TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO

Título: Evaluación del horizonte limonítico de la corteza laterítica, combinando la geofísica de GPR y los pozos de exploración.

Autor: Carlos Raúl Flores Sanz.

Tutores: M. Sc. Jorge Luis Urra Abraira.

Dr. C. Ramón Gilberto Polanco Almanza.

Moa, 2019

"Año 61 de la Revolución"

Agradecimientos

- A mi familia, en especial a mis padres Carlos Flores Domínguez y Mibian Sanz León, porque sin ellos no hubiera podido graduarme.
- A mis tutores, Jorge Luis Urra Abraira y Ramón Polanco Almanza por haber dedicado su tiempo, paciencia y por la confianza que tuvieron en mí para realizar este trabajo.
- A mi suegra Tania Hernández Fonseca, por su amor, comprensión y por haberme hecho hijo suyo durante estos cinco años.
- A mi novia Elizabeth Alemany Hernández, por su apoyo incondicional en todo momento.
- A mis abuelos, por sus varios regaños cuando me los merecía.
- A todos mis compañeros de aula por haber compartido dulces y amargos momentos.
- A mis amigos geólogos y mineros del cuarto, en especial a Luis Daniel García Molina, Luis Antonio Desdín Paz, Carlos Alberto Matos Pérez y Juan Luis Rubio García, por todas las dificultades que pasamos juntos durante cinco años.
- Además, a Carlos Velázquez, José Figueredo, Dennis Matos, Julián Alemany, Alfredo Igarza, Pedro Luis y Álvaro Cerulia, por compartir las alegrías, tristezas y hasta enfermedades juntos.
- A Yorgenis Maceo Rustán, por su ayuda y preocupación en varios momentos durante la realización de este trabajo.
- A todos los profesores que de una forma u otra aportaron sus conocimientos para mi formación en los últimos 17 años.

Resumen

Los yacimientos de corteza de meteorización desarrollados sobre rocas ultrabásicas en la oriental región de Moa constituyen uno de los principales intereses económicos del país, debido a sus elevados contenidos de Ni, Fe y Co.

En ocasiones, la variabilidad de la distribución de estos contenidos y la variabilidad lateral de los espesores de la corteza complejiza el proceso de estimación de recursos y reservas y la explotación del yacimiento.

Los radargramas obtenidos por el método geofísico de geo-radar (Ground Penetatrion Radar, GPR), han mostrado potencial en la definición de los espesores de cortezas lateríticas, la presencia de fragmentos de rocas y la definición de la ubicación especial del basamento.

La aplicación de este método en un sector del yacimiento de Camarioca Sur ha permitido identificar una corteza mezclada con fragmentos de rocas o bloques flotantes (boulders), los cuales se encuentran dentro de la masa lateritica. La red de exploración y el espaciamiento entre pozos no garantiza la caracterización de la variabilidad horizontal a corta distancia de estos fragmentos de rocas.

Para una mejor evaluación de los recursos minerales en estos yacimientos es necesario realizar un análisis de los radargramas de GPR realizados en un sector del yacimiento Camarioca Sur y así poder determinar la presencia de rocas en el perfil que pueda influir negativamente en el proceso de estimación de los recursos.

ABSTRACT

The deposits of weathering crust developed on ultrabasic rocks in the eastern region of Moa constitute one of the main economic interests of the country, due to its high contents of Ni, Fe and Co.

Sometimes, the variability of the distribution of these contents and the lateral variability of the thickness of the crust complicate the process of estimating resources and reserves and the exploitation of the deposit.

The radargrams obtained by the geophysical method of geo-radar (Ground Penetatrion Radar, GPR), have shown potential in the definition of the thicknesses of lateritic crusts, the presence of fragments of rocks and the definition of the special location of the basement.

The application of this method in a sector of the Camarioca Sur field has made it possible to identify a crust mixed with rock fragments or floating blocks (boulders), which are found within the lateritic mass. The network of exploration and the spacing between wells does not guarantee the characterization of the horizontal variability at close range of these rock fragments.

For a better evaluation of the mineral resources in these deposits, it is necessary to carry out an analysis of the GPR radargrams carried out in a sector of the Camarioca Sur deposit and thus be able to determine the presence of rocks in the profile that could negatively influence the estimation process of the resources.

Índice

Introducción 1

Capítulo I. Características físico-geográficas, geológicas de la región y del área de estudio..... 4

1.1 Introducción 4

1.2 Ubicación geográfica 4

1.3 Geomorfología 5

1.4 Hidrografía 6

1.5 Hidrogeología 8

1.6 Clima 13

1.7 Vegetación, flora y fauna 13

1.8 Tectónica 14

1.9 Geología de la región y del sector de estudio 16

1.10 Corteza de meteorización 19

1.11 Economía 22

Capítulo II. Procedimientos y métodos empleados 23

2.1 Introducción 23

2.2 Método geofísico de GPR 25

2.3 Breve caracterización del método geofísico del radar de penetración de suelo (GPR) 28

2.4 Antecedentes del uso del GPR en los yacimientos lateríticos 29

2.5 Modelación de yacimientos 30

2.6 Geoestadística 31

2.7 Muestreo, ensayos y análisis realizados 32

CAPÍTULO III. Análisis de la distribución espacial de la mena limonítica en la corteza laterítica, sector Camarioca Sur. 34

