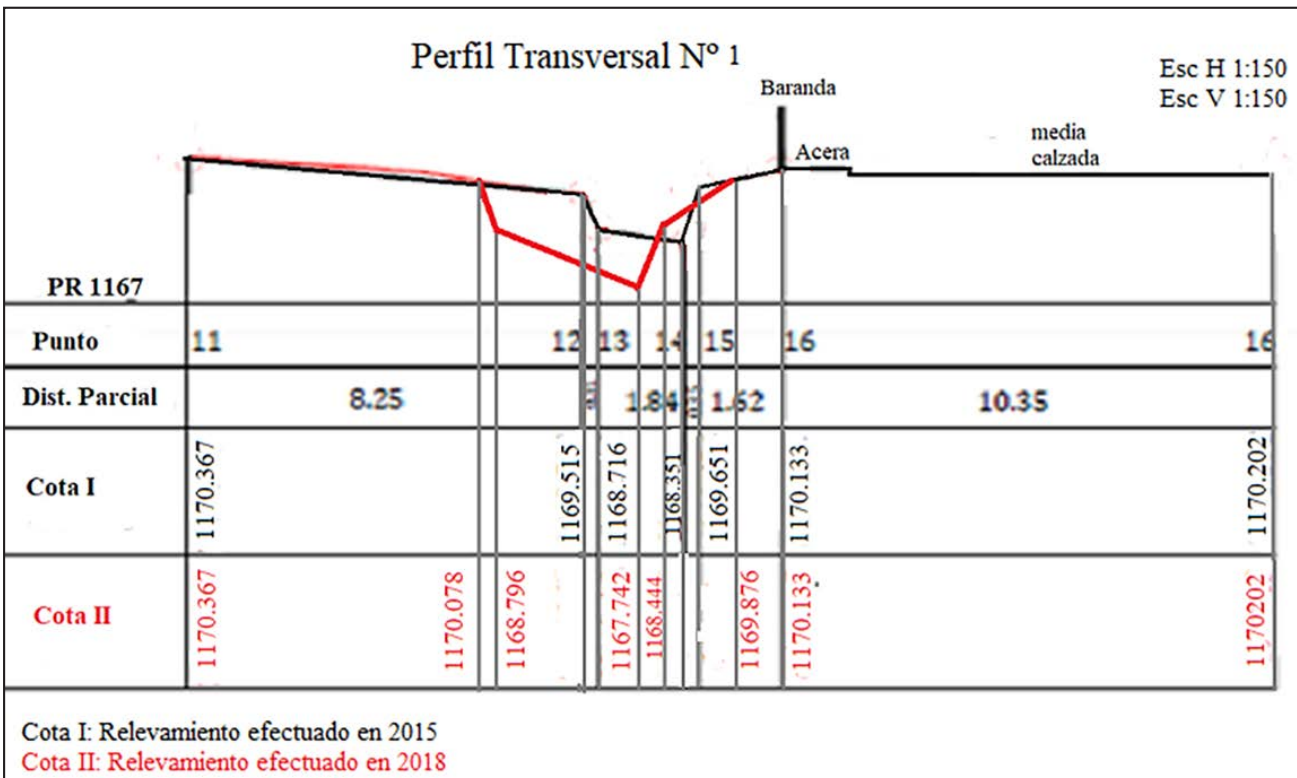


Figura 16. Perfil transversal N° 1. Variación en amplitud y profundidad, entre 2015 y 2018.

La distancia medida entre la margen derecha de la cárcava a la acera fue de 1,62 m. En 2016 se comprobó que la distancia disminuyó a 1,40 m; en mayo de 2018 llegó a 1,20 m y en diciembre del mismo año alcanzó 1,06 m. En el lapso antes y después de la época estival, 2015-2016, la amplitud se modificó de 2,40 m a 3,25 m; en mayo de 2018 alcanzó 4,70 m y en el último levantamiento efectuado en 2018 llegó a 5,83 m. Las profundidades determinadas en los mismos períodos fueron: -1,30m (2015); -1,65 m (2016); -2,50 m (mayo 2018). En diciembre de 2018, se observó la acumulación de sedimentos sobre la margen derecha de la cárcava, alterando el valor de la cota y por consiguiente modificando la profundidad a -2,10 m (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados comparativos del perfil transversal 1.

