

Estimación de reservas de yeso de la Cantera Adolfo López, ubicada en la comuna de Tapia, Departamento Trancas, Provincia de Tucumán, República Argentina

CÁRDENAS GONZÁLEZ P.¹, LAZARTE J. E.^{1,2}, DELLA VEDOVA M.^{1,2}, LOPÉZ ISLA G.^{1,2}, ACOSTA NAGLE, A.E.^{1,2}, HORTA, L.R.^{1,2}

Abstract: *ESTIMATED GYPSUM RESERVES OF THE ADOLFO LÓPEZ QUARRY, LOCATED IN THE COMMUNE OF TAPIA, TRANCAS DEPARTMENT, TUCUMÁN PROVINCE, ARGENTINE REPUBLIC.* The Adolfo López quarry, located in the Tapia area, northern Tucumán Province, exploits gypsum beds hosted within the Neogene Río Salí Formation, in the Tapia-Trancas Basin. This contribution presents a preliminary geological and geometrical assessment of the deposit, with emphasis on the stratigraphic position of the gypsum-bearing interval, the structural controls on bed geometry, and a first-order estimate of exploitable gypsum resources. The study is based on geological mapping, field measurements of strike and dip, transverse profiles across the main outcrops, and geometric modeling of selected sectors. Gypsum occurs as saccharoidal to microgranular beds interbedded with fine-grained siliciclastic deposits displaying reddish to greenish hues, and is locally associated with nodular alabastrine gypsum at the base of the economically relevant interval. In a representative section at Loma La Cruz, five gypsum layers interbedded with brown pelitic levels were documented, interpreted as the result of repeated episodes dominated by evaporation in a continental sabkha to saline mudflat environment. Two sectors were evaluated. Sector 1 yields an estimated gypsum volume of 696 m³, equivalent to 1,468 tonnes using a density of 2.11 t/m³; however, its economic potential is strongly constrained by the rapid increase in overburden thickness in the dip direction. Sector 2 shows substantially greater potential, with a preliminary estimate of 13,731 m³ (29,035 tonnes), although lateral continuity of the gypsum horizon still requires field confirmation and, therefore, this value should be regarded as an inferred and conservative estimate rather than a fully delineated reserve. The main control on exploitability is the relationship between the low dip of the beds, topography, and overburden thickness. Results indicate that exploitation should preferentially advance opposite to the dip direction, toward higher topographic positions where overburden decreases. Additionally, a simplified rehabilitation scheme is proposed to demonstrate the environmental feasibility of progressive restoration; however, restoration design should be treated as a secondary component relative to the geological framework and resource estimation.

Resumen: La cantera Adolfo López, ubicada en el área de Tapia, en el norte de la provincia de Tucumán, explota bancos de yeso alojados en la Formación Río Salí de edad neógena, dentro de la cuenca Tapia-Trancas. Esta contribución, presenta una evaluación preliminar de carácter geológico y geométrico del depósito, con énfasis en la posición estratigráfica del intervalo portador de yeso, los controles estructurales sobre la geometría de los bancos y una estimación de primer orden de los recursos de yeso explotables. El estudio se basa en cartografía geológica, mediciones de rumbo y buzamiento en campo, perfiles transversales a través de los principales afloramientos y modelado geométrico de sectores seleccionados. El yeso se presenta como bancos de textura sacarosa a microgranular intercalados con depósitos silicoclásticos finos de tonalidades rojizas a verdosas y se asocia localmente con yeso alabastrino nodular en la base del intervalo de interés económico. En una sección representativa en Loma La Cruz se documentaron cinco capas de yeso intercaladas con niveles pelíticos pardos,

¹ Facultad de Ciencias Naturales e I.M.L., U.N.T., 2Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO-CONI-CET). E-mail: pocardenas20@alumnos.csnat.unt.edu.ar

interpretadas como el producto de episodios repetidos dominados por evaporación en un ambiente de sabkha continental a planicie fangosa salina. Se evaluaron dos sectores. El Sector 1 arroja un volumen estimado de yeso de 696 m³, equivalente a 1.468 t utilizando una densidad de 2,11 t/m³; sin embargo, su potencial económico está fuertemente limitado por el rápido incremento del recubrimiento en la dirección del buzamiento. El Sector 2 muestra un potencial sustancialmente mayor, con una estimación preliminar de 13.731 m³ (29.035 t), aunque la continuidad lateral del horizonte yesífero aún requiere confirmación de campo y, por lo tanto, este valor debe considerarse como una estimación inferida y conservadora, más que como una reserva plenamente delimitada. El principal control sobre la explotabilidad es la relación entre el bajo buzamiento de los bancos, la topografía y el espesor del recubrimiento. Los resultados indican que la explotación debería avanzar preferentemente en sentido opuesto al buzamiento, hacia posiciones topográficas más elevadas donde el recubrimiento disminuye. Asimismo, se propone un esquema sintético de rehabilitación para demostrar la factibilidad ambiental de una restauración progresiva, aunque el diseño de restauración debe tratarse como un componente secundario respecto del núcleo geológico y de estimación del recurso.

Key words: Gypsum. Adolfo López Quarry. Río Salí Formation. Reserves.

Palabras clave: Yeso. Cantera Adolfo López. Formación Río Salí. Reservas.

Introducción

Con el objetivo de caracterizar los bancos de yeso de la cantera Adolfo López, Tapia, Departamento Trancas, se analizó su composición mineralógica, química y volumen, además se estimaron y clasificaron las reservas del mineral según su calidad y potencial de explotación.

El área de estudio pertenece a la subcuenca Vipos-Tapia situada aproximadamente en el sector septentrional de la Provincia de Tucumán, en el Departamento Trancas, a unos 25 Km al NO de San Miguel de Tucumán, en la depresión conocida como cuenca de Tapia-Trancas. Con coordenadas centrales -26°36'2.50"S, -65°17'55.20"O, (Figura 1).

La Cantera Adolfo López, comprende 126 hectáreas, 66 hectáreas en el área de explotación y 60 hectáreas en el área de producción (Anexo A). El acceso a la cantera desde San Miguel de Tucumán se inicia por la Ruta Nacional 9 (RN 9). Tras recorrer unos 25 kilómetros en dirección norte, se llega a la localidad de Tapia, donde la RN 9 se intersecta con la Ruta Provincial 341 (RP 341). Desde este punto, se continúa por la RP 341 unos 3 kilómetros en dirección Oeste hasta llegar directamente a la cantera. La zona del predio se conecta, a su vez, con una red de caminos vecinales, accesos privados y numerosas sendas, lo que facilita el recorrido y la exploración dentro de este distrito yesífero.

Antecedentes

El yeso es uno de los minerales industriales más importantes del noroeste argentino debido a su amplio uso en los sectores de la construcción y la agricultura. En la provincia de Tucumán, su explotación tiene una larga trayectoria, particularmente en el área Tapia-Trancas, donde los depósitos neógenos contienen varios niveles evaporíticos de importancia económica. A pesar de esta extensa tradición, muchas canteras siguen siendo evaluadas con información geológica desactualizada, restricciones geométricas incompletas o criterios operativos que no están plenamente integrados con las observaciones estratigráficas y estructurales. Como resultado, persiste la necesidad de contar con evaluaciones geológicas actualizadas a escala de sitio, capaces de distinguir entre sectores con verdadero potencial minero y sectores donde la geometría del recubrimiento compromete rápidamente la extracción.

Los estudios sobre los depósitos de yeso en la región tienen una larga historia, con los primeros registros de explotación que datan de 1939. En el año 1961 las explotaciones fueron oficialmente legalizadas pudiéndose, tras un control oficial mensual, conocer los volúmenes de extracción y los usos y destinos del yeso (Gamundi y Martensen, 1999). A lo largo de los años, se han realizado diversas evaluaciones,

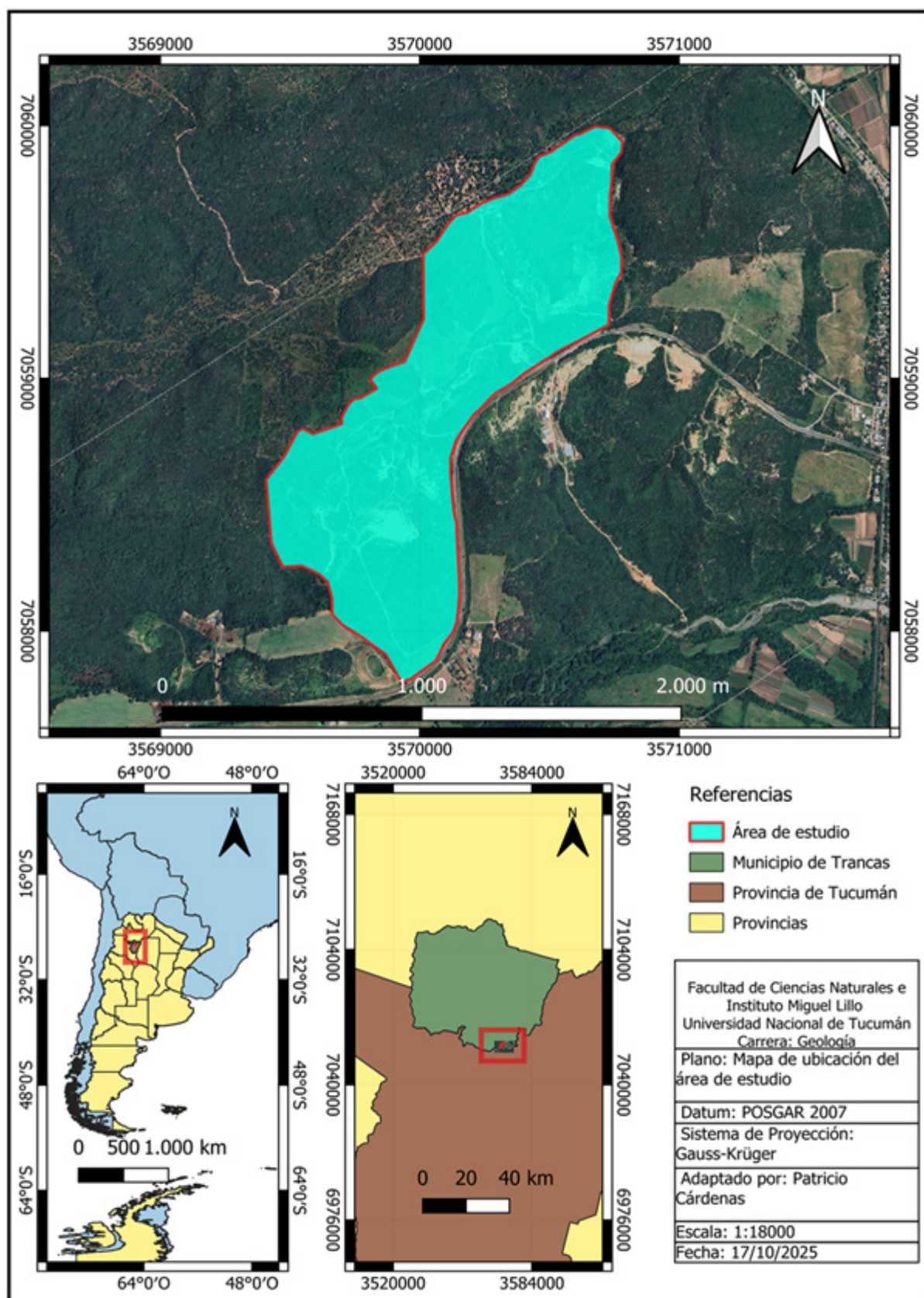


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Figure 1. Location of the study area.