3.1 Introducción 34

3.2 Distribución de los pozos de exploración vs líneas de GPR 34

3.3 Estadística básica de los principales elementos químicos en los pozos de exploración 36

3.4 Clasificación de las menas 38

3.5 Clasificación de los horizontes de la corteza 40

3.6 Evaluación de los radargramas de la geofísica de GPR 45

CONCLUSIONES 53

RECOMENDACIONES 54

Introducción

La exploración geológica en los yacimientos lateríticos de la región de Moa ha permitido caracterizar su corteza laterítica en cuanto a la composición química de componentes útiles de níquel y cobalto y otros elementos de su composición. El espaciamiento entre pozos utilizado habitualmente logra caracterizar la continuidad lateral de la corteza donde existen altos espesores, no siendo así en los sectores donde la corteza presenta pequeños espesores y se manifiesta una alta variabilidad.

La complejidad de los espesores de la corteza es, en parte, un reflejo de la irregularidad del basamento donde estas yacen. El basamento rocoso, en la mayoría de los casos está cubierto por la corteza, por lo que se requiere la utilización de métodos indirectos que permitan obtener un registro continuo de la variabilidad en profundidad. Además de conocer en parte los horizontes que componen a la corteza lateritica y su variabilidad ya sea en profundidad o lateralmente.

La técnica de prospección mediante el uso de GPR es una práctica poco usual en nuestro medio en el desarrollo de estudios geotécnicos, debido principalmente a la falta de conocimiento en cuanto a su funcionamiento y resultados, específicamente las mediciones realizadas por medio de antenas de baja frecuencia que alcanzan lecturas a mayor profundidad. El presente trabajo pretende realizar un acercamiento a la utilización de esta técnica con el fin de evaluar los resultados obtenidos mediante esta técnica y los resultados obtenidos por el método clásico de la red de perforaciones.

El presente trabajo es una combinación de investigación, labor de campo y comparación de resultados obtenidos para determinar la coincidencia o la imprecisión de la detección mediante GPR (exploración indirecta) con los registros de perforación (exploración directa). Se estableció un particular interés por obtener los espesores y la posición de los fragmentos de rocas o bloques flotantes (boulders) para compararlos con los resultados obtenidos de la exploración directa y determinar la fiabilidad del uso de esta tecnología. Para este fin fue seleccionado

un sector de aproximadamente 108.000 m^2 en uno de los yacimientos explorados, donde fueron realizadas ocho líneas de exploración mediante georradar por medio del uso de una antena de 50 MHz.

Problema

Necesidad de evaluar la distribución espacial del horizonte limonítico de la corteza laterítica, combinando la geofísica de GPR y los pozos de la red de exploración geológica.

Objeto

La corteza de meteorización.

Objetivo general

Evaluar la distribución espacial del horizonte limonítico de la corteza laterítica, combinando la geofísica de GPR y los pozos de la red de exploración geológica.

Campo de acción

Los yacimientos lateríticos.

Hipótesis

Si se combinan los resultados de la geofísica de GPR con los resultados de los pozos de la red de exploración geológica de los yacimientos lateríticos entonces se podrá conocer con mayor precisión la distribución espacial del horizonte limonítico en la corteza meteorización.

Objetivos específicos

- Determinar los pozos de exploración localizados sobre las líneas de Geofísica de GPR en el sector de estudio.
- Realizar el análisis estadístico de los pozos de exploración dentro del sector de estudio.

- Identificar los horizontes del perfil laterítico en los pozos de exploración según la Geofísica de GPR.
- Caracterizar los horizontes de la corteza a partir de los radargramas de GPR.

Capítulo I. Características físico-geográficas y geológicas de la región y del área de estudio

1.1 Introducción

En este capítulo se exponen las principales características de la zona de estudio, así como los rasgos geomorfológicos, climáticos y geológicos, además de la vegetación presente en esta zona. Se hace una breve referencia a la historia y las características del método geofísico de GPR, y los antecedentes de este en los estudios y aplicaciones en los yacimientos lateríticos, además del análisis de investigaciones pasadas relacionadas con la estimación mediante técnicas geoestadísticas.