Fecha	Distancia a acera (m)	Profundidad (m)	Amplitud (m)
Noviembre 2015	1,62	-1,30	2,40
Junio 2016	1,40	-1,65	3,25
Mayo 2018	1,20	-2,50	4,70
Diciembre 2018	1,06	-2,10	5,83

Perfil N° 3a: Para la confección del plano y análisis de las variaciones en amplitud y profundidad, el Perfil N° 3a que representa la situación en junio de 2016 se dibujó a partir de las curvas de nivel y se comparó con las mediciones realizadas en diciembre de 2018 (Figura 17).

De los resultados obtenidos y comparados se determinó que la distancia desde la cárcava a la acera fue de 1,88 m, la profundidad -0,50 m y la amplitud de 1,66 m. En mayo de 2018 se midió nuevamente este perfil, determinándose que la distancia de la cárcava a la acera de la avenida se modificó alcanzando 1,50 m, la amplitud aumentó a 2,10 m y la profundidad -0,86 m.

En diciembre de 2018, luego de lluvias torrenciales, se detectaron nuevas alteraciones variando la profundidad a -2,30 m (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados obtenidos entre 2016 y 2018, del Perfil Transversal N° 3a.

Fecha	Distancia a acera (m)	Profundidad (m)	Amplitud (m)
Junio 2016	1,88	-0,50	1,66
Mayo 2018	1,50	-0,86	2,10
Diciembre 2018	1,50	-2,30	2,10

La Figura 18, a y b, muestra la evolución de la cárcava del Perfil N° 3a desde 2016 a mayo 2018. En b, el jalón indica la variación en depresión.

Del análisis de los tres perfiles transversales se determinó que el volumen desplazado en el período 2015- 2018 alcanzó los 13 m³, en un tramo de 7,80m, determinándose además una acumulación de sedimentos de 0,50 m³.

En el trayecto definido por la cárcava los tubos de subfusión y las cicatrices de desplome indican la potencialidad de futuros desprendimientos, los que modificarían el valor de las cotas y amplitud de la misma.

Además, se detectaron, en esta margen y sobre la llanura de inundación (próximas a las pilas del puente), sectores de acumulación de sedimentos provenientes tanto de la erosión de la cárcava como de la socavación de los taludes del ex-vertedero. En 2015-2016 se midió un desnivel -1,96 m y en 2018 de -1,40 m.

La erosión fluvial amplió, debajo del puente y próximo al canal de estiaje, una cárcava de 1,60 m en 2015 a 2,80 m en 2018, y en profundidad de -0,75 m a -1,40 m en los períodos citados.