como las de, Mon y Urdaneta (1972), Suayter y Urdaneta (1974) y especialmente el estudio detallado de Tumanex S.R.L. en 1978, que cuantificó en el área de Tapia 273.516 tn de mineral positivo y 30.670 tn de mineral probable, teniendo en cuenta a los bancos de más de 1m de potencia, con un encape menor a 2 m y con una ley superior al 85 %. Los yacimientos más significativos se encuentran ubicados en los faldeos orientales de las Cumbres Calchaquíes como así también de las sierras de la Ramada y del Campo. Por distintos motivos, entre otros el de calidad, se estima que la provincia podría aumentar considerablemente la producción yesífera al activar viejas canteras y realizar nuevas evaluaciones de reservas.

El objetivo de este trabajo es, por lo tanto, presentar una evaluación geológica preliminar del intervalo portador de yeso expuesto en la cantera Adolfo López y estimar, en una primera aproximación, los recursos explotables de yeso en los sectores de mayor interés operativo. Los objetivos específicos son: (1) describir el marco geológico y estratigráfico del depósito; (2) caracterizar la litología y la geometría de los bancos de yeso; (3) evaluar de qué manera la topografía y el buzamiento controlan el espesor del recubrimiento y la factibilidad minera; y (4) proporcionar una estimación conservadora de recursos para los sectores más prospectivos. Como objetivo secundario, se propone esbozar un enfoque sintético de rehabilitación progresiva adecuado al contexto de la cantera. A fin de mantener una estructura clara, la abundante información descriptiva del trabajo original ha sido aquí reducida a los componentes directamente relevantes para el depósito, su génesis y su potencial minero.

Marco Geológico

La cuenca Tapia-Trancas se sitúa en un sector delimitado al oeste por las Cumbres de Santa Bárbara, pertenecientes a las Sierras Pampeanas (Ramos, 1999), y al este por la Sierra de Medina y la Cumbre de Yaramí, vinculadas a las Sierras Subandinas (Rolleri, 1976). Su basamen-

to cristalino está conformado por las Formaciones Puncoviscana y Medina, sobre las cuales se asienta el Grupo Salta con una historia tecto-sedimentaria que abarca desde el Cretácico temprano hasta el Paleógeno (Salfity y Marquillas, 1999). En esta cuenca, afloran unidades litoestratigráficas paleógenas y neógenas (Figura 2). El relleno sedimentario continental inicia con la Formación Río Loro (Paleoceno Superior-Eoceno Inferior), interpretada como un ambiente de canales meandantes (Powell y Palma, 1981), seguida concordantemente por la Formación Río Nío (Eoceno), la cual presenta variaciones en su espesor debido a procesos erosivos (Bossi, 1984; Bossi *et al.*, 1998). Posteriormente se desarrolla el Grupo Choromoro (Mon y Urdaneta, 1972), que incluye a la Formación Río Salí (Mioceno medio), caracterizada por facies de lago abierto vinculadas a una ingresión marina (Gavriloff y Bossi, 1992; Marengo, 2012), y a la Formación India Muerta, compuesta por depósitos fluviales de clima árido. La secuencia neógena culmina con las Formaciones Chulca (Plioceno-Pleistoceno temprano), cuyo color se asocia a su área fuente cretácica (Bossi *et al.*, 1998), y Acequiones (Plioceno-Pleistoceno inferior). Finalmente, el Holoceno está representado por la Formación Tucumán (Gomez Macedo, 2004), estos sedimentos están integrados de abajo hacia arriba por Loess fracción limosa, de color pardo claro, con intercalaciones arenosas milimétricas y pequeñas concreciones de yeso.

Materiales y Métodos

Este estudio se basa en la integración de observaciones de campo, perfiles geométricos, descripción litológica y modelado volumétrico simple. Las descripciones geográficas y ambientales regionales han sido aquí omitidas, salvo cuando resultan directamente relevantes para el depósito o para la interpretación de la factibilidad minera.

El trabajo de campo incluyó reconocimiento geológico de la cantera y de los afloramientos circundantes, medición de rumbo y

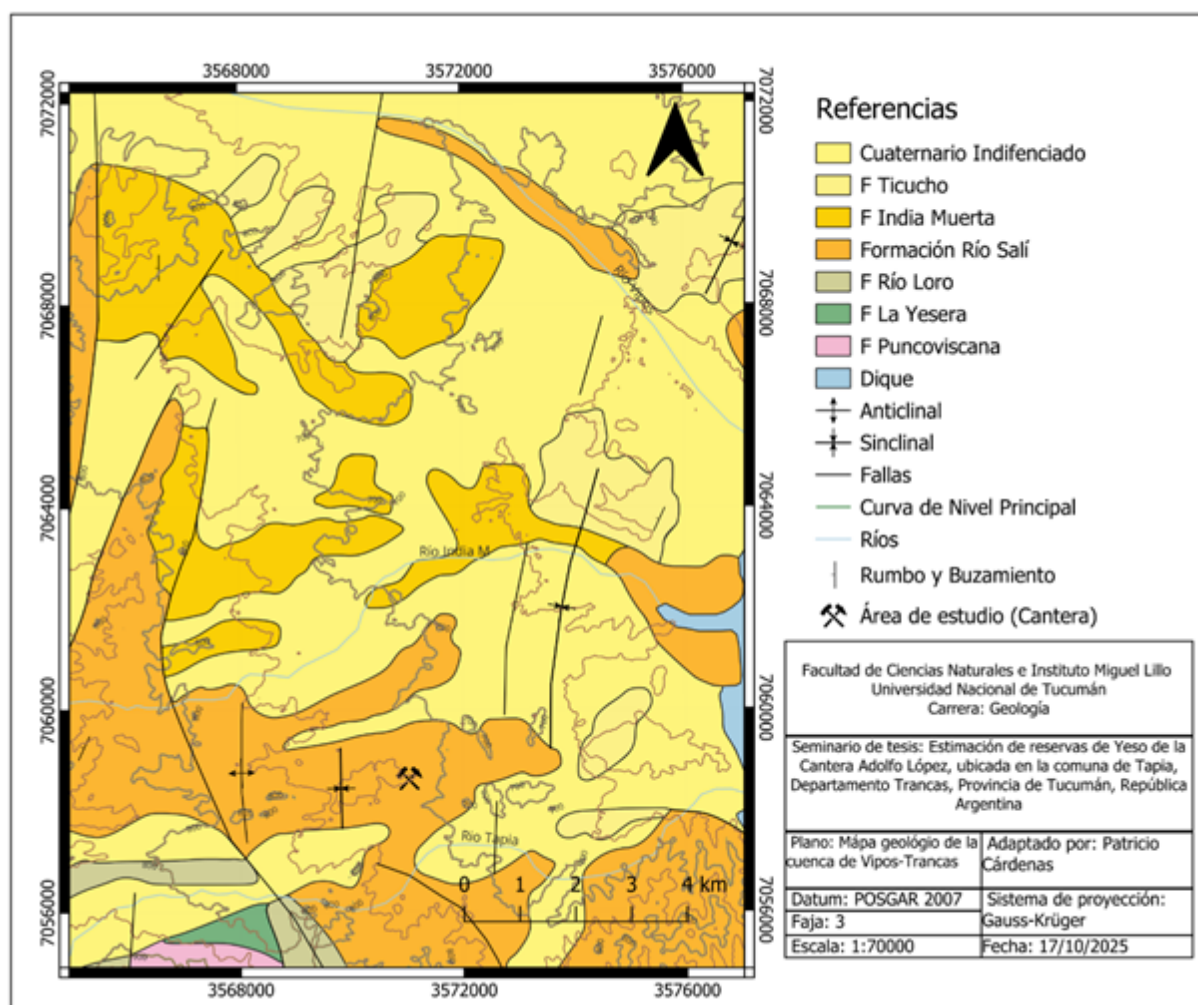


Figura 2. Mapa geológico de la subcuenca de Vipos-Tapia (modificado de González *et al.*, 2000). **Figure 2.** Geological map of the Vipos-Tapia sub-basin (modified from González *et al.*, 2000).

buzamiento en el intervalo portador de yeso, descripción de secciones expuestas representativas y obtención de perfiles transversales a través de los principales sectores de interés. Se prestó especial atención a la relación entre la geometría de las capas y la topografía, ya que la viabilidad económica de la extracción depende en gran medida del espesor del recubrimiento.

Se levantó una sección estratigráfica representativa de aproximadamente 11,2 m de espesor en Loma La Cruz, a lo largo de la Ruta Provincial 341. Esta sección incluye cinco bancos de yeso intercalados con cinco intervalos pelíticos pardos y fue utilizada como base principal para la interpretación paleoambiental. Observaciones adicionales en la propia cantera se emplearon para documentar texturas del yeso, asociaciones internas y la presencia de niveles nodulares alabastrinos.

Se seleccionaron dos sectores para la evaluación de recursos. El Sector 1 corresponde a un banco de yeso de aproximadamente 240 m de longitud, donde se evaluaron el espesor del recubrimiento y el espesor del yeso en segmentos septentrionales y meridionales. El Sector 2 corresponde al área actualmente explotada y fue subdividido en tres subsectores (S2a, S2b y S2c) de acuerdo con la aparente discontinuidad de los afloramientos de yeso a diferentes niveles topográficos.