1.2 Ubicación geográfica

El yacimiento Camarioca Sur se encuentra ubicado en el municipio Moa, provincia de Holguín, en el área comprendida en la Hoja topográfica Moa 5277, a escala1: 100 000, entre las coordenadas establecidas, (ver Tabla 1)

Vértice	Norte, m	Este, m
1	213 200	693 900
2	213 200	696 600
3	212 600	696 600
4	212 600	696 900
5	210 800	699 000
6	209 000	699 000
7	209 000	700 699
8	207 002	699 486
9	207 001	697 434
10	210 000	694 500
11	212 000	693 900
1	213 200	693 900

Tabla 1. Límites del yacimiento

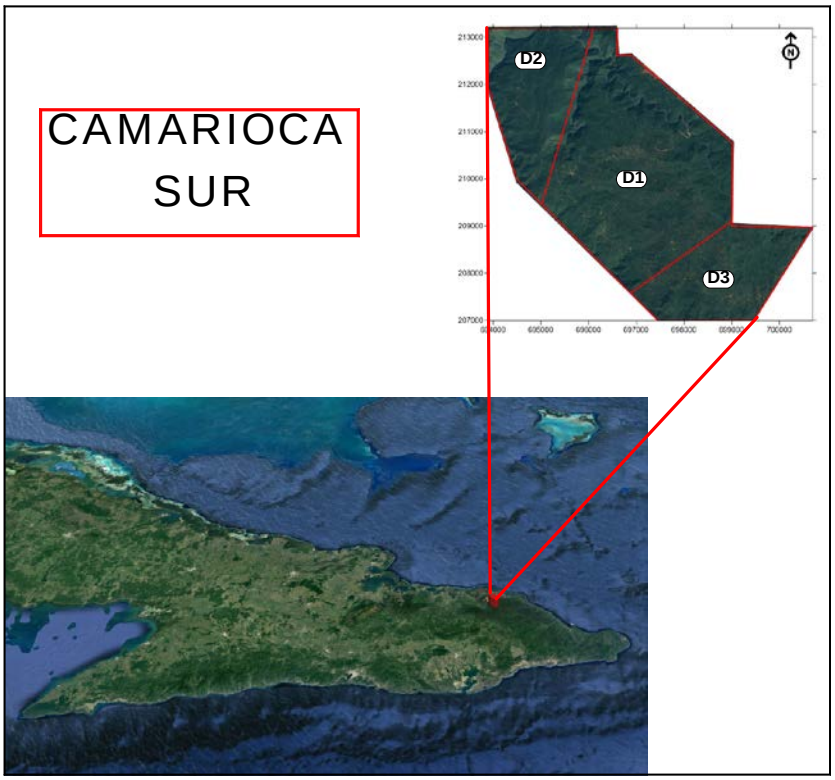


Figura 1*:* Ubicación del área de estudio

1.3 Geomorfología

Este territorio se caracteriza por presentar un relieve montañoso que se manifiesta de forma continua hacia la parte centro sur, con predominio de cimas aplanadas y vertientes abruptas. Se destaca como punto más elevado el Toldo con una elevación de 1 174,6 m sobre el nivel del mar.

En la región se han determinado dos zonas geomorfológicas, bien definidas: la de llanuras y la de montañas, esta última, la más extendida, ha sido clasificada en cuatro subtipos, entre los que se destaca el de montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas, por estar a él asociados los mayores yacimientos ferroniquelíferos. Por su parte, la llanura litoral que se dispone como una estrecha franja paralela a la costa, es de tipo acumulativa marina, ligeramente diseccionada con alturas que pueden alcanzar hasta los 20 – 25 m.

El yacimiento Camarioca Sur se caracteriza por la inestabilidad e irregularidad del relieve, ya que en su morfología aparecen numerosos barrancos, escarpes y deslizamientos, así como sectores altamente diseccionados.

Los barrancos son frecuentes en la parte alta y media de los ríos que tienen un fuerte control estructural, alcanzando su mayor expresión en la parte centro meridional y llegan a desarrollar pendientes de hasta 45º con alturas máximas de 240 m, lo cual hace susceptible a estos sectores al deslizamiento y arrastre de suelos. Ante la actividad sísmica estos barrancos constituyen sectores de alta vulnerabilidad, no sólo porque su génesis está relacionada con las estructuras tectónicas activas del territorio sino también, porque favorecen la dinámica erosiva sobre todo en las áreas desprovistas de vegetación, ya sea por causas naturales o antrópicas.

Geomorfológicamente el territorio está clasificado genéticamente dentro del tipo de Horst y bloques, que corresponde a los cuerpos de rocas ultrabásicas elevados en la etapa neotectónica.

En el territorio de Moa y superpuesto a las formas antes descritas se desarrollan formas del relieve cásico en un sector de aproximadamente 72 km^2, parte del cual se encuentra dentro del área objeto de investigación.

En el área del yacimiento las formas del relieve cársicas afloran hacia la parte sur, aunque en los trabajos geológicos realizados se han encontrado formas cársicas enterradas bajo las cortezas ferroniqueliferas.(Urra Abraira, Rodrguez Infante, & Muñoz Gómez, 2012).

1.4 Hidrografía

La red hidrográfica de la zona se encuentra bien desarrollada con presencia de numerosos arroyos y ríos entre los cuales se encuentran: Aserrío, Cabañas, Yagrumaje, Moa, Punta Gorda, Cayo Guam, Semillero, El Medio, Cupey, Yamaniguey, y parte del curso del rio Jaguaní, en su mayoría corren de sur a norte y desembocan en el Océano Atlántico, donde se forman los manglares.