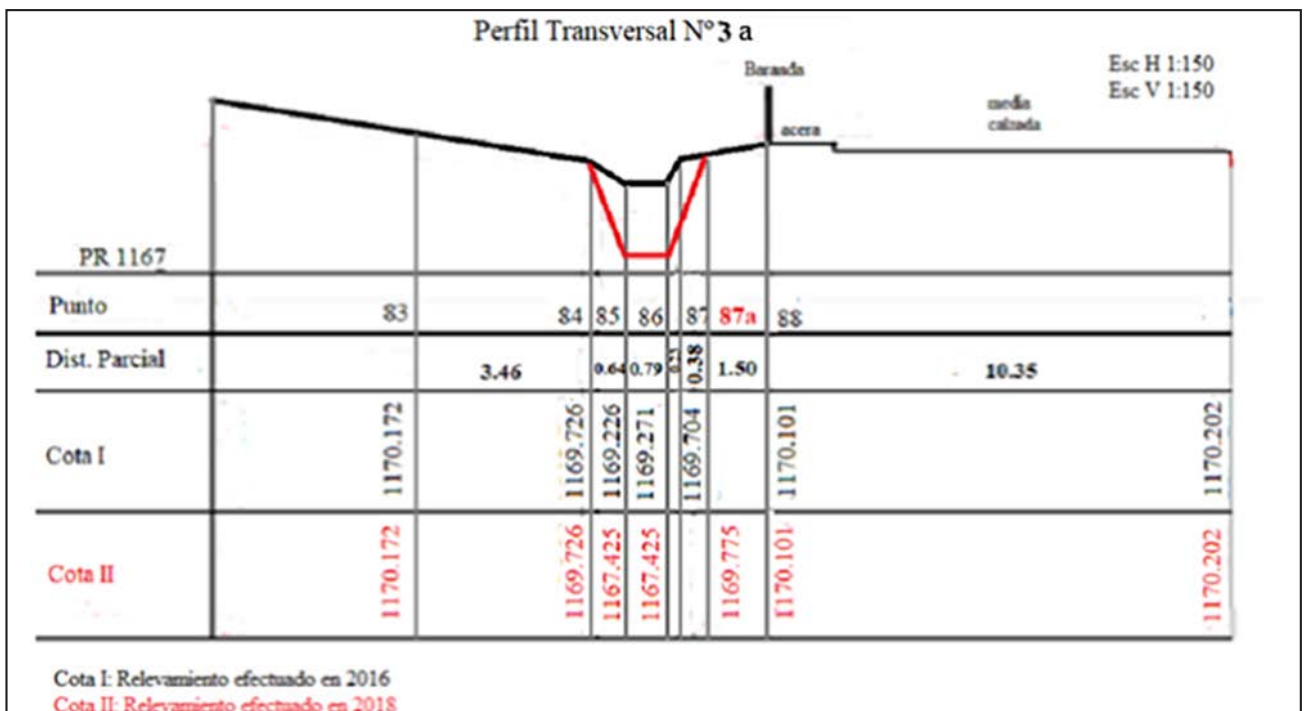


Figura 17. Perfil N° 3a. Variación en amplitud y profundidad, junio de 2016 y diciembre 2018.



Figura 18. Evolución de la cárcava, periodo mayo 2016- mayo 2018.

Margen derecha del río

En el período 2015-2016 se observó la formación de tres cárcavas contiguas a las pilas del puente exponiéndolas a la erosión fluvial, con el riesgo de afectar la estabilidad de las cimentaciones (Figura 19). La de mayor relevancia con -0,80 m de profundidad y una amplitud de 6 m. El volumen desplazado en la cárcava N° 1 fue de 4 m³; en la cárcava N° 2 de 5 m³ y en la cárcava N° 3 de 1 m³. La Figura 20 corresponde al Perfil A-B ubicado en planta en la Figura 12.

INTERPRETACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Las dos campañas iniciales de reconocimiento, efectuadas en marzo y fines de octubre de 2015, permitieron descubrir una alteración en la forma del terreno en el lapso de tiempo comprendido entre el período de estiaje y el inicio de período de lluvias. Este cambio en la morfología, aunque tenue a simple vista, pero con signos tales como tubos de subfusión y cicatrices, que son indicativos de una alteración mayor, prefijaron la necesidad de efectuar un estudio a los fines de establecer la magnitud de los cambios.

El Método de la Sección Media, elegido para el cálculo de volumen, no requiere de la medición de punto a punto de la forma del terreno ya que para su aplicación se aproximan las formas de las secciones a una figura geométrica. Esto nos indica que para las mediciones se podría haber elegido otro instrumento, por ejemplo un nivel óptico, acorde a la precisión de los resultados. Pero, la disponibilidad, rapidez en la obtención de los resultados

(x, y, z), además del procesamiento, determinaron la elección de los taquímetros electrónicos LEICA y SOKKIA, aun cuando su precisión es milimétrica.