La estimación volumétrica se realizó mediante modelado geométrico basado en perfiles utilizando el software RecMin. En el Sector 1, se calcularon volúmenes por separado para las subáreas norte y sur, ya que el espesor del yeso y del recubrimiento difieren significativamente entre ellas. Para el Sector 2, el área minera pro-

puesta fue delimitada mediante restricciones topográficas y de afloramiento, y se aplicó un espesor medio conservador de yeso de 0,70 m. La conversión a tonelaje utilizó una densidad de $2,11 \text{ t/m}^3$, siguiendo determinaciones locales previas reportadas por Gómez Macedo (2004). Debido a que la continuidad lateral en el Sector 2 aún no ha sido demostrada completamente en el campo, la cifra resultante es tratada aquí como una estimación preliminar inferida, más que como una reserva medida.

La caracterización química y mineralógica se limita a análisis locales previamente publicados o inéditos, y aún no proporciona un conjunto de datos analíticos lo suficientemente robusto como para sustentar un estudio centrado en la calidad del yeso. Por esta razón, las observaciones mineralógicas y composicionales se consideran aquí como información de apoyo y no como un eje analítico principal.

Resultados

Mineralogía y Composición Química

El yeso que se explota en este distrito minero, es fundamentalmente del tipo macizo de espesor comprendido entre 0,7 m y 2 m medidos, incluyendo las arcilitas y limos más lentes de areniscas intercaladas en el mismo. La textura microgranular es más común que la granular, con un color blanco verdoso claro y finas intercalaciones arcillosas que le dan un carácter laminar (Figura 3). También encontramos capas finas y nódulos de yeso de alabastro (Figura 4). Se observa igualmente yeso fibroso relleno de cavidades y micro rosetas de yeso en algunas zonas.

El yeso se ha consolidado como el principal componente mineralógico de las canteras analizadas, manteniendo una coherencia histórica con los estudios geoquímicos realizados por Peña (1970) y Suayter y Urdaneta (1974). Estas investigaciones previas ya indicaban una predominancia del mineral con contenidos relativos de hasta el 94% en peso, aunque con variaciones locales que descendían hasta el 79% en



Figura 3. Yeso macizo con intercalaciones de arcillosas.
Figure 3. Solid gypsum with clay intercalations.



Figura 4. Nódulos (bochones) de alabastro. **Figure 4.** Alabaster nodules (bumps).

ciertos niveles estratigráficos (Tabla 1).

En concordancia con estos antecedentes, los resultados obtenidos en el presente trabajo (Tabla 1) ratifican la alta pureza del yacimiento, destacando la muestra YT4 con un valor de 96,88% de $\text{CaSO}_4 \cdot \text{X}2\text{H}_2\text{O}$, lo cual representa una calidad óptima para el aprovechamiento industrial. Si bien las muestras YT6 e YT2 evidencian una mayor concentración de material insoluble vinculado a impurezas arcillosas que alcanzan el 6%, el promedio

COMPOSICIÓN/ MUESTRA	YT6	YT4	YT5	YT2	Promedio
AGUA LIBRE	0.74%	1.39%	0.11%	0.66%	0.73%
AGUA COMBINADA	10.68%	19.39%	13.00%	3.45%	11.63%
ANHIDRIDO SULFURICO (SO ₃)	38.40%	47.58%	51.08%	46.48%	45.89%
OXIDO DE CALCIO (CaO)	23.29%	28.52%	23.66%	29.48%	26.24%
INSOLUBLES (en HCl)	5.98%	2.64%	3.26%	6.00%	4.47%
OXIDOS REUNIDOS (Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃)	3.48%	0.48%	3.35%	0.42%	1.93%
NO ANALIZADOS	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
YESO EXPRESADO COMO Ca SO ₄	61.67%	76.10%	74.74%	75.96%	72.12%
YESO EXPRESADO COMO Ca SO ₄ X2 H ₂ O	73.11%	96.88%	94.46%	80.07%	86.13%

Tabla 1. Composición mineralógica del yeso en el área de estudio. **Table 1.** Mineralogical composition of gypsum in the study area.

general de pureza de las muestras se sitúa en un 86,13 %, confirmando la viabilidad económica y técnica del recurso mineral.

Estratigrafía y Paleoambiente

El análisis del paleoambiente en nuestra área de estudio se basa en un perfil estratigráfico de aproximadamente 11,2 m de altura ubicado en la ruta provincial 341, específicamente en el sector conocido como Loma La Cruz, a 570 m de la localidad de Tapia (Figura 5). Este perfil se caracteriza por la presencia de cinco capas de yeso intercaladas con cinco capas de arcilla limosa de color pardo.

Las características de esta secuencia son consistentes con la parte superior del miembro inferior (El Ojo) de la Formación Río Salí. Esta unidad, cuya denominación fue propuesta por Porto (1980), se describió originalmente como una sucesión con predominio de arcillas sobre los limos, de colores verde y rojo, y con abundantes intercalaciones de evaporitas en diversas formas, incluyendo alabastro, yeso macizo sacaroideo y yeso conglomerádico.

En el afloramiento pudimos observar las capas de yeso (Y1 a Y5) y de arcilla parda (Ar1 a Ar5), esta alternancia refleja las condiciones paleoclimáticas de la región. Las capas de yeso son indicativas de un ambiente árido, donde el aporte de agua era mínimo y el proceso dominante era la evaporación. Por otro lado, las capas de arcilla parda señalan un ambiente oxidante bajo condiciones áridas.

En el afloramiento pudimos observar las capas de yeso (Y1 a Y5) y de arcilla parda (Ar1 a

Ar5), esta alternancia refleja las condiciones paleoclimáticas de la región. Las capas de yeso son indicativas de un ambiente árido, donde el aporte de agua era mínimo y el proceso dominante era la evaporación. Por otro lado, las capas de arcilla parda también señalan un ambiente oxidante bajo condiciones áridas.

La alternancia entre estas capas sugiere un patrón cíclico de eventos: episodios intermitentes de precipitación o inundación que depositaban los sedimentos finos, seguidos por periodos de intensa evaporación que provocaban la precipitación del yeso.

Estimación de Reservas

Para realizar una propuesta de explotación, se han analizado dos sectores dentro del área de estudio. Estos sectores se han denominado Sector 1 y Sector 2 (Figura 6).

Sector 1

En el Sector 1, se encuentra un banco de yeso de aproximadamente 240 m de longitud. A partir de un perfil transversal en dirección norte-sur (Figura 7), se observa que el banco presenta un escape más o menos constante.

Caracterización Geológica

Dadas las discrepancias en los parámetros geológicos registrados (Tabla 2), el Sector 1 se dividió en las zonas Norte y Sur para optimizar su caracterización y posterior evaluación de reservas.

Para evaluar la rentabilidad del proyecto, se

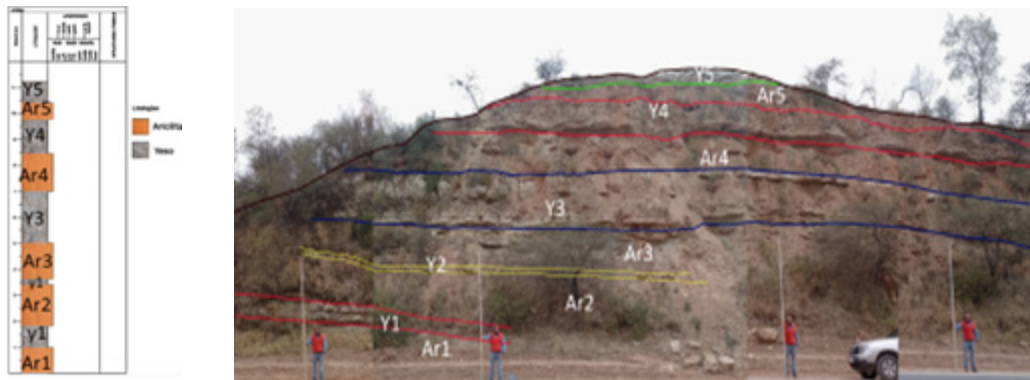


Figura 5. Perfil estratigráfico en Loma La Cruz. **Figure 5.** Stratigraphic profile at Loma La Cruz.

trazó un perfil transversal E-O en la zona norte siguiendo la dirección del buzamiento (Figura 8). Se determinó que el incremento del relieve hacia el oeste afecta directamente la relación estéril/mineral: debido al buzamiento de 2° , el encape aumenta de 2,2 m a 2,5 m tras un avance hori-

zontal de apenas 3,5 m (Figuras 8 y 9).

También se hizo un perfil transversal en la zona sur en dirección sureste-noroeste (Figura 10), la cual corresponde a la dirección perpendicular al acimut (DI). Dado que en esta zona el buzamiento es de 11° , el recubrimiento

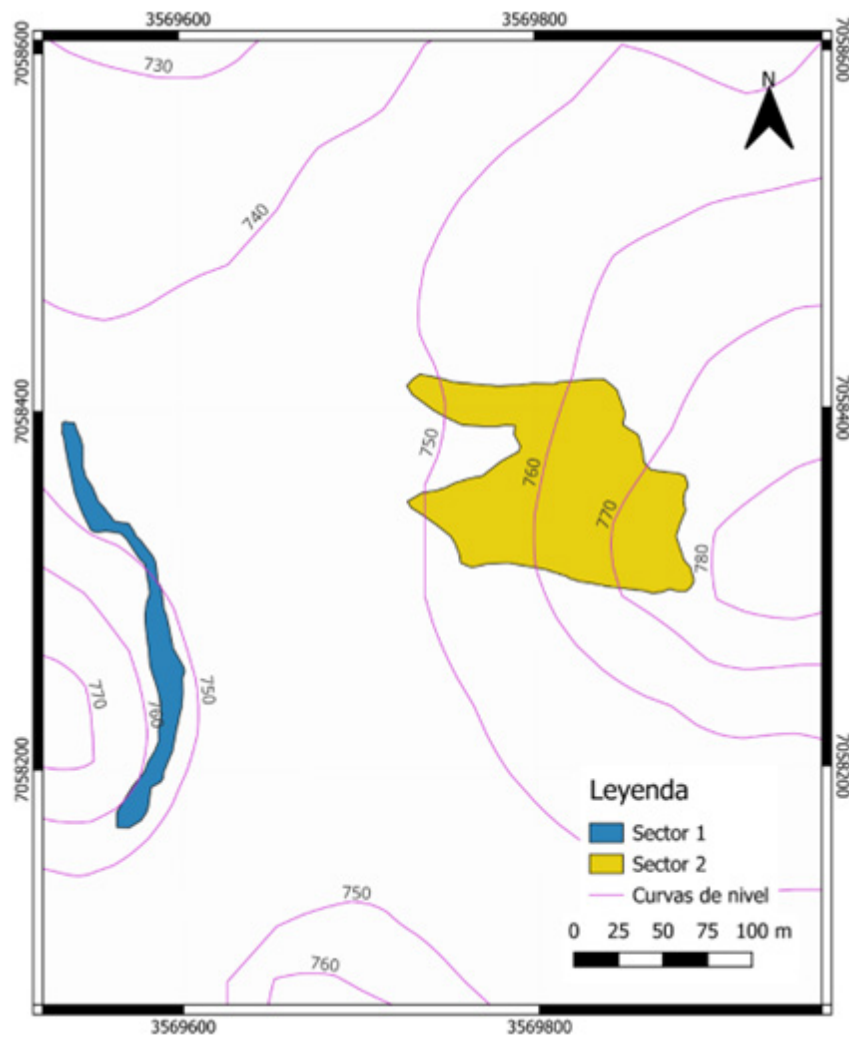


Figura 6. Sectores 1 y 2. **Figure 6.** Sectors 1 and 2.