En general predomina la configuración fluvial de tipo detrítica, aunque debido al control tectónico del relieve, pueden observarse sectores fluviales con red enrejada. Los ríos en todos los casos son alimentados por las precipitaciones, donde las zonas de alimentación se encuentran en las zonas montañosas del grupo Sagua-Baracoa, en las zonas más bajas se caracterizan por una actividad de acumulación.

El río de segundo orden Arroyón, que constituye el límite nororiental del yacimiento se extiende de sur a norte, abarcando un área de 18,6 km^2, lo que representa un 65,90 % de toda el área del yacimiento. Este río mantiene escurrimiento estable durante todo el año, con caudales superiores a los 300 l/s. y en periodos de avenidas provocadas por las lluvias su escurrimiento supera los 3 000 l/s.(Urra Abraira et al., 2012)

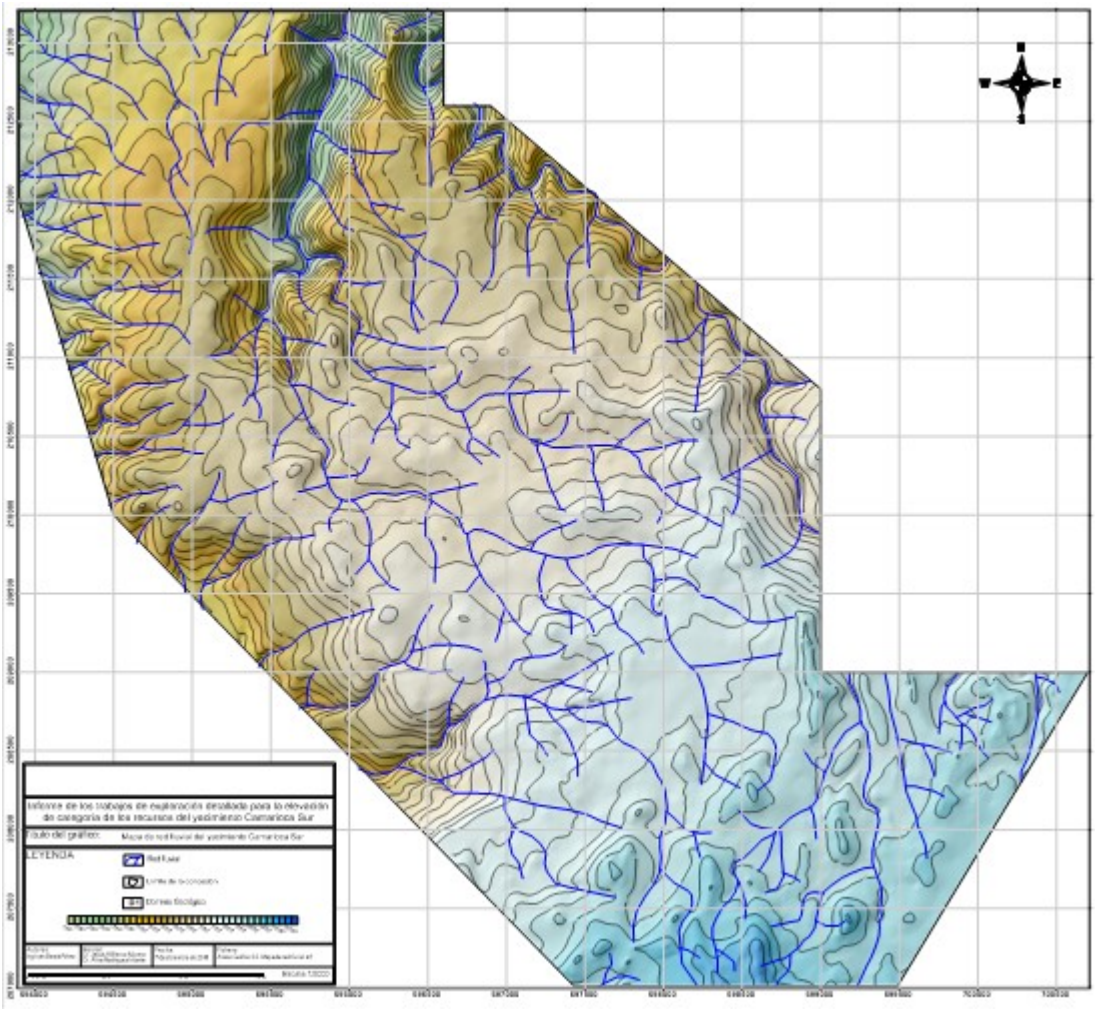


Figura 2. Mapa de la red hidrográfica de la región de estudio.

1.5 Hidrogeología

La caracterización hidrogeológica del área del yacimiento se realizó a partir de la compilación y procesamiento de la información de trabajos precedentes, de los recorridos de campo, medición de niveles en pozos, recopilación de datos de reportes de perforación de pozos de exploración y los datos aportados por los 9 pozos hidrogeológicos perforados en la actual campaña.