Con relación a los resultados, en la margen izquierda en un lapso de 3 años, en el tramo inicial del carcavamiento de 7,80 m, el volumen desplazado fue de 13 m³. La última medición efectuada en el sector de mayor amplitud de la cárcava se encuentra a aproximadamente a 1 m de la acera. Los rasgos observados que son indicativos de una mayor modificación en un menor intervalo de tiempo predicen una alteración en el trazado de la avenida en este tramo.

En esta misma margen, los sedimentos provenientes de la cárcava y del talud del ex vertedero son desplazados depositándose una parte de ellos debajo del puente y los restantes en el cauce del río. Todos estos sedimentos son transportados por la corriente al Dique Cabra Corral elevando el nivel de base.

En la margen opuesta las pilas del puente son afectadas por cárcavas. La profundidad y amplitud de las cárcavas son variables, siendo las pilas centrales las más expuestas. Se reconocieron surcos y cicatrices que indican una futura extensión en dirección retrocedente hacia el estribo.

La evolución de las cárcavas en ambas márgenes constituye un riesgo para la obra civil, ya que el incremento de éstas expone las pilas y las fundaciones a la acción erosiva de la corriente fluvial. Dicha acción se ve incrementada en la margen izquierda por la proximidad al ex vertedero y por ser continuas en el tiempo requieren de medidas tendientes a protegerlas.



Figura 19. Cárcavas sobre margen derecha del río Arenales que afectan pilas del puente.