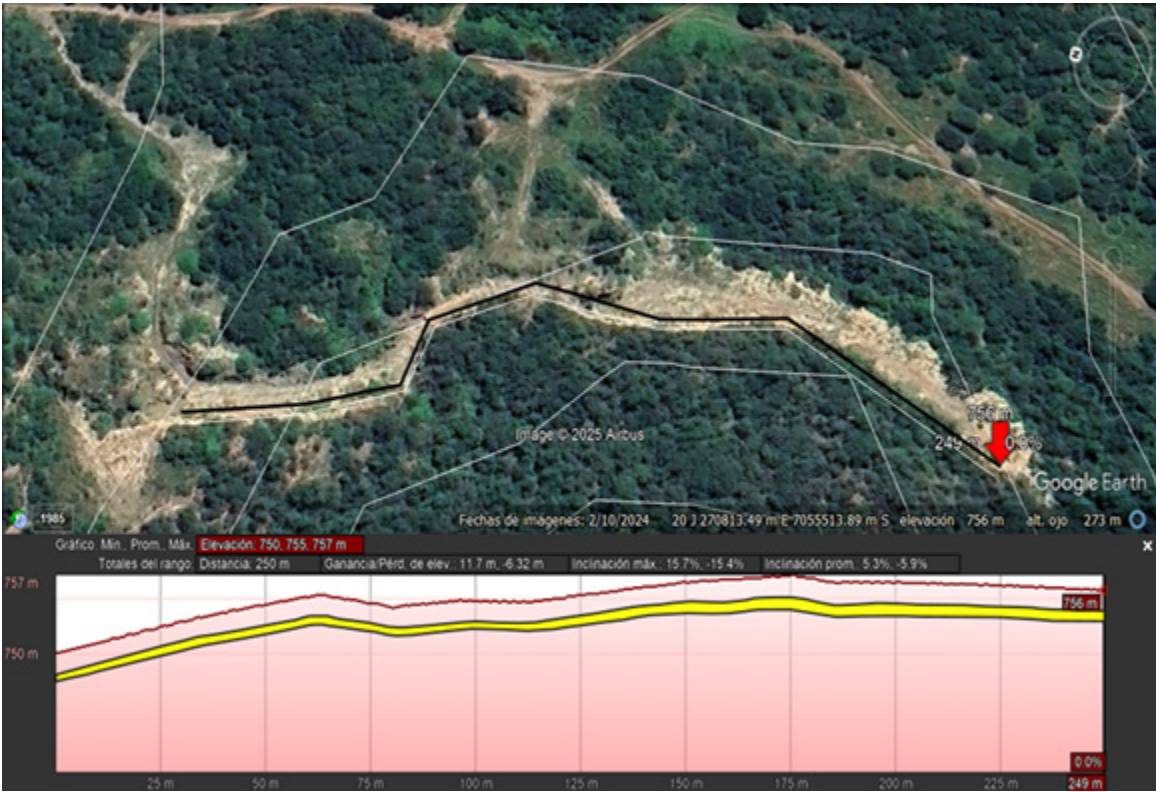


Figura 7. Relación entre el banco de yeso y la topografía en sentido N-S. **Figure 7.** Relationship between the gypsum deposit and the topography in a N-S direction.

aumenta de 3 a 5,6 m al avanzar 3 m horizontalmente (Figura 11).

Estimación Volumétrica y de Recursos

Gamundi y Martensen (1999), señalan que el límite económico corresponde a un espesor de 2 m de encape, considerando los mecanismos utilizados en este tipo de cantera para realizar en destape.

A pesar de los antecedentes anteriores y considerando los importantes espesores, 0,87 m en la zona sur y 1,5 m en la zona norte del afloramiento, se ha realizado el cálculo del volu-

men del banco de yeso, considerando un avance horizontal de 3 m (Figura 12). Se entregan los volúmenes de yeso y encape, para determinar si la explotación bajo esos parámetros es rentable.

Para el cálculo de volúmenes se utilizó el software minero RecMin, empleando el método de los perfiles con un avance horizontal de 3 metros. En la tabla 3 se observan los valores de volumen y encape para ambas zonas.

Considerando una densidad de 2,11 tn/m³ (determinada por Gómez Macedo, 2004), el Sector 1 cuenta con un recurso total de 1.468 toneladas de yeso.

Parámetro	Zona Norte	Zona Sur
Encape (Estéril)	2,2 m	~3,0 m
Espesor del Yeso	0,87 m	1,5 m
Acimut	182°	220°
Buzamiento	2° Oeste	11° Oeste

Tabla 2. Parámetros Geológicos y Estructurales del Sector 1. **Table 2.** Geological and Structural Parameters of Sector 1.

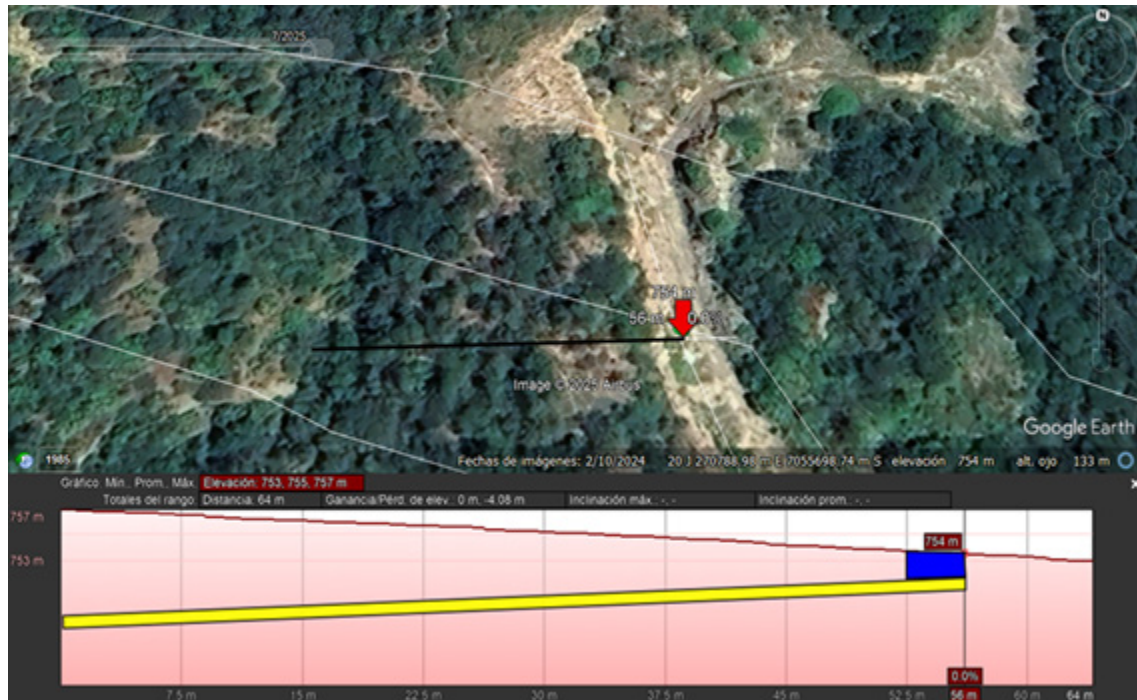


Figura 8. Perfil transversal en sentido E-O. La flecha roja indica el punto donde aflora el banco de yeso. **Figure 8.** Cross-section in the E-W direction. The red arrow indicates the point where the gypsum outcrop is exposed.

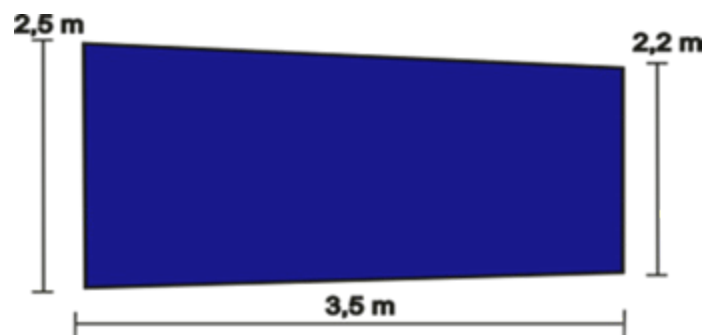


Figura 9. Variación del encape con el aumento de la distancia horizontal. **Figure 9.** Variation of the capping with increasing horizontal distance.

Sector 2

El Sector 2 se encuentra en explotación y se ha dividido en tres subsectores (S2a, S2b y S2c). Esta división se debe a la presencia de tres bancos a diferentes cotas y sin continuidad entre ellos (Figura 13).

- El punto más alto del banco en el S2a está a 772,6 m.
- En el S2b, el punto más alto está a 769,1 m.
- En el S2c, el punto más alto se encuentra a 767,2 m.

En este sector, los rumbos de los bancos de yeso varían entre 200° y 230° , con una inclinación promedio de 10° al noroeste.

Se realizó un perfil transversal en dirección sureste-noroeste en el banco del S2c para evaluar la rentabilidad de unir este sector con zonas explotadas anteriormente al norte. En este perfil (Figura 14), el yeso tiene un espesor de 1,15 m y un buzamiento de 10° al noroeste.

El encape es de aproximadamente 2,5 m. Como muestra la Figura 14, el recubrimiento aumenta a medida que se avanza horizontalmente hacia el noroeste, lo que indica que la explotación en esta dirección no sería económicamente viable.