De los pozos de perforación de exploración fueron revisados 5 000 reportes, 549 con datos de niveles medios, 330 pozos con datos de humedad, así como los datos de 112 cubeteos y 2 bombeos en pozos y su procesamiento.

Las condiciones hidrogeológicas del yacimiento pueden considerarse simples desde el punto de vista estructural, sin embargo, la presencia de un flujo no homogéneo, variable espacialmente y en el perfil, unido a las características de permeabilidad, dadas por un coeficiente de filtración que varía desde 0,003 m/d hasta más de 1 m/d, así como la existencia de una red del flujo subterráneo, hacen que éstas sean catalogadas como muy complejas.

La principal fuente de alimentación de las aguas subterráneas es la infiltración de las aguas de precipitaciones atmosféricas en zonas donde las rocas agrietadas afloran a la superficie del terreno o yacen bajo la cubierta de ocres inestructurales. La segunda fuente de alimentación es la infiltración desde los arroyos existentes dentro del yacimiento, principalmente durante las lluvias, ya que, en periodos de estiaje, estos arroyos predominantemente fungen como drenes de las aguas subterráneas y en períodos de sequía superiores a 60 días estos arroyos no presentan escurrimiento.

Las principales rocas acuíferas en el área lo representan las rocas agrietadas y con cavernas aisladas que yacen bajo el estrato laterítico de cubierta las que le imprimen a las aguas contenidas en las rocas presiones que alcanzan hasta unos 3m de altura, en función del espesor de estas lateritas formadas por los ocres estructurales e inestructurales, de permeabilidad unas 10 veces menor que la existente en las rocas acuíferas, lo que caracteriza a las aguas subterráneas del yacimiento como semiconfinadas a confinadas en partes.

Aunque en períodos de extrema sequía el régimen de las aguas subterráneas pasa a ser predominantemente freático debido a los grandes descensos de los niveles en áreas del yacimiento, bajo la cubierta laterítica que alcanzan magnitudes superiores a los 10,0 m.

El complejo acuífero queda conformado así por el acuitardo o seudo acuífero poroso en las lateritas donde existe un micro flujo, y el estrato acuífero de grietas en las rocas serpentinizadas agrietadas acuíferas, conteniendo agua que tiene presión local y que en partes superan los 3 m de columna de agua.

En las rocas acuíferas y principalmente en peridotitas se han observado cavernas con ancho de varias decenas de centímetros y alturas de más de un metro.

El régimen de las aguas subterráneas es variable a través del perfil laterítico. El primer horizonte acuífero está conformado por dos capas de comportamientos diferentes. La capa superior presenta un régimen de acuífero esporádico y su alimentación proviene de las aguas de lluvia que se infiltran, y en una menor proporción, de las aguas que llegan hasta ella por ascensos capilares. En la capa inferior, el espesor saturado oscila entre 0 y 8 m. En esta capa como acuífero está presente un acuitardo, debido a la granulometría de los sedimentos que no permite la circulación lateral de las aguas o ésta es muy débil. El régimen de flujo en esta capa es permanente y ascendente, teniendo como zona de drenaje la capa superior y la superficie del terreno, desde donde se evaporan las aguas.

El segundo horizonte acuífero en profundidad tiene diferencias internas propias. Las rocas lixiviadas, sobreyacidas por el primer horizonte acuífero, presentan un espesor que puede alcanzar en partes algo más de 5 m, mientras que la peridotita serpentinizadas y otras rocas agrietadas son las de mayor acuosidad en el complejo acuífero de las ofiolitas, por su mayor permeabilidad y libre circulación del agua. Por encontrarse bajo sedimentos de menor permeabilidad presenta un régimen de acuífero de semiconfinado a confinado, con presiones que alcanzan hasta los 5 m de columna de agua (0,5 atmósferas). El espesor acuífero de estas rocas se desconoce, ya que ninguna perforación penetró en ellas más de 5 m y la potencia meteorizada puede superar los 20 m de profundidad.

El nivel de las aguas subterráneas aparece generalmente en el contacto entre las lateritas (los ocres estructurales) con las rocas lixiviadas y agrietadas, durante el período húmedo, cuando las rocas agrietadas están totalmente saturadas con agua. La profundidad de los niveles es muy variable y está subordinada al relieve del terreno.

Existe una dirección del flujo predominantemente en dirección norte, hacia el río Moa, con desviaciones locales en los extremos este y oeste del yacimiento en dirección a los ríos Arroyón y Calentura y otros arroyos y hondonadas, afluentes

de estos ríos que sirven de drenaje a las aguas subterráneas y en parte las alimentan en los períodos de lluvia. La superficie del nivel piezométrico está dominada por el relieve del terreno y repite su configuración, variando entre pendientes máximas de $0{,}25^0$ y más en taludes de elevaciones del terreno y mínimas de $0{,}036^0$ en la zona central del área

En algunas depresiones de origen tectónico con existencia de fallas afloran manantiales con caudales variables en tiempo en función de la temporada lluviosa o seca, muchos de ellos desaparecen en período de seca.