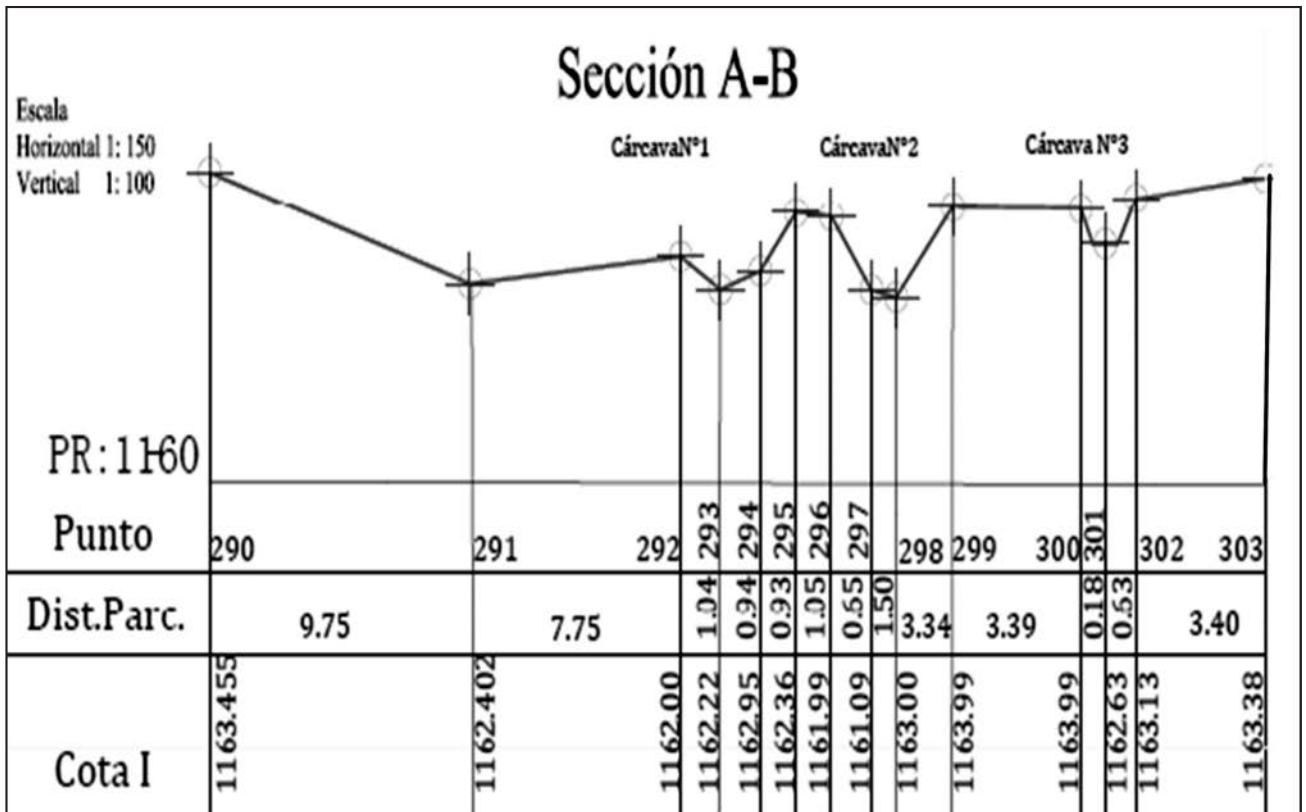


Figura 20. Perfil transversal de las cárcavas ubicadas sobre la margen derecha del río Arenales.

Las características de la zona permiten proponer las siguientes alternativas de mitigación o remediación.

- Para las cárcavas se recomiendan fajinadas y palizadas. En el caso de las cárcavas activas es conveniente desviar el agua que se dirige a ellas mediante un desagüe apropiado (Paniagua, 2016).
- Para estabilizar las laderas del ex basural se podrían utilizar cubiertas vivas y sistemas de confinamiento de suelos. Los riesgos relacionados con la actividad antrópica

en el ex vertedero requieren de controles periódicos o de monitoreos realizados según las normativas vigentes. Esto permitirá evaluar el tiempo de degradación de la materia orgánica y el aprovechamiento de los gases que se generan, además de la colocación de una cubierta vegetal adecuada ya que la cubierta que cubre al ex vertedero es una cubierta natural generada a través del tiempo y no realizada con la finalidad de disminuir el impacto visual y los olores propios de la zona.

DISCUSIÓN

Si bien existen diferentes trabajos en los que se efectuó la caracterización geológica y geomorfológica de la provincia de Salta (Igarzábal, 1991, 1992; Perucca, 1993; Sastre, 1993; Marcuzzi et al., 1996, 2018), para la individualización del área de trabajo se tuvieron en consideración las unidades morfogénicas que rodean a la ciudad de Salta, Capital, en relación con el río Arenales. Las mediciones topográficas realizadas (Paniagua, 2016, Quispe et al., 2015, 2018), permitieron efectuar comparaciones a través de un período de tiempo de tres años y determinar la progresión de los carcavamientos en un sector de la unidad del este correspondiente al tramo medio de la Sierra de Mojotoro, ubicado en el pie de monte del cerro La Pedrera. Los trabajos específicos (Musso, 2001; Saiquita, 2008; Sastre, 2000) proporcionaron las bases a partir de las cuales se consideraron los riesgos relacionados con la actividad antrópica.

CONCLUSIONES

En general, desde el punto de vista económico, las alteraciones que afectan a las obras viales, tienen un fuerte impacto en el municipio por las inversiones para reparación, prevención o modificación de las obras.

Margen izquierda del río

La actividad erosiva incrementó y modificó las dimensiones del carcavamiento medido entre noviembre de 2015 y diciembre de 2018. La profundidad se incrementó en -0.80 m en el sector donde se produjeron las principales variaciones, la amplitud en 3,43 m, la distancia a la avenida se redujo a 1,06 m.

La acumulación de materiales provenientes del carcavamiento y de los taludes del ex vertedero, sobre la llanura de inundación, se incrementó en 0,56 m. Los riesgos que genera esta acumulación son negativos ya que los materiales se incorporan como carga al cauce del río Arenales modificando el nivel de base local (embalse General Manuel Belgrano).

La modificación de la topografía favorece la erosión retrocedente provocando la evolución de un carcavamiento en el estribo de la margen izquierda del río y alrededor de las pilas del puente comprometiendo la estabilidad de la obra civil.