Sin embargo, si se construye un perfil transversal en sentido noroeste-sureste hacia la

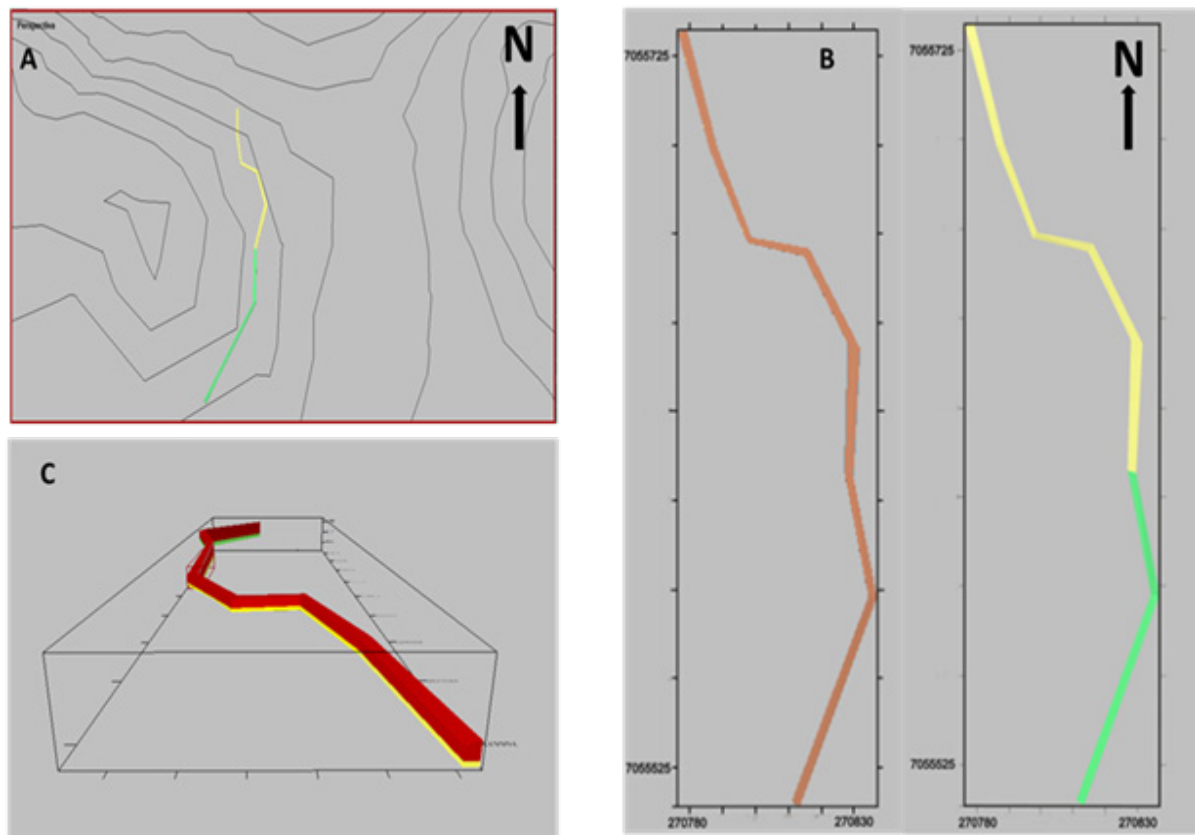


Figura 12. Banco de yeso y encape considerando una profundidad de avance de 3 m. **A.** Banco de yeso (sur color verde y norte color amarillo). **B.** Banco de yeso y encape. **C.** Relación entre el banco de yeso y su encape. **Figure 12.** Gypsum bench and overlay considering an advance depth of 3 m. **A.** Gypsum bench (south in green and north in yellow). **B.** Gypsum bench and overlay. **C.** Relationship between the gypsum bench and its overlay.

se identifican las diferentes formaciones geológicas que afloran en la zona, así como la ubicación precisa de las labores mineras, tanto las que se encuentran activas como las inactivas dentro de la cantera.

Propuesta de Restauración Ecológica

La restauración de la Cantera Adolfo López se fundamenta en la Minería de Transferencia (Strip Mining), método que permite la explotación y recuperación simultánea al verter el material estéril de la fase actual directamente en los huecos de la fase anterior (Figura 17). Esta estrategia es clave para minimizar el impacto superficial y facilitar una recuperación progresiva del ecosistema. Según la Sociedad para la Restauración Ecológica (SER, 2004), el éxito del proceso depende de cuatro pilares fundamentales de integridad ecológica:

- Estabilización física: Asegurar la estabilidad del relieve en taludes y pendientes, controlando la erosión y la hidrología.
- Reconstrucción del suelo: Crear un sustrato a partir de materiales sobrantes que se asemeje al suelo natural para sustentar la vida.
- Recuperación de la biodiversidad: Reintroducción de flora y fauna autóctona para un desarrollo armónico con el paisaje.
- Uso final sostenible: Definir usos compatibles con el medio ambiente, como reservas naturales o áreas recreativas.

Manejo de Sustratos

El éxito de la revegetación depende estrictamente de la gestión técnica del suelo y los estériles. En cuanto al Acopio de Suelo, este debe realizarse en montículos bajos y alargados, con un máximo de 2 a 3 metros de altura, para evitar

Zona	Volumen de Yeso (m ³)	Volumen de Encape (m ³)
Norte	357	960
Sur	339	964
Total Sector 1	696	1.924

Tabla 3. Volumen de yeso y encape del sector 1. **Table 3.** Volume of plaster and coating of sector 1.

la compactación y la anoxia que mataría a los microorganismos. Para su protección, se requiere el uso de zanjas de coronación contra la erosión hídrica y la revegetación inmediata con especies herbáceas para conservar la estructura biológica. Es una prioridad que el suelo sea el primer material retirado y el último en ser recolocado.

Respecto a la Gestión de Estériles y Relieve, la configuración del relieve busca reconstruir laderas con forma cóncavo-convexa. La cima (convexa) debe ser redondeada para dispersar el agua y reducir la velocidad de escorrentía, mientras que la base (cóncava) debe presentar una curva que favorece la sedimentación y el asentamiento del suelo, evitando la socavación. Por

su parte, la compactación controlada se utiliza para aumentar la resistencia al corte del sustrato y maximizar el volumen de estéril alojado. Finalmente, dado que la compactación restringe el crecimiento de raíces, se realiza un escarificado de 10 a 35 cm de profundidad para restaurar la porosidad y aireación antes de planta (Figura 18).

Revegetación y Sucesión Ecológica

La revegetación de la Cantera Adolfo López se define como una herramienta de restauración ecológica que consiste en la introducción intencional de especies vegetales para recuperar la cubierta del sitio. Dada la ubicación del área en la Provincia Chacabuco que se encuentra representada en Tucumán

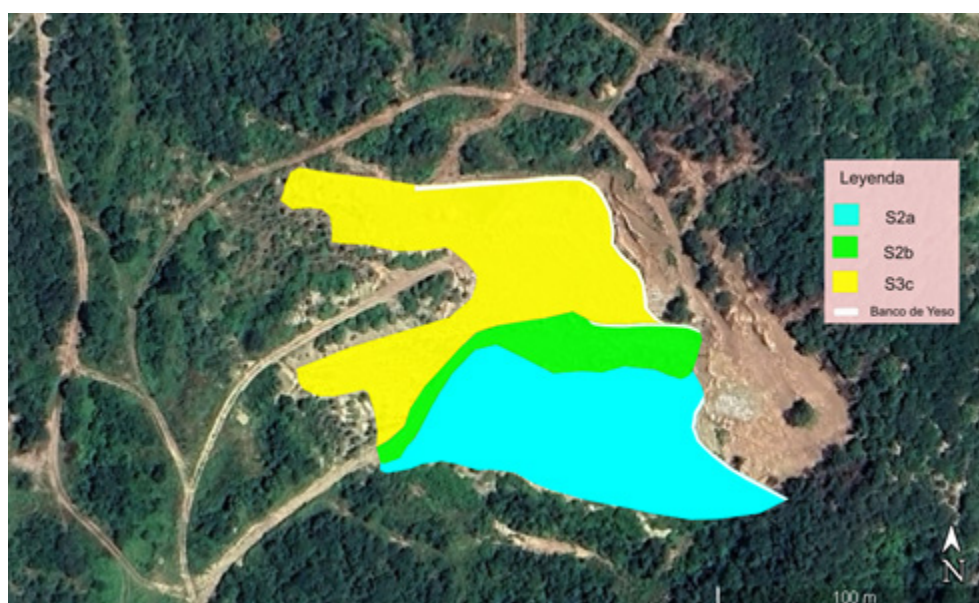


Figura 13. Sector 2. Divisiones según la continuidad y la cota de los bancos de yeso. **Figure 13.** Sector 2. Divisions according to the continuity and level of the gypsum benches.

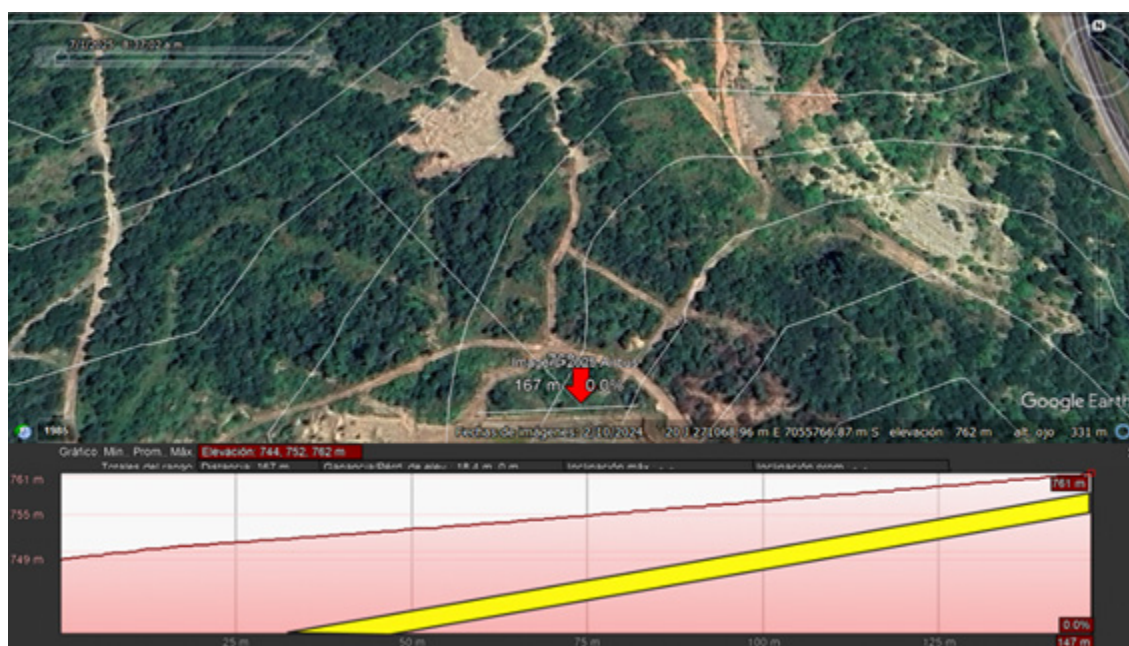


Figura 14. Perfil transversal, sentido SE-NO al banco del S2c. **Figure 14.** Cross-section, SE-NW direction to the S2c bank.

por dos comunidades vegetales: el bosque chaqueño y el bosque chaqueño serrano (Zaia 2012), el diseño se ajusta a una comunidad vegetal de clima fuertemente estacional con inviernos secos (Tabla 5).