El drenaje de las aguas subterráneas es rápido en períodos secos, con descensos de los niveles observados a velocidades que alcanzan los 10 y 18 cm/d, disminuyendo el espesor acuífero entre 5 y 10 m, produciéndose el agotamiento de las reservas.

El relieve de la zona húmeda de las lateritas está estrechamente relacionado con el relieve del nivel piezométrico de las aguas subterráneas ajustándose a la dependencia de los procesos que provocan la humedad en estos sedimentos y que responden a la posición del nivel piezométrico.

La permeabilidad está en función del coeficiente de filtración (o conductividad hidráulica) de las rocas agrietadas, serpentinizadas calculado por datos de cubeteos en 106 pozos de exploración mineral y ocho pozos con fines hidrogeológicos, donde el espesor de columna de agua permitió la ejecución de estas pruebas; y oscila entre valores mínimos de 0,003 m/d y máximo 0,95 m/d, con un valor medio de 0,172 m/d, existiendo valores anómalos de K = 7,26 m/d en el pozo 17352 y K=3,97 m/d en el pozo 403231; K=3,17 m/d en el pozo 14963 que deben estar relacionados con alguna zona de falla, o porque la perforación haya cortado alguna de las cavernas existentes en las rocas agrietadas.

La mayoría de los valores de permeabilidad establecidos se encuentran distorsionados debido a que los pozos cubeteados como regla en el momento del cubeteos han perdido profundidad por sedimentación y derrumbes de sus paredes, también por arrastre de material de perforación al pozo durante las lluvias.

Los pozos con datos de permeabilidad se encuentran mayormente concentrados en el extremo nororiental del área de estudio y por la variabilidad que presenta la permeabilidad, estos pozos no detallan el área completamente.

La composición química de las aguas subterráneas fue caracterizada por muestreo de aguas subterráneas y de ríos y arroyos en el yacimiento ejecutado en el mes de abril y julio, coincidiendo que las muestras fueron tomadas en pleno período de seca, cuando ya los niveles en los pozos habían descendido considerablemente, por lo que los resultados de los análisis caracterizan a las aguas subterráneas propiamente de las rocas acuíferas y las que son drenadas por los arroyos y ríos y escurren como aguas superficiales.

Los resultados de los análisis de agua que se presentan en el anexo textual 6.3 fueron obtenidos por procesamiento de nueve muestras de agua analizadas en laboratorios de la Empresa Geominera Oriente, a los que se les realizaron análisis de control en laboratorios de la Empresa Pedro Soto Alba de Moa.

Los resultados expuestos en el anexo corresponden a análisis realizados en el laboratorio de la empresa Pedro Sotto Alba de las muestras tomadas en el río Arroyón, afluente río Calentura, arroyo Campamento, pozos P.H.2 y P.H.5. Las de los pozos P.H.6, P.H.7, P.H.8 y P.H.9 muestran resultados de análisis realizados en el laboratorio de la empresa Geominera Oriente.

Las aguas subterráneas del yacimiento por su mineralización son aguas dulces con mineralización menor de 1 g/l. Por su pH las aguas son débilmente básicas con valores del pH próximo a aguas neutras y oscila entre 7,7 y 7,9.

En los análisis realizados existe un contenido elevado de nitrito (NO_2) y del ion amonio (NH_4) que se encuentran por encima del contenido para aguas potables. La presencia del nitrito y del amonio podemos deducir que es debido a que el área del yacimiento es muy boscosa, con una cubierta de materia orgánica en descomposición sobre el terreno de considerable espesor con alta humedad y bajo sombra de los árboles, por lo que su origen es orgánico.(Urra Abraira et al., 2012)

1.6 Clima

El clima de la zona es subtropical húmedo, distinguiéndose de acuerdo a la distribución de las precipitaciones dos períodos de lluvia (mayo-junio) y (octubre-enero), y dos períodos de seca (febrero-abril) y (junio-septiembre). Según análisis estadístico de 21 años (1989–2009), referente al comportamiento de las precipitaciones en Moa, el total anual varía entre 767 y 3560 mm. La cantidad de días con lluvias anuales que se registran en la serie analizada para cada pluviómetro, manifiestan una regularidad cada cuatro años, en que existe un ascenso en la cantidad de días lluviosos. Ese comportamiento corrobora la existencia de períodos húmedos comprendidos entre los meses octubre - enero con un promedio de lluvia que oscila entre 155 – 336 mm y el mes de mayo con un promedio de 169,7 mm; y períodos secos que se dividen entre los meses de febrero, marzo, abril con un promedio de lluvia entre 113 - 151 mm y el que abarca los meses junio, julio, agosto con un acumulado promedio entre 120-122 mm de precipitaciones. La temperatura media anual oscila entre 22.26 y 30.5 ºC, siendo los meses más calurosos desde julio hasta septiembre y los más fríos enero y febrero, siendo los meses más lluviosos noviembre y diciembre y los meses más secos marzo, julio y agosto.(Urra Abraira et al., 2012)

1.7 Vegetación, flora y fauna

La flora de Moa es rica y diversa en toda su magnitud, por eso se destaca tanto por su endemismo genérico, como específico. También hay especies significativas por considerarse relictos de eras pasadas. La vegetación presente forma parte de las 5 formaciones vegetales siguientes.