La acción antrópica que generó el inadecuado tratamiento y cobertura de los residuos y la falta de conservación del ex vertedero ubicado a 3 m del terraplén de la Avenida Ingenieros impactan negativamente en el paisaje.

La modificación antrópica del terreno, para la construcción de la obra vial con sus respectivas obras complementarias, provoca alteraciones en el talud norte.

Margen derecha del río

Los principales riesgos están vinculados con la dinámica fluvial erosiva en la parte media del cauce y en las terrazas. Las pilas y estribos del puente son afectados por el desarrollo de distintos carcavamientos.

Los niveles inferiores de las terrazas de la margen derecha se ven afectados por la erosión en las épocas de crecidas del río, los residuos arrancados de los taludes de la margen izquierda son depositados en la vegetación existente en la ribera y el material erosionado incrementa la carga transportada.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- GALLARDO, E.F. (1985).
Estratigrafía y tectónica del Cuaternario en la cordillera Oriental de Salta y Jujuy.
Beca de Iniciación. Informe Final. Inédito. Salta. CONICET., 90 pp.
- IGARZABAL, A. (1991).
Morfología de las Provincias de Salta y Jujuy.
Revista del Instituto de Geología y Minería N° 8. pp.97 – 121. UNJu.
- IGARZABAL, A. (1992).
Expansión urbana de la ciudad de Salta, riesgos geológicos e impacto ambiental.
II Congreso Regional del N.O.A. y su medio ambiente. Salta. UNSa. Consejo de Investigación.
- MARCUZZI, J.; NADIR, A.; ALONSO, R.; PERALTA, M. Y ARGANARAZ, R. (1996).
Riesgos Geoambientales y Ordenamiento Territorial del Gran Salta.
XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas IV:463-479.
- MARCUZZI J, VISICH M, QUISPE C. (2018).
Análisis del geoambiente e identificación de riesgos en las serranías del este, entre el C° San Bernardo y el C° La Pedrera, ciudad de Salta, Argentina.
VII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Puerto Madryn. Argentina. ISSN 2591- 6653. Pág. 272.
- MUSSO, H. E. (2001).
Contaminación en el río Arenales, su origen y tipo.
Universidad Nacional de Salta. Tesis de grado. Inédita.
- PANIAGUA ORTIZ, M.R. (2016).
Influencia Geoambiental del cauce del río Arenales en las laderas del Parque Industrial al SE del departamento Capital- Salta.
Tesis de grado. Inédita. Facultad de Ciencias Naturales.
- PERUCCA, L.P. (1993).
Estudios geomorfológicos y neotectónicos en los abanicos aluviales y bajada piedemonte en el flanco occidental del valle de Lerma.
Informe de Pasantía. Inédito. Facultad de Ciencias Naturales. UNSa.

- QUISPE, C. Y VISICH, M. C. (2015).
Aplicación de un método topográfico convencional y taquimetría electrónica para el análisis de procesos de remoción en masa.
VI Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Ushuaia. Argentina. ISBN 978-987-3767-34-0.
- QUISPE C, VISICH M, MARCUZZI J. (2018).
Estudio topográfico para el análisis del riesgo en el terraplén del puente del río Arenales, acceso circunvalación sureste, ciudad de Salta.
VII Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Puerto Madryn. Argentina. ISSN 2591- 6653. Pág. 289.
- SAIQUITA, A. M. (2008).
Ex basural La Pedrera, ciudad de Salta. Situación actual, consecuencias ambientales y su recuperación.
Tesis de grado. Inédita. Facultad de Humanidades. UNSa.
- TURNER, J. C. M. (1972).
Cordillera Oriental. Geología regional Argentina.
Academia Nacional de Ciencias, 117- 142. Córdoba. Argentina. Ed. A. F. Leanza.
- TURNER, J. C. M., MON, R. (1979).
Cordillera Oriental. Geología Regional Argentina, Tomo 1: 57-94.
Academia Nacional de Ciencias, Córdoba. Argentina. Ed. A. F. Leanza.