El proceso se fundamenta en una sucesión ecológica planificada y escalonada, estructurada para asegurar que la reconstrucción del suelo y el microclima permitan el desarrollo funcional del ecosistema (Tabla 3 y Figura 19).

Cronograma de Restauración y Técnicas de Implantación

El proceso total de establecimiento de las tres etapas sucesionales se estima en un rango de 5 a 16 años. La planificación temporal se divide según los objetivos funcionales de cada fase (Tabla 6).

Para la ejecución de estas etapas, se seleccionan métodos de implantación que equilibran el costo operativo con la tasa de éxito biológico de las especies (Tabla 7).

Plan de Monitoreo y Criterios de Cumplimiento

El plan de monitoreo está diseñado para evaluar indicadores físico-químicos, de vegetación

y fauna en cada fase del proceso. Para determinar el éxito de la intervención, se han establecido cuatro criterios de cumplimiento críticos que deben ser verificados sistemáticamente. En primer lugar, respecto a la Estabilidad del Suelo, se debe alcanzar un mínimo del 60-70% de cobertura vegetal herbácea o gramínea. En cuanto a la Fertilidad, es imperativo registrar un incremento medible de Materia Orgánica (MO) y Nitrógeno (N) en relación con los parámetros del sitio de control. Para el Éxito de Plantación en la Etapa 3, se exige mantener una tasa de supervivencia superior al 75-80% de las plántulas trasplantadas. Finalmente, la Estructura Funcional del ecosistema se confirma mediante la presencia de epífitas, tales como la Suelda y el Clavel del aire, en árboles adultos, lo cual actúa como indicador biológico de la creación de un microclima maduro.

Discusión

La caracterización mineralógica de la Cantera Adolfo López confirma que el recurso explotado consiste predominantemente de yeso macizo con texturas microgranulares y granulares. Los valores obtenidos en el presente estudio en términos de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ con un promedio del 86,13%, resul-

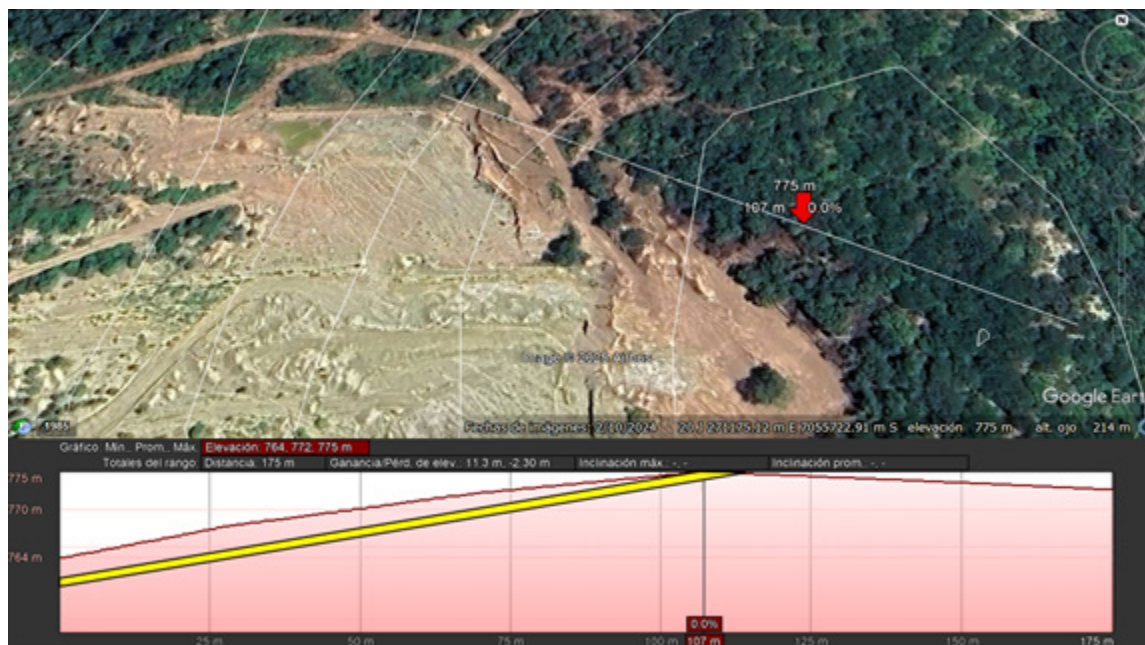


Figura 15. Perfil transversal, sentido NO-SE al banco del S2c. La flecha roja indica la cota más alta de la Loma la Peladilla. **Figure 15.** Cross-section, NW-SE direction to the S2c bench. The red arrow indicates the highest point of Loma la Peladilla.

tan concordantes con las investigaciones de Peña (1970) y Suayter y Urdaneta (1974), quienes reportaron contenidos de hasta el 94%. En este contexto, el valor de la muestra YT4 (96,88%) es particularmente relevante, ya que supera los registros histó-

ricos y posiciona a ciertos sectores del yacimiento en niveles de pureza excepcional para el aprovechamiento industrial. Por otra parte, aunque muestras como YT6 e YT2 evidencian hasta un 6% de material insoluble vinculado posiblemente a impurezas

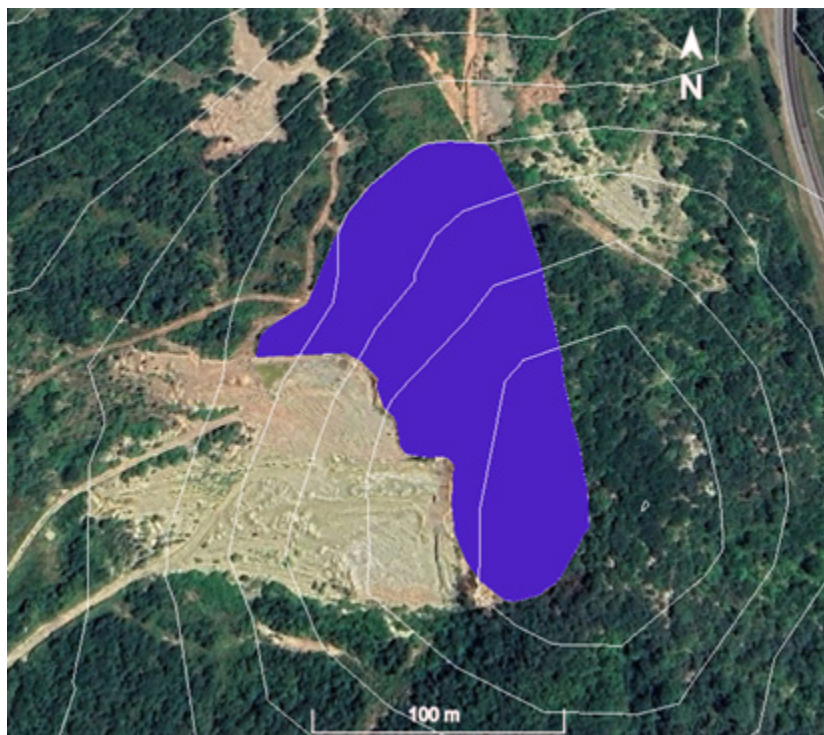


Figura 16. Área a explotar. **Figure 16.** Area to exploit.

Parámetro	Valor
Superficie total	19.616 m ²
Espesor promedio conservador	0,70 m
Volumen preliminar de yeso	13.731 m ³
Densidad considerada	2,11 tn/m ³
Reserva estimada total	29.035 toneladas

Tabla 4. Parámetros geológicos y reserva estimada del sitio 2. **Table 4.** Geological parameters and estimated reserve of site 2.

arcillosas, este fenómeno no invalida la calidad del recurso; dado que el promedio general del 86,13% se mantiene significativamente por encima de los límites técnicos requeridos para la fabricación de insumos de construcción y usos agrícolas, lo cual ratifica la viabilidad económica del yacimiento.

La secuencia estratigráfica analizada en Loma La Cruz, con una potencia de 11,2 metros y una alternancia rítmica de cinco niveles de yeso y arcillas pardas, ofrece una ventana detallada sobre las condiciones finales de depositación de la Formación Río Salí. Esta unidad, se caracteriza por la predominancia de arcillas sobre limos y abundantes intercalaciones de evaporitas. Las capas de arcilla parda (Ar1 a Ar5) representan episodios de inundación o precipitación intermitente que permitieron el transporte de sedimentos finos hacia la cuenca, donde su coloración confirma un ambiente oxidante bajo condiciones de aridez persistente. Por el contrario, los niveles de yeso (Y1 a Y5) actúan como indicadores de periodos de desecación extrema donde la evaporación superaba al aporte hídrico. Al contrastar estos resultados con

el modelo de Gavriloff y Bossi (1992), que plantea una evolución desde ambientes peléticos y salinos de lago abierto hacia barreales oxidados, yesíferos y sulfatados, se observa que el perfil de Loma La Cruz es consistente con la etapa de mayor madurez evaporítica del sistema. De este modo, la sección de estudio se posiciona claramente en la transición hacia un sabkha continental y, finalmente, un sabkha subaéreo, donde la fluctuación de la profundidad y la salinidad permitió la formación de depósitos de yeso que actualmente presentan una calidad óptima para el aprovechamiento industria.

La evaluación del potencial minero en los sectores analizados revela un yacimiento con características geométricas favorables para una explotación a cielo abierto de baja complejidad, destacándose en el Sector 1 la presencia de un banco de yeso de 240 metros de longitud. No obstante, si bien la observación de un buzamiento suave de 2° al oeste y un espesor de 0,87 m en la zona norte permiten proyectar una continuidad estructural, el rápido aumento del encape en dirección al buzamiento que supera los



Figura 17. Etapas de restauración en minería de transferencia. **Figure 17.** Restoration stages in transfer mining.