Pinares: Bosque siempre verdes, generalmente con un solo estrato arbóreo dominante (Pinus Cubensis), con altura alrededor de 20-30 m y una cobertura entre 80 y 90 % de la superficie pudiendo llegar en ocasiones hasta el 100 %. Especies más representativas: Pinus Cubensis, Framboyán azul, Guao y Copey.

Pluvisilvas: Es la formación vegetal más vigorosa y puede alcanzar hasta 40 m de altura. Especies más representativas: Majagual azul, Ocuje colorado, Roble y Yagruma.

Carrascales: Son formaciones de bosques siempre verde o matorrales bajos siempre verde. Alcanzan una altura de 6 y 8 m. Especie más representativa: Jaracanda arbórea.

Bosques de galería: Se desarrollan en las laderas de los ríos, arroyos, cañadas y diferentes cursos de agua. Pueden alcanzar hasta 20 m de altura o más. Especie representativa: Ocuje colorado y diferentes tipos de helechos.

Manglares: Son bosques siempre verdes que pueden oscilar desde 5 a 15 m y en ocasiones hasta 25 m, de acuerdo a las condiciones ecológicas de las zonas. Se localizan en zonas costeras bajas, fangosas, parcial o totalmente inundadas por agua salada, con acción directa del agua de mar.

Especies características: Mangle Rojo, Mangle Prieto, Patabán, Yana. Esta formación vegetal resulta extremadamente importante no solo económica y biológicamente sino desde el punto de vista ecológico ya que funciona como la barrera principal en la interacción de todos los acontecimientos entre los ecosistemas marinos y terrestres.

La fauna se caracteriza por una heterogeneidad y está representada por un total de 427 especies de las cuales 80 son de arácnidos, 112 de anfibios, 100 de aves y 106 de mamíferos de los cuales 104 se reportan como endémicos, 5 en peligro de extinción y 13 vulnerables, así como 31 aves migratorias.(Maceo Rustán, 2018)

1.8 Tectónica

El yacimiento se encuentra emplazado en el límite occidental de un bloque de máximo ascenso tectónico de la región, el cual es afectado por estructuras disyuntivas de diferentes periodos de la evolución geotectónica, lo que determina el alto grado de complejidad de la misma.

Las fallas más antiguas que aparecen en el área corresponden al período de compresión hacia el norte, culminaron con la probable colisión y obducción de las paleounidades tectónicas del Bloque Oriental Cubano sobre el borde pasivo de la Plataforma de Bahamas, ocurrió en el Eoceno Medio, mientras que

investigaciones más recientes, Iturralde, 1996 y Proenza, 1998 consideran que el mismo sólo alcanzó hasta el Paleoceno Inferior.

A partir del Eoceno Medio y hasta el Mioceno Medio las fuerzas de compresión tangencial se reducen en la región, quedando sólo expresadas a través de fallas de deslizamiento por el rumbo, plegamientos y empujes locales, tomando importancia los movimientos verticales que caracterizan y condicionan la morfotectónica regional, iniciándose a partir del Mioceno Medio el proceso de ascenso del actual territorio. Sin embargo, los movimientos verticales, aun cuando hayan predominado los ascensos, han sido fluctuantes, lo que provoca alteraciones en el desarrollo de la corteza laterítica, su remoción y redeposición, tanto en ambiente marino como continental, apareciendo indistintamente in situ, redepositadas o ambas. A ese periodo de inestabilidad se asocian los sistemas de estructuras más jóvenes de la zona, en gran parte orientadas este-oeste y norte-sur, que además de diseccionar la secuencia Ofiolítica, se manifiestan en la topografía a través de la formación de barrancos, deslizamientos y pequeños peniplanos escalonados, limitados por fallas. En el área del yacimiento existe un alto grado de fracturación de las rocas, lo que ha condicionado la complejidad en la distribución litológica y variabilidad en el comportamiento de las cortezas lateríticas, tanto en contenido de níquel como de potencia. La gran fracturación de las rocas es también responsable de la ocurrencia de intensos deslizamientos.

Sobre la complejidad estructural del área se evidencia tanto por el control estructural del drenaje, como por las diferentes orientaciones que presentan las fallas y los desplazamientos que originan en el relieve.

La potente cobertura vegetal del área y la ausencia de materiales fotográficos para su interpretación han impedido la delimitación de las estructuras menores, reflejando en el mapa tectónico, ver *Figura 3*, solo las fallas o alineamientos tectónicos de mayor envergadura. Sin embargo, todas las estructuras cartografiadas para el área deben tenerse en cuenta no solo en los trabajos de exploración, sino también durante la explotación, debido a los riesgos que potencialmente encierran los deslizamientos.(Urra Abraira et al., 2012)

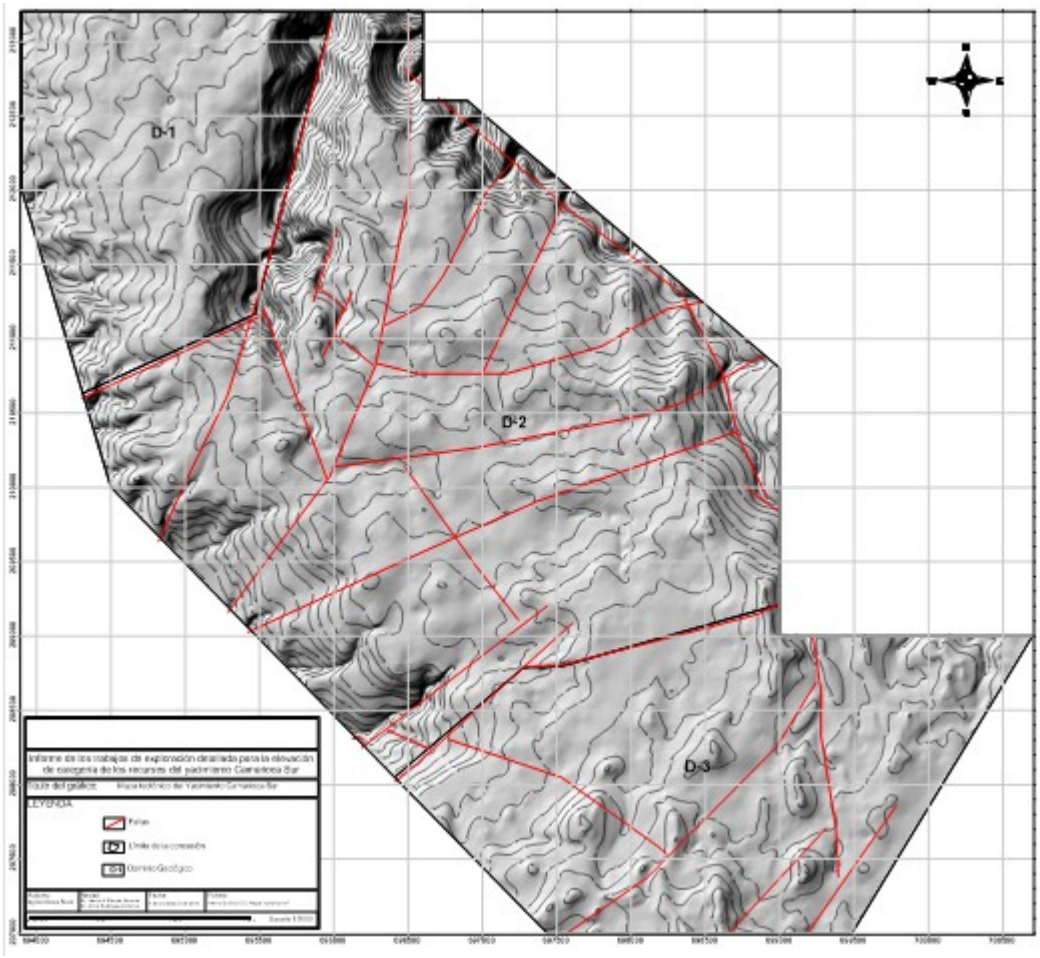


Figura 3. Mapa tectónico.

1.9 Geología de la región y del sector de estudio

El área ocupada por el yacimiento forma parte del macizo Moa Baracoa, perteneciente a la Faja Ofiolítica Mayarí Baracoa (FOMB); este macizo presenta una estratigrafía completa y una secuencia mantélica mayoritariamente harzburgítica y dunítica, con significantes cantidades de cromititas podiformes. Los xenolitos de litologías de alta presión o bloques tectónicos están ausentes El límite inferior de estas ofiolitas está definido por fallas inversas de muy bajo ángulo, indicando que su emplazamiento está relacionado con un evento de acortamiento

cortical. Este acortamiento puede estar relacionado con una colisión, o con otros eventos tectónicos como subducción con polaridad reversa (subduction polarity eversal).

En conformidad con las rocas pertinentes al macizo, en el área del yacimiento las principales rocas ultramáficas del basamento son harzburgitas con una distribución del 6 % como se muestra en la figura 4, con grado variable de serpentinización, asociada principalmente a zonas de fracturas y cizalla. En menor porcentaje de representación aparecen serpentinitas, dunita y lherzolitas, las que sugieren un origen mantélico de las litologías del basamento. Además, se observan rocas peridotíticas alteradas, posible metamorfizadas como, antigorititas y talcititas, predominando la talcitización hacia la parte norte y la carbonatización hacia el sur. Estas litologías pueden tener influencia local en el desarrollo y composición de la corteza laterítica.

Figura 4. Distribución porcentual de las rocas del basamento

(Iturralde Vinent, 1997) reconoce en la constitución geológica del archipiélago cubano la existencia del cinturón plegado, constituido por terrenos oceánicos y continentales deformados y metamorfizados de edad pre-Eoceno Medio, y el neoautóctono.

Las unidades oