Estudio hidrogeológico del yacimiento Punta Gorda para la rehabilitación minera con agrominerales

Hydrogeological study of the Punta Gorda deposit for mining rehabilitation with agrominerals

Elisbet Gamboa Matos* egamboa@geologia.ismm.edu.cu (1)
https://orcid.org/0009-0003-3536-3063
Giorvys Ramón Cuza Fernández gcuza@ismm.edu.cu (1)
https://orcid.org/0009-0007-7937-3502
Joel David González Rodríguez jdavid.gr005@gmail.com (1)
https://orcid.org/0009-0001-5329-0254
(1) Universidad de Moa, Moa, Cuba
*Autor para la correspondencia

Resumen: El presente estudio analiza las condiciones hidrogeológicas del yacimiento Punta Gorda (Moa, Cuba) como base para su rehabilitación minera mediante el uso de agrominerales. Se recopila y sistematiza información existente sobre parámetros clave como permeabilidad, porosidad, humedad y ascenso capilar, determinando su influencia en la dinámica del agua subterránea. Los resultados muestran un sistema acuífero complejo: las peridotitas agrietadas actúan como acuífero discontinuo (permeabilidad: 0.004–0.43 m/día), mientras que las lateritas funcionan como acuitardo (permeabilidad: 0.006–0.21 m/día), con humedad variable (17–95 %) y ascensos capilares de hasta 32.8 m. Se propone un marco de referencia para la rehabilitación, integrando datos hidrogeológicos con estrategias de aplicación de agrominerales, optimizando así la recuperación ecológica y reduciendo impactos ambientales.

Palabras clave: Hidrogeología, reforestación, producto fitoquímico, humedad del suelo

Abstract: This study analyzes the hydrogeological conditions of the Punta Gorda deposit (Moa, Cuba) as a basis for mine rehabilitation with agrominerals. Existing information on key parameters such as permeability, porosity, moisture, and capillary rise was compiled and systematized, determining their influence on groundwater dynamics. The results reveal a complex aquifer system: fractured peridotites act as a discontinuous aquifer (permeability: 0.004–0.43 m/day), while laterites function as an aquitard (permeability: 0.006–0.21 m/day), with variable moisture content (17–95 %) and

capillary rises of up to 32.8 m. A reference framework for rehabilitation is proposed, integrating hydrogeological data with agrominerals application strategies, thereby optimizing ecological recovery and reducing environmental impacts.

Keywords: Hydrogeology, reforestation, phytochemicals, soil moisture

1. Introducción

Cuba posee uno de los yacimientos residuales de intemperismo con las mayores menas de hierro, níquel y cobalto del mundo; conocido por su posición geográfica como Punta Gorda (Rodríguez Infante, 1983; Vera Sardiñas *et al.,* 2001; Rojas-Purón *et al.,* 2025). Los primeros estudios datan de 1969–1971, a través de una exploración detallada de la zona norte del yacimiento. Durante esta etapa se determinó que el área estaba caracterizada por una corteza de intemperismo estable irregular, formada por grandes depósitos de minerales lateríticos–niquelíferos y serpentiníticos (Tamayo, 1973). El yacimiento con más del 60 % de sus reservas explotadas, cuenta con diversos estudios geológicos e hidrogeológicos, sin embargo, son insuficientes para establecer su complejidad hidrogeológica.

De Miguel Fernández (2007) expone la influencia de los procesos hidrogeológicos en la formación y posterior enriquecimiento mineral de yacimientos niquelífero en lateritas determinando el quimismo de las aguas subterráneas y cálculos hidrodinámicos con el fin de sentar las bases para la ejecución de un proyecto de drenaje.

Sánchez-Sánchez *et al.* (2007) realizaron una caracterización hidrogeológica e ingeniero geológica del yacimiento Punta Gorda donde se determinó el régimen de las aguas subterráneas, se establecieron las particularidades de los acuíferos existentes y se efectuó la caracterización geotécnica de los horizontes lateríticos con el fin de diseñar un sistema de drenes naturales para disminuir la humedad presente en las lateritas.

De Miguel-Fernández (2009) presentó los cálculos del drenaje del yacimiento Punta Gorda a través de un estudio hidrogeológico detallado, en el que dio a conocer zonas de alto y bajo grado de humedad. Esto permite reducir los costos del secado del material niquelífero en los hornos de secado y disminuir el consumo de petróleo.

La minería en el yacimiento Punta Gorda ha sido una fuente importante de recursos económicos para Cuba, pero también ha generado impactos ambientales significativos

que requieren atención y manejo adecuado como la deforestación y pérdida de biodiversidad, la contaminación del suelo y del agua y la alteración del paisaje y la erosión.

La minería a cielo abierto es una de las actividades antrópicas que genera mayores perturbaciones en los sistemas forestales naturales, ya que provoca fuertes cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Alday *et al.,* 2010; Valois *et al.,* 2017; Torres Batista *et al.,* 2022; Paredes-Vilca *et al.,* 2024). Estos sistemas ecológicos impactados por la actividad minera requieren medidas de restauración ecológica (Valois *et al.,* 2022) que contribuyan a restituir el equilibrio natural de las regiones afectadas, pero para ello es necesario un conocimiento exhaustivo de la zona a rehabilitar.

Es importante tener en cuenta la Rehabilitación Ambiental Minera (RAM) del yacimiento Punta Gorda, para restaurar los ecosistemas dañados por la minería a cielo abierto y disminuir las afectaciones hidrogeológicas que se puedan presentar en el área de estudio. En este sentido se define como RAM el procedimiento por el cual se mitigan los impactos negativos provocados por la actividad minera (Urbino Rodríguez *et al.,* 2019).

En este contexto, el uso de agrominerales se presenta como una estrategia innovadora y efectiva para acelerar la recuperación del área devastada. El agromineral es un beneficiador que se añade al suelo para influir positivamente en su estructura, sus características físico-químicas y en su fertilidad. Ayudan a retener humedad, reducen la pérdida de nutrientes, regulan el pH de los suelos ácidos y mejoran los suelos compactos y duros (Orozco-Melgar & Cuza-Fernández, 2022; González-Cueto *et al.,* 2023; De Carvalho Ribeiro *et al.,* 2024).

Martínez-Bring *et al.* (2025) destacan que algunos de los beneficios del empleo de agrominerales en las producciones agrícolas han arrojado resultados como la mejora de la fertilidad del suelo: las tobas cargadas con amonio aportan nutrientes esenciales para las plantas, como el nitrógeno, que es fundamental para su crecimiento y desarrollo; el aumento de la eficiencia en la absorción de nutrientes y la reducción de la contaminación ambiental: el uso de agrominerales a base de tobas cargadas con amonio puede ayudar a reducir la contaminación del suelo y del agua.

De igual manera Fernández *et al.* (2024) destacan el empleo del agromineral en zonas degradadas por la minería del níquel y el impacto positivo en la hidrogeología del terreno. Estos minerales como las rocas calcáreas y zeolitas mejoran la estructura del suelo,

aumentan la porosidad y capacidad de retención de agua, ayuda a disminuir la escorrentía superficial y la erosión (Ferrán & Soca-Núñez, 2023; Feijoo & Luna, 2024). Además; contribuye a disminuir la acidez y proporciona nutrientes esenciales para los cultivos. Los agrominerales no solo inciden en la fertilidad del suelo, sino que favorecen la dinámica hidrogeológica (Arjona-Mendoza, 2024). Comprender la hidrogeología del yacimiento Punta Gorda permitirá garantizar una adecuada aplicación del agromineral durante la rehabilitación ambiental minera.

2. Materiales y métodos

El estudio se basó en una recopilación y revisión exhaustiva de información existente sobre las características hidrogeológicas (permeabilidad, porosidad, humedad y ascenso capilar) del yacimiento Punta Gorda. Se fundamenta en un enfoque interdisciplinario, integrando técnicas hidrogeológicas, mineras y agronómicas. Se llevó a cabo una exhaustiva recopilación de información sobre el Yacimiento Punta Gorda desde el punto de vista hidrogeológico de la zona.

2.1. Herramientas informáticas empleadas

El uso de herramientas tecnológicas permitió optimizar el proceso de gestión, análisis y síntesis de la información: Se utilizó el gestor de Referencias Bibliográficas *Mendeley* para organizar y citar fuentes de manera eficiente. La búsqueda y análisis de la información se realizó a través de *Google Schoolar* herramienta que ofrece una amplia base de datos de artículos científicos y permite filtrar resultados para encontrar información relevante.

Los ascensos capilares fueron calculados a partir del diámetro efectivo y la porosidad por tres métodos: Kozeny, Mavis y Laplaza-Sergueiev tomados de De Miguel-Fernández (2007).

3. Análisis de los resultados

Desde el punto de vista hidrogeológico el área del yacimiento Punta Gorda está caracterizado por dos zonas, la primera zona comprende los bloques del flanco norte, donde parte de las reservas se encuentran inundadas. Esta zona comprende los bloques T-46, T-47, T-48, S-45, S-46, U-48, U-49; donde existen las mayores potencias de los horizontes acuíferos y con poca variación de las profundidades de los niveles del agua

subterránea en el tiempo, es decir, que las menas siempre están inundadas, es la zona de descarga (Almaguer Carmenate, 2001).

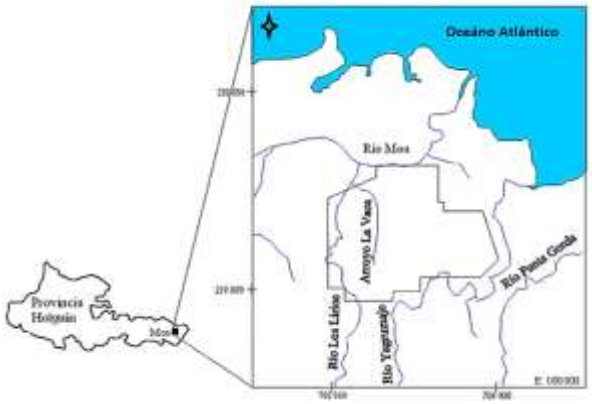


Figura 1. Esquema de ubicación geográfica del yacimiento Punta Gorda (Almaguer-Carmenates *et al.,* 2014).

La segunda zona comprende el resto del yacimiento donde las lateritas no contienen agua, con excepción de sectores locales que en períodos de seca quedan sin agua o con potencias acuíferas pequeñas, casi siempre inferiores a los dos metros.

La fuente principal de alimentación de las aguas subterráneas la constituyen las precipitaciones atmosféricas, abundantes para el área con valores diarios entre 1 mm y 235.5 mm. El resto del yacimiento no presenta grandes dificultades hidrológicas en cuanto a la minería. El yacimiento es atravesado por tres corrientes superficiales principales que son los ríos Los Lirios al noroeste, el Yagrumaje al este–sureste y el Arroyo La Vaca en la parte central.

Las aguas subterráneas del yacimiento Punta Gorda siguen la morfología del terreno, con flujos predominantes hacia el norte en la mayor parte del área, pudiendo tener sentido diferente y hasta opuesto hacia los principales cursos de aguas superficiales. El gradiente varía entre 0.03° y 31.7°.

Las rocas acuíferas (serpentinitas agrietadas), presentan un flujo por la zona del contacto con la corteza impermeable, donde se produce el movimiento lateral del agua, el movimiento del agua es fundamentalmente de ascenso capilar, que varían entre 0.0 m a 25.5 m, correspondiendo los mayores valores al corte completo, inalterado aun por el laboreo minero.

En el yacimiento Punta Gorda existe un complejo acuífero formado por dos horizontes acuíferos estratificados o con capas. Se encuentra el primer horizonte representado por las lateritas, formada por dos capas, la primera denominada OICP (ocres estructurales con perdigones) y la segunda subdividida en OII (ocres estructurales iniciales), OEF (ocres estructurales finales) y OEI (ocres estructurales iniciales) (De Miguel-Fernández, 2004). En el caso del horizonte acuífero más profundo está representado por las capas 3 (roca muy lixiviada) y capa 4 (roca agrietada).

Tabla 1. Caracterización del complejo acuífero del yacimiento Punta Gorda (De Miguel-Fernández, 2004)

Horizontes acuíferos	Litología
Lateritas	Arena gravo - limosa con fracciones gruesas constituidas por perdigones de hierro, con baja plasticidad (Capa 1 - OICP)
	Limo arcilloso de alta plasticidad (Capa 2 - OII, OEF, OEI)
Serpentinitas	Roca muy lixiviada, presente en forma de arena limo-gravosa con arcilla y fracciones de serpentinitas (Capa 3)
	Roca agrietada (Capa 4)

3.1. Parámetros hidrogeológicos

3.1.1. Espesor acuífero

En las perforaciones ejecutadas los espesores saturados y acuíferos fueron totalmente perforados a excepción del acuífero de las peridotitas agrietadas (serpentinitas), en las que, en correspondencia con la investigación, solo se perforó 5 m bajo el techo de las peridotitas con la aparición del agua en cotas superiores y hasta unos 3 m bajo la cota de aparición del agua en las peridotitas (De Miguel-Fernández, 2007).

En el territorio los espesores de las peridotitas alteradas son de unos 30 m como valor medio. En las lateritas la zona saturada no representa como tal un acuífero, ya que, debido a la litología existente, prácticamente no existe circulación lateral del agua, por lo que esta zona la podemos considerar como un acuitardo. Los espesores saturados perforados en las lateritas oscilan desde 0 m hasta 27,6 m y los mismos dependen del relieve del terreno y base de erosión del mismo. Los mayores espesores de las lateritas se encuentran en las áreas más altas del yacimiento (De Miguel-Fernández, 2007).

3.1.2. Permeabilidad

La permeabilidad representada por el coeficiente de filtración es variable tanto en las lateritas como en las peridotitas. En las lateritas el coeficiente de filtración oscila entre

0,006 y 0,21 m/día. Por capas sus valores medios son: Capa 1-0,106 m/día, Capa 2– 0,043 m/día (De Miguel-Fernández, 2007).

La permeabilidad en las peridotitas oscila entre 0,004 y 0,43, aunque en zonas de fallas se encuentran valores superiores a 3 m/día. Por capas en las peridotitas la permeabilidad representada por el coeficiente de filtración alcanza los s valores medios: Capa 3 –0,044 m/día, Capa 4, sin considerar las zonas de fallas -0,14 m/día (De Miguel-Fernández, 2007). La permeabilidad en la Capa 4 (peridotitas agrietadas) es más de tres veces mayor que la permeabilidad de las lixiviadas (Capa 3) y que el de las lateritas (Capa 2) y 1,3 veces mayor que la permeabilidad del estrato de cubierta de las lateritas (Capa 1) (De Miguel-Fernández, 2007).

3.1.3. Acuosidad

La acuosidad determinada es referida a las lateritas por su importancia en el proceso minero-industrial, sus valores son bajos y expresados en l/seg·m. de abatimiento con valores menores de 0,1 l/seg·m (De Miguel-Fernández, 2007).

En la mayoría del área de distribución de las lateritas la acuosidad es predominantemente de origen capilar, por saturación debido a procesos de ascensos capilares desde mayores profundidades y teniendo como fuente las peridotitas acuíferas, las que subyacen a las lateritas (De Miguel-Fernández, 2007).

En períodos de lluvia se desarrolla la sobresaturación de espesores de lateritas en la parte superior del corte motivado por la infiltración de las aguas de lluvia hasta profundidades en que la infiltración, desde la superficie, se equilibra con la saturación presente por los ascensos capilares y subpresión desde las peridotitas agrietadas (De Miguel-Fernández, 2007).

3.1.4. Ascensos capilares

Las propiedades de ascenso capilar de las lateritas fueron determinadas según metodología basada en la granulometría de los sedimentos analizados y su porosidad (Tabla 2). Como resultado de los cálculos efectuados los ascensos capilares en las lateritas oscilan entre 0 y más de 26 m. Los menores valores coinciden con espesores lateríticos de la Capa 1 que presenta la granulometría más gruesa, con ascensos que

oscilan entre 0 y 3,4 m. En la Capa 2 la granulometría es más fina y los ascensos capilares oscilan entre 20 y 32,8 m.

Tabla 2. Cálculo de ascensos capilares medios (De Miguel-Fernández, 2007)

Datos		Fórmula de cálculo H_c (m)	Ascenso capilar medio H_c (m)	Autor
Porosidad media (n)	Diámetro efectivo D_e (mm)			
0.6	0.002	$H_c = 0.0446 \frac{1-n}{n} \cdot \frac{1}{D_e}$	14.87	Kozeny
		$H_c = \frac{0.0306}{De} \sqrt[3]{\left(\frac{1-n}{n}\right)^2}$	21.32	Mavis-Tsui
		$H_c = \frac{0.0306}{De}$	15.3	Laplaza-Sergueiev

En la mayor parte del yacimiento Punta Gorda las lateritas yacen directamente sobre las peridotitas lixiviadas y acuíferas, siendo la zona de contacto entre estas diferencias litológicas la mayor vía de circulación de las aguas subterráneas en las lateritas (Capa 2 y 3) por lo que las posibilidades determinadas de ascensos capilares en las lateritas por su granulometría se hacen efectivas al estar los basamentos de estos sedimentos en contacto directo con el agua.

En las peridotitas agrietadas los ascensos capilares son efectivos a partir del nivel de estabilización de las aguas (por saturación) debido a las subpresiones desde su basamento, donde existen aguas confinadas con presiones moderadas.

Por la granulometría de las lateritas estudiadas, cuyo diámetro oscila entre 0,0018 y 0,0022 mm, correspondiente al 10 % del peso de las muestras y asumiendo la media de 0,0020 mm para los cálculos y la porosidad media de 60 % (n=0,6), el ascenso capilar medio que pueden producirse en el yacimiento, calculados por tres métodos distintos, presentan un valor de Hc = 17,14 m.

3.1.5. Humedad de las lateritas

En condiciones naturales las rocas contienen una mayor o menor cantidad de agua. Los suelos y rocas que yacen sobre el nivel de las aguas subterráneas, el contenido del agua varía en dependencia de las temperaturas, presiones atmosféricas, humedad del aire, evaporación, precipitaciones atmosféricas, etc. La humedad natural se determina por muestras de rocas con estructuras inalteradas. La magnitud de la humedad que presenta se determina en condiciones de laboratorio a través del cálculo de humedad gravimétrica en % (de Miguel-Fernández, 2012).

La humedad en las lateritas en la Capa 1 varía entre 17,1 y 47,3 % y en la Capa 2 oscila entre 31,4 y 94,9 %. Esta diferencia de valores se debe a que la granulometría más gruesa en la Capa 1 y sobre ella actúa directamente el proceso de evaporación.

En la Capa 2 los mayores valores de humedad se registran a mayores profundidades y contactando la Capa 3 y con las peridotitas acuíferas. La humedad de estas capas está influenciada directamente por las presiones existentes en las aguas contenidas y que circulan por las peridotitas, hasta niveles de equilibrio de esas presiones. Sobre la cota de acción de las subpresiones, la humedad de las lateritas está influenciada directamente por los procesos de ascensos capilares a través de las lateritas desde la zona de humedad por presiones subyacentes o directamente desde las aguas contenidas en las peridotitas.

Otro aspecto que influye en la humedad de las lateritas lo representa la rugosidad del techo de las peridotitas agrietadas acuíferas, ya que en aquellos puntos donde presenta descensos con relleno de lateritas, estas se presentan con alta saturación, pudiendo en algunos casos encontrarse el agua a pequeñas profundidades (nivel piezométrico).

Durante los períodos de lluvia en la parte superior de las lateritas se produce una saturación debido a la infiltración de las aguas de lluvia desde la superficie del terreno, esta saturación en profundidad se desarrolla hasta profundidades donde se equilibra con las humedades presentes debido a los ascensos capilares y subpresión desde las peridotitas agrietadas (De Miguel-Fernández, 2007).

4. Interpretación de los parámetros hidrogeológicos

4.1. Potencia acuífera

Los resultados hidrogeológicos indican un sistema complejo donde las peridotitas agrietadas actúan como un acuífero discontinuo, con saturación limitada, lo que sugiere un flujo dependiente de fracturas y un nivel freático superficial. Por otro lado, las lateritas, con espesores saturados variables (0–27.6 m) y ausencia de circulación lateral, funcionan como un acuitardo, reteniendo agua, pero sin permitir su transmisión eficiente, especialmente en áreas elevadas donde el relieve y la erosión condicionan su espesor.

Esta dualidad acuífera fracturado en peridotitas y barrera hidráulica en lateritas evidencia una heterogeneidad espacial crítica para la gestión hídrica, destacando la

necesidad de estudios complementarios (ensayos de bombeo o modelización) para cuantificar parámetros hidráulicos y evaluar la sostenibilidad del recurso.

4.2. Permeabilidad

Los datos muestran una variabilidad significativa en la permeabilidad, representada por el coeficiente de filtración, entre las lateritas y las peridotitas. En las lateritas, el coeficiente oscila entre 0,006 y 0,21 m/día, con valores medios por capas que reflejan una disminución progresiva: la Capa 1 (0,106 m/día) presenta una permeabilidad mayor que la Capa 2 (0,043 m/día).

Por otro lado, en las peridotitas, el rango es más amplio (0,004–0,43 m/día), con valores excepcionalmente altos en zonas de fallas (>3 m/día). Destaca la Capa 4 (peridotitas agrietadas), con un valor medio de 0,14 m/día (excluyendo fallas), que supera en más de tres veces a la Capa 3 (0,044 m/día) y a las lateritas de la Capa 2, y en 1,3 veces a la Capa 1 de lateritas.

Esto sugiere que la fracturación en las peridotitas favorece un flujo hidráulico más eficiente, mientras que las lateritas, especialmente en capas inferiores, actúan como estratos menos permeables. La influencia de las fallas en las peridotitas resalta su papel crítico en la dinámica de infiltración, pudiendo generar conductos preferenciales para el agua.

4.3. Porosidad

Los valores de acuosidad en las lateritas son bajos (menores de 0,1 l/seg·m de abatimiento), lo que refleja una limitada capacidad de flujo hídrico en estos materiales. Esta característica se atribuye principalmente al origen capilar del agua, donde la saturación ocurre por ascensos capilares desde las peridotitas subyacentes, que actúan como acuíferos.

Durante las lluvias, se produce una sobresaturación en los estratos superiores de lateritas debido a la infiltración del agua pluvial, la cual se equilibra a ciertas profundidades con la saturación preexistente generada por los procesos capilares y la subpresión desde las peridotitas fracturadas.

Este equilibrio dinámico entre infiltración superficial y ascenso capilar subraya la complejidad hidrogeológica de las lateritas, destacando su comportamiento dual: baja permeabilidad en condiciones secas y capacidad de almacenamiento temporal durante eventos lluviosos. La interacción entre estos factores es clave para entender su rol en procesos minero-industriales, donde la gestión del agua debe considerar tanto la retención capilar como los pulsos de humedad estacionales.

4.4. Ascenso capilar

Los resultados del estudio sobre los ascensos capilares en las lateritas del yacimiento Punta Gorda revelan una variabilidad significativa en función de las características granulométricas y la porosidad de los sedimentos. En la Capa 1, con granulometría más gruesa, los ascensos son mínimos (0–3,4 m), mientras que en la Capa 2, de textura más finas, alcanzan valores notablemente superiores (20–32,8 m), con una media de 26,0 m. Esta diferencia subraya la influencia crítica de la granulometría en la capacidad de ascenso capilar, donde partículas más finas favorecen mayores alturas debido a la mayor tensión superficial y porosidad (60 % en este caso).

La ubicación de las lateritas directamente sobre peridotitas lixiviadas y acuíferas facilita la interacción hidrodinámica, especialmente en la zona de contacto litológico, que actúa como principal vía de circulación de aguas subterráneas. Esto permite que los ascensos capilares teóricos, calculados a partir del diámetro efectivo (De = 0,0020 mm) y la porosidad, se manifiesten en la práctica. Los cálculos mediante tres métodos distintos convergen en un valor medio de (Hc = 17,14 m), lo que confirma la consistencia de los resultados y su aplicabilidad en el contexto geológico del yacimiento.

Además, el estudio destaca que los ascensos son efectivos solo tras la saturación de los sedimentos, impulsados por subpresiones desde el basamento fracturado de peridotitas, donde las aguas confinadas ejercen presiones moderadas. Este mecanismo explica no solo los valores observados, sino también su distribución espacial, vinculada a las variaciones litológicas y estructurales del terreno. En conjunto, los datos proporcionan una base cuantitativa para entender el comportamiento hidrológico de las lateritas y su interacción con los acuíferos subyacentes, relevante para la gestión de recursos hídricos y estudios de infiltración en la zona.

4.5. Humedad

La variación de humedad en las lateritas está directamente relacionada con las características granulométricas y los procesos hidrodinámicos en cada capa. En la Capa 1 (17,1–47,3 % de humedad), la textura más gruesa y la exposición directa a la evaporación superficial explican sus valores más bajos. En contraste, la Capa 2 (31,4–94,9 %) registra mayor humedad en profundidad, especialmente cerca del contacto con las peridotitas acuíferas, debido a la influencia de las subpresiones del agua subterránea y los ascensos capilares que equilibran la humedad desde zonas más profundas.

Durante las lluvias, la infiltración superficial satura temporalmente la parte superior de las lateritas, pero este efecto se atenúa con la profundidad al equilibrarse con los flujos ascendentes provenientes de las peridotitas. Estos mecanismos combinados (evaporación, capilaridad, presiones hidrostáticas y heterogeneidades estructurales) definen el perfil de humedad de las lateritas, destacando su dependencia de factores litológicos y dinámicas hidrogeológicas.

4.6. Relación entre los parámetros hidrogeológicos y el uso de agrominerales en la rehabilitación minera

Los resultados hidrogeológicos del yacimiento Punta Gorda revelan características clave que pueden ser aprovechadas para la rehabilitación mediante agrominerales. La dualidad entre las peridotitas fracturadas (acuífero discontinuo) y las lateritas (acuitardo) sugiere que la gestión del agua subterránea es fundamental para cualquier estrategia de rehabilitación.

Los agrominerales, como zeolitas, bentonitas o fosfatos naturales, podrían utilizarse para mejorar la retención de humedad en las lateritas, especialmente en la Capa 2, donde los ascensos capilares son significativos (20–32,8 m). Estos materiales, con alta capacidad de intercambio catiónico y porosidad, podrían estabilizar la humedad en zonas secas (ej. Capa 1), regular la liberación de nutrientes en áreas saturadas, mitigar la erosión y favorecer la reforestación ambiental.

Además, la presencia de fracturas en las peridotitas (con coeficientes de filtración de 0 hasta 0,43 m/día) indica que los agrominerales podrían emplearse para sellar conductos preferenciales y reducir la pérdida de agua por infiltración rápida, optimizando su disponibilidad para plantas y microorganismos. En zonas con alta subpresión desde el

basamento, los agrominerales podrían actuar como amortiguadores de la humedad, equilibrando los pulsos estacionales de lluvia y capilaridad. La granulometría fina de la Capa 2 (60 % de porosidad) facilitaría la incorporación de estos minerales, mientras que su interacción con las peridotitas acuíferas aseguraría un suministro hídrico sostenible.

5. Conclusiones

Se identificó que el yacimiento presenta heterogeneidad hidrogeológica, con lateritas (baja permeabilidad) y peridotitas (alta permeabilidad en fracturas), lo que exige estrategias diferenciadas para su rehabilitación.

Las aguas subterráneas fluyen predominantemente hacia el norte, influenciadas por el relieve y fracturas. La humedad en lateritas depende de ascensos capilares y subpresiones desde peridotitas.

Los agrominerales pueden mitigar la acidez, mejorar la retención hídrica (por su alta porosidad) y estabilizar nutrientes, especialmente en zonas con alta humedad capilar (Capa 2).

Referencias bibliográficas

Alday, J.G., Marrs, R.H., & Martínez-Ruiz, C. (2010). The importance of topography and climate on short-term vegetation of coal wastes in Spain. *Ecological Engineering, 36*, 579-585. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.005

Almaguer Carmenate, Y. (2001). *Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo serpentinito de Moa*. [Tesis de Maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico]. http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1193

Almaguer Carmenate, Y., Rodríguez-Diaz, M.A., del Rosario, M., & Aguilar-Sánchez, A. (2014). Evaluación de la susceptibilidad por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología, 30*(2), 19-41. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223531569002

Arjona-Mendoza., D. M., Leyva-Rodríguez, C.A., Pérez-García, L.A., & Cuza-Fernández, G.R. (2024). *Evaluación de la retención de humedad en suelos lateríticos mediante la aplicación de agrominerales. Ciencia & Futuro, 15(*1), 1-14. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10286586

Cuza Fernández, G.R., Orozco Melgar, G., Leyva Rodríguez, C.A., Medina Arce, M.M., & Pérez García, L.A. (2024). Agromineral innovador: transformando la agricultura y la rehabilitación minera en Moa. *Revista Forestal Baracoa, 43.* https://cu-id.com/0522/v43e08

De Carvalho Ribeiro, M., Ganga, A., Silva, I., Redondo, A., Silva, R., Frediani, L.G., Seron, H., Shintate, F., Minhoto, M.C., & Nogueira, T.A. (2024). Residual effect of Silicate Agromineral Application on Soil Acidity, Mineral Availaility, and Soybean Anatomy. *Agronomy, 15*(1). https://doi.org/10.3390/agronomy15010005

De Miguel-Fernández, C. (2007). *Influencia de procesos hidrogeológicos en la formación y posterior enriquecimiento mineral de yacimientos cobalto-niquelífros en lateritas*. http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1540

De Miguel-Fernández, C. (2009). *Cálculo del drenaje y efecto económico en yacimientos hierro-cobalto-niqueliferos en lateritas con ejemplo del yacimiento Punta Gorda en Moa, Cuba*. https://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/3989

Feijoo, E.P., & Luna, E. (2024). Uso de zeolita de calcio como agente de absorción de arsénico y plomo en relaves mineros. *Revista Minerva Multidisciplinaria de Investigación Científica, 5*(13). https://doi.org/10.47460/minerva.v5i13.150

Ferrán, H. & Soca-Núñez, M. (2023). La zeolita como mejorador de los suelos y cultivos. *Infomin,* 15. https://cu-id.com/2144/v15e13

González-Cueto, O., Salceiro, R.A., Aguila, E., Merlán, G., López, E., Machado, J. (2023). Caracterización física y química del fertilizante órgano-mineral Agromena-G. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 32*(3). https://cu-id.com/2177/v32n3e08

Martínez-Bring, L., Cuza-Fernández, G.R., Pérez-García, L.A., Leyva-Rodríguez, C.A., Orozco-Melgar, G.A., & Carballo-Peña, A. (2025). Evaluación de agrominerales y mejoradores de suelo para el cultivo de pepino y habichuela en el municipio de Moa. *Minería y Geología*, *41*(1), 68–82. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1993-80122025000100068&script=sci_abstract

Orozco-Melgar, G.A., & Cuza-Fernández, G.R. (2022). Aplicación de agromineral de tobas y residual amoniacal del proceso CARON en el organopónico Miraflores del

municipio Moa. *Ciencia & Futuro*, *12*(4), 497–511. http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/download/2220

Paredes-Vilca, O.J., Díaz, L.J., García, J.D., & Cruz, J.A. (2024). Contaminación y pérdida de biodiversidad por actividades mineras y agropecuarias: estado del arte. *Revista de Investigaciones Altoandinas, 26*(1), 56-66. https://doi.org/10.18271/ria.2024.594

Rodríguez-Infante, A. (1983). Características geólogo-geomorfológicas del yacimiento Punta Gorda. *Minería y Geología, 1*(1), *107-114*. https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/313

Rojas-Purón, A.L., Simões, R., Fernández, L., & Salazar, A. (2025). Caracterización de perfiles silicatados en el depósito laterítico de Níquel de Punta Gorda, Moa. *Minería y Geología, 41*(1), 17-35. https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1985

Sánchez Sánchez, Y., Almaguer Carmenates, Y., & de Miguel Fernández, C. (20-23 de marzo 2007). *Caracterización hidrogeológica e ingeniero geológica del Yacimiento Punta Gorda, Moa* [Ponencia]. II Conveción Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias 2007, Cuba. https://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1819

Tamayo, G. (1973). *Geología de los yacimientos lateríticos de Moa.* Pueblo y Educación.

Torres-Batista, Y., & Rodríguez-Córdova, R.G. (2022). Las externalidades producidas en la minería a cielo abierto en yacimientos lateríticos y vías para su internalización. *Universidad y Sociedad, 14*(3), 589-596. https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2903

Urbino Rodríguez, J., Díaz Martínez, B., & Sigarreta Vilches, S. (2019). *Rehabilitación ambiental minera.* Editorial Feijóo.

Valois, H., Martínez, C., & Quinto, H. (2022). Revegetación natural de áreas afectadas por minería de oro en la selva pluvial tropical del Chocó, Colombia. *Revista de Biología Tropical, 70*(1), 743-768. https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v70i1.50653

Valois, H., Martínez, C., & Urrutia, Y. (2017). Formación del banco de semillas durante la revegetación temprana de áreas afectadas por la minería en un bosque pluvial

tropical del Chocó, Colombia. *Revista de Biología Tropical, 65*(1), 393-404 http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44950154031

Vera Sardiñas, O., Rodríguez, A., Cordobés, J.M., & Legrá Lobaina, A.A. (2001). Dominios geológicos del yacimiento laterítico de Punta Gorda, Moa: delimitación y caracterización. *Minería y Geología*, *18*(3-4). https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/218

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autoría según taxonomía CRediT

Elisbet Gamboa Matos: Conceptualización/Investigación/Diseño de la metodología/Validación/ Redacción–revisión y edición/Visualización.
Giorvys Ramón Cuza Fernández: Conceptualización/Supervisión/Diseño de la metodología/ Redacción–revisión y edición.
Joel David Gonzáles Rodríguez: Curación de contenidos/Recursos materiales/Validación