Figura 18. Restauración de canteras integrando la minería de transferencia y metodología de la SER, 2004. **Figure 18.** *Quarry restoration integrating transfer mining and SER methodology, 2004.*

3 metros rápidamente al avanzar en sentido del buzamiento, condiciona la viabilidad económica del proyecto. Considerando que la literatura técnica establece un límite de rentabilidad para el desbroce en torno a los 2 metros de profundidad (Gamundi y Martensen 1999), el incremento del estéril por encima de este umbral sugiere que la explotación podría verse limitada a los sectores con menor recubrimiento para mantener una relación de desbroce técnica y económicamente manejable. Bajo este escenario, se procedió a la cubicación detallada del recurso obteniéndose un volumen 696 m³, estimando una reserva de 1.468 toneladas de yeso. Estos datos permitirán a los propietarios realizar una evaluación de conveniencia ajustada a sus propios costos operativos y márgenes de rentabilidad. Por otro lado, la propuesta de explotación en el área integrada de 19.616 m² (Figura 16) arroja una reserva estimada de 29.035 toneladas, basada en una densidad de 2,11 tn/m³ y un espesor promedio de 0,70 m. Es imperativo destacar que esta cifra representa una estimación conservadora, ya que asume la existencia de un solo banco para evitar la sobreestimación de recursos. No obstante, la evidencia de campo sugiere la posible existencia de tres bancos de yeso identificados (S1a, S1b y S1c). Si las futuras labores de prospección confirman

que estos bancos son unidades independientes y continuas, el volumen de reservas recuperables podría incrementarse significativamente respecto a la proyección actual.

La planificación de la restauración en la Cantera Adolfo López se integra desde las fases iniciales de explotación mediante la minería de transferencia (Jurado, 2017), permitiendo la estabilización física y reconstrucción del sustrato bajo los principios de la SER (2004). La estrategia de revegetación se diferencia por etapas sucesionales: para las fases iniciales e intermedias se propone la siembra directa de especies pioneras y nodrizas (Puki, Mistol y Chañar), priorizando la eficiencia de costos y el control de la erosión gracias a su adaptabilidad a suelos pobres. En contraste, la etapa de clímax requiere la plantación en vivero de especies de crecimiento lento, como el Quebracho colorado y blanco, para garantizar una supervivencia superior al 75% al posponer su inserción hasta lograr condiciones microclimáticas óptimas (Odum y Barrett, 2006). Finalmente, el uso de indicadores biológicos como las epífitas (*Tillandsia recurvata*) en el monitoreo asegura la transición hacia un ecosistema funcional y maduro, logrando un equilibrio entre la viabilidad económica de la operadora y la resiliencia ecológica a largo plazo.

Etapas	Tipo de Vegetación	Especies Clave	Función Ecológica
Etapas 1: Pioneras	Herbáceas y arbustos iniciales	<i>Synandropadix vermitoxicum</i> (Puki), Acacias (Espinillo, Tusca, Churqui).	Estabilización rápida, tolerancia a alta luz, fijación de nitrógeno y aporte de materia orgánica.
Etapas 2: Intermedias	Arbustos y arbolillos (Nodrizas)	<i>Ziziphus mistol</i> (Mistol), <i>Geoffroea decorticans</i> (Chañar).	Creación de microclima fresco y húmedo, provisión de sombra y mejora de la fertilidad.
Etapas 3: Clímax	Bosque maduro (Quebrachal)	<i>Schinopsis lorentzii</i> (Quebracho colorado), <i>Aspidosperma quebracho-blanco</i> (Quebracho blanco).	Establecimiento del dosel cerrado, especies de crecimiento lento y gran longevidad.

Tabla 5. Etapas de la sucesión ecológica para la revegetación de la cantera. **Table 5.** Stages of ecological succession for the revegetation of the quarry.

Conclusiones

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias neógenas, predominantemente del Mioceno Superior. Entre estas unidades se destaca la Formación Río Salí, cuyo Miembro El Ojo es el portador de los bancos de yeso que revisten interés econó-

mico. Adicionalmente, la Formación Tucumán también está presente en el área, completando el marco geológico de la región.

La alternancia cíclica de capas de yeso y arcilla limosa parda, se interpreta como el resultado de un patrón paleoclimático variable, donde periodos de intensa evaporación (que precipitaban el yeso en

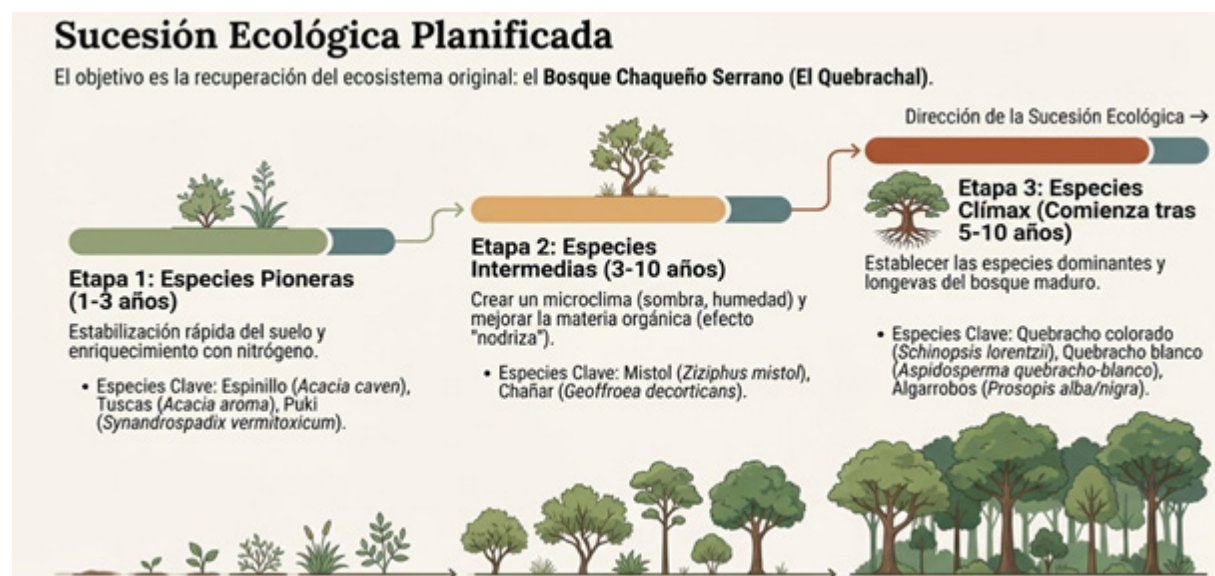


Figura 19. Etapas de la sucesión ecológica. **Figure 19.** Stages of ecological succession.

Etapas	Temporalidad	Objetivos Principales
Etapas 1	1 a 3 años	Estabilizar el suelo y acumular materia orgánica.
Etapas 2	3 a 10 años	Mejorar el suelo y crear sombra para reducir la competencia.
Etapas 3	1 a 3 años (adicionales)	Trasplante de especies leñosas longevas para asegurar la supervivencia inicial.

Tabla 6. Cronograma de aplicación de la restauración ecológica. **Table 6.** *Implementation schedule for ecological restoration.*

Técnica de Plantación	Especies	Ventajas y Observaciones
Siembra Directa	Herbáceas y arbustos pioneros.	Bajo costo y alta adaptabilidad. El "Puki" se propaga preferentemente por división de brotes o tubérculos.
Plantación en Vivero	Especies de la etapa clímax.	Aunque es más costosa, garantiza una mayor tasa de supervivencia y acelera la estructuración del dosel.

Tabla 7. Técnicas de plantación de especies. **Table 7.** *Planting techniques for species.*

un ambiente árido) eran interrumpidos por episodios intermitentes de inundación o precipitación (que depositaban los sedimentos arcillosos).

El análisis estructural en los frentes de explotación puso en evidencia una característica favorable para la minería: la subhorizontalidad de los bancos de yeso. Se determinó que los ángulos de inclinación de estos estratos varían consistentemente entre 2° y 15°, en los sectores 1 y 2.

La dirección predominante de los bancos del sector 1 y 2 es NE-SO, con inclinación hacia NO. Presentando ángulos de bajo valor que, en conjunto, confirman la subhorizontalidad de los estratos, característica que resulta favorable para su extracción a cielo abierto.

La capa de yeso con bochones mamelonares que se encuentra en la base de los niveles de yeso de interés económico se la puede emplear como una guía litoestratigráfica.

En los sectores 1 y 2, la viabilidad de la explotación está determinada por la interacción entre el buzamiento estructural y la topografía.

Dado que las capas de yeso inclinan consistentemente hacia el noroeste, el avance minero en esta dirección resulta inviable debido al rápido y excesivo aumento del encape. Por el contrario, la dirección óptima de explotación debe ser la opuesta al buzamiento (sureste), ya que al dirigirse hacia las cotas más altas, el encape disminuye drásticamente y los bancos de yeso deberían aflorar o encontrarse cercanos a la superficie, lo que garantiza la rentabilidad.

Las reservas calculadas para el Sector 1 alcanzan 1.468 toneladas de yeso. Este valor se encuentra limitado por el rápido aumento del encape cuando la explotación avanza en la dirección del buzamiento, lo que compromete la rentabilidad. El sector 2, proyecta una reserva estimada de 29.035 toneladas de yeso.

El diseño de un plan de restauración ecológica representa un resultado fundamental del estudio, garantizando el cumplimiento de la normativa ambiental y la sustentabilidad del proyecto a largo plazo.

Bibliografía

- Bossi, G. E. (1984). Geología de Tucumán. Cap IX: Terciario. Publicación del Colegio de Graduados en Cs Geológicas de Tucumán, 67-80.
- Bossi, G. E., Gavriloff, I. J. C., & Esteban, G. (1998). Terciario: estratigrafía, bioestratigrafía y paleogeografía. En M. Gianfrancesco, J. Durango, M. E. Puchulu, & G. F. Aceñolaza (Eds.), *Geología de Tucumán* (Publ. Esp. Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas, pp. 87-105). Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas.
- Gamundi, C. E., & Martensen, J. C. (1999). Yacimientos de yeso de Tucumán. En E. O. Zappettini (Ed.), *Recursos Minerales de la República Argentina* (Anales 35, pp. 499-503). Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR.
- Gavriloff, I. J. C., & Bossi, G. E. (1992). Revisión general, análisis facial, correlación y edad de las Formaciones San José y Río Salí (Mioceno Medio), provincias de Catamarca, Tucumán y Salta, República Argentina. *Acta Geológica Lilloana*, 17(2), 5-43.
- Gómez Macedo, A. (1994). Evaluación geológica económica de un sector de la margen izquierda del Río Tapia (finca Suc. A. López), departamento Trancas, provincia de Tucumán, República Argentina [Seminario inédito]. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo.
- González, O. E., Viruel, M. E., Mon, R., Tchilingirian, P., & Barber, E. (2000). San Miguel de Tucumán. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:250.000. Hoja Geológica 2766-II. Provincias de Tucumán, Catamarca, Salta y Santiago del Estero (Boletín 245). Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).
- Horta, L. R. (2022). Informe de Impacto Ambiental (IIA) Pequeños Productores Mineros Anexo III "a": Cantera Lopéz. (Informe técnico no publicado para Adolfo López). Provincia de Tucumán, Argentina
- Jurado Peña, M. (2017). Proyecto de restauración de una cantera de extracción de áridos en el término municipal de Campoo de Enmedio (Cantabria). [Tesis de máster, sin publicar].
- Marengo, H. G. (2012). Microfósiles marinos del Mioceno de las cuencas Chacoparanense y del Salado: las transgresiones del «Entrerriense-Paranense» y de Laguna Paiva. I Simposio del Mio ceno – Pleistoceno del Centro y Norte de Argentina: 23. San Miguel de Tucumán.
- Mon, R., & Urdaneta, A. (1972). Introducción a la geología de Tucumán. República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 27(3), 309-329.
- Mon, R., Urdaneta, A., & Suayter, L. (1971). Estudio geológico de las Sierras del Campo y la Ramada, provincia de Tucumán. *Acta Geológica Lilloana*, 11(15), 291-306.
- Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2006). *Fundamentos de Ecología* (5.ª ed.). Cengage Learning Editores.
- Peña, H.A. (1970) Minerales y rocas de aplicación en la Prov. de Tucumán, Secretaría de Estado y Comercio de Industria y Minería.
- Porto, J.C. y Danielli (1980) Hoja 1 of Trancas (Prov. de Salta y Tucumán) Servicio Minero Nacional. Inédito.
- Powell, J., y Palma, R. (1981). Primer hallazgo de mamíferos en la Formación Río Loro, provincia de Tucumán y su significado cronológico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 36(2), 208-212.
- Ramos, V. A. (1999). Evolución tectónica de la Argentina. En R. Caminos (Ed.), *Geología Argentina* (Edición Especial, Vol. 29, No. 22, pp. 651-682). Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29.
- Rolleri, E. O. (1976). Sistema de Santa Bárbara: una nueva provincia geológica argentina. En *Actas del 6º Congreso Geológico Argentino* (Vol. 1, pp. 239-255). Asociación Geológica Argentina.
- Salfity, J. A., & Marquillas, R. A. (1999). La cuenca cretácica-terciaria del norte argentino. En R. Caminos (Ed.), *Geología Argentina* (Vol. 29, pp. 613-626). SEGEMAR, Anales 29.
- Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. (2004). *The SER international primer on ecological restoration*. Society for Ecological Restoration International.
- Suayter, L., y Urdaneta, A. (1974). Estudio y evaluación de los depósitos de calcáreo y yeso de la Sierra de la Ramada y zonas adyacentes. Dirección Provincial de Minas. Boletín Minero, 1. Tucumán.
- Zaia, D. G. (2012). *Naturaleza y naturalistas en Tucumán* [Libro electrónico].

Recibido : 31 de abril del 2026

Aceptado :

Anexo A: Planos

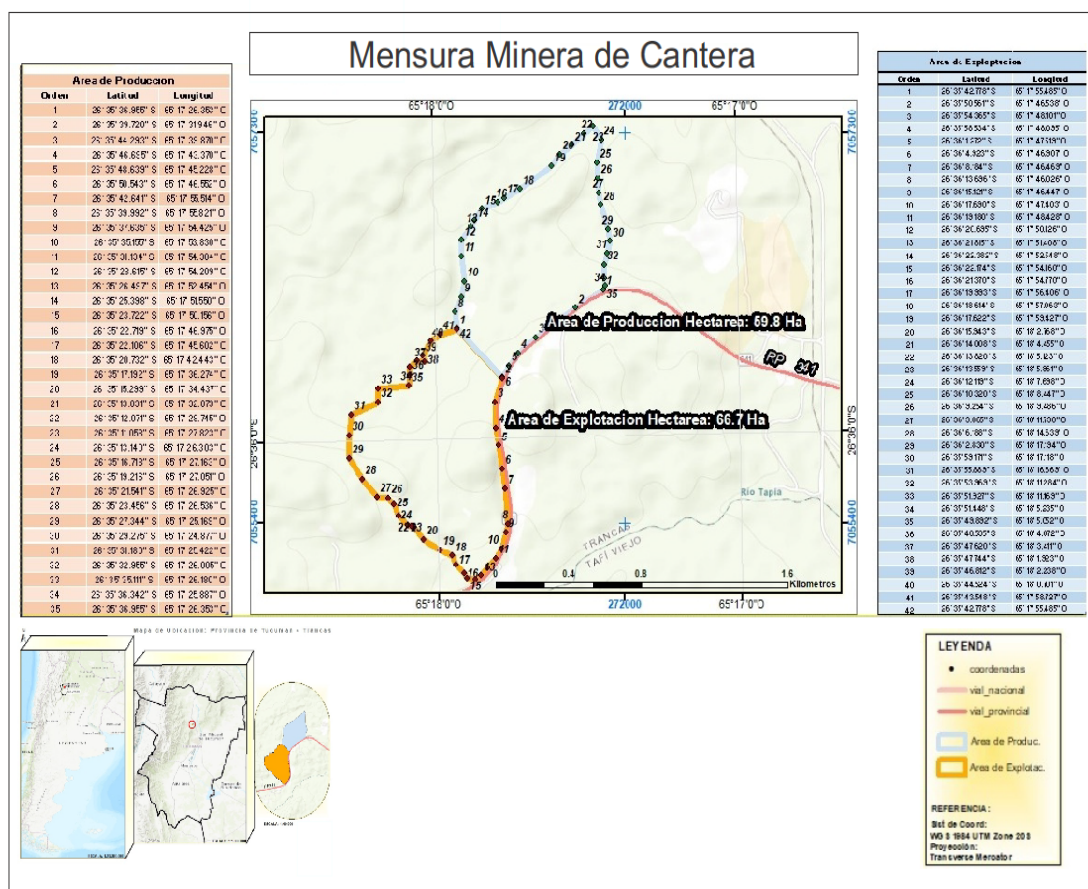


Figura A1. Mapa del área de producción y explotación (Tomado de Horta L, 2022). **Figure A1.** Map of the production and exploitation area (Taken from Horta L, 2022).

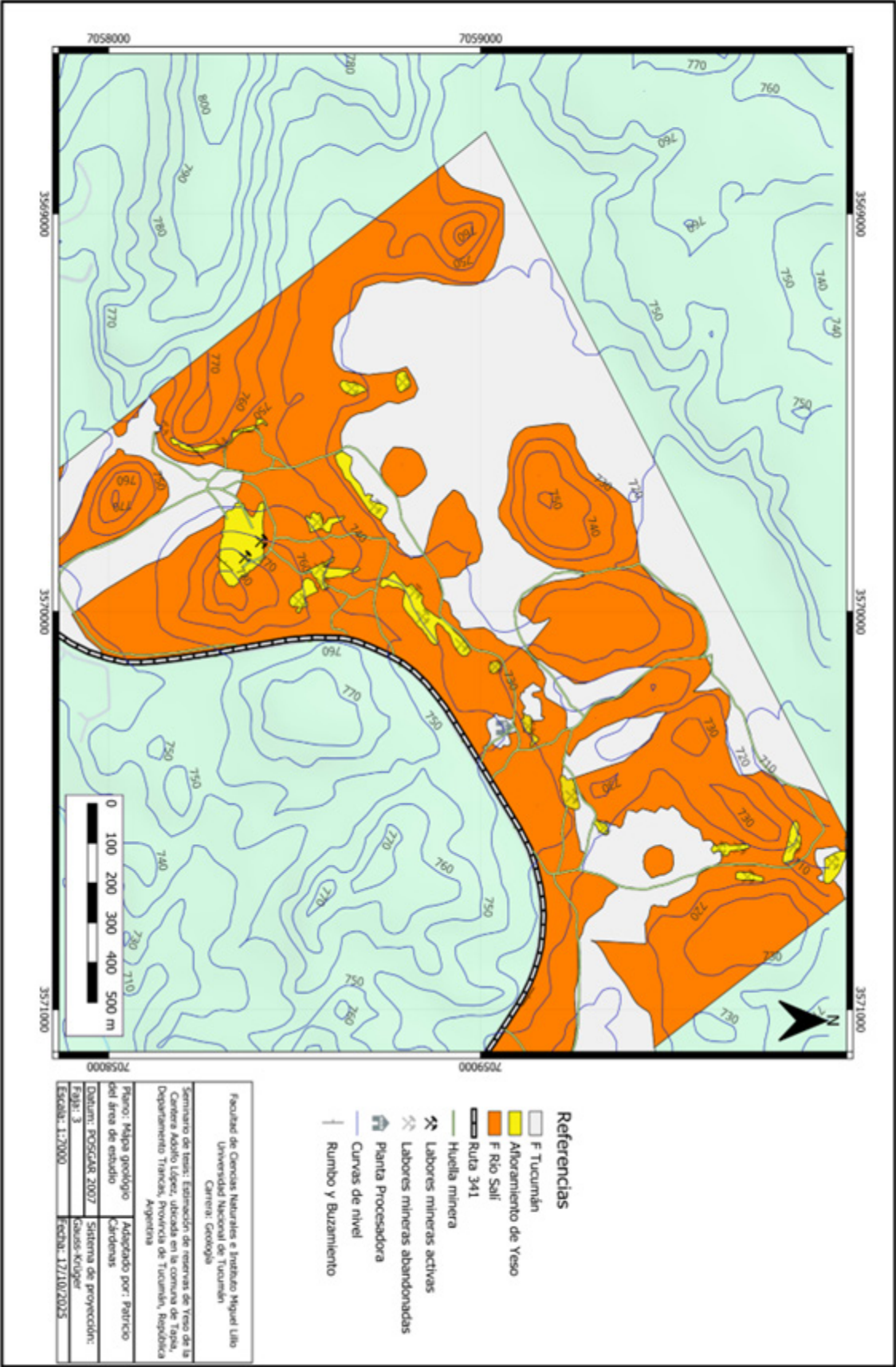


Figura A2. Mapa geológico del área de estudio. **Figure A2.** Geological map of the study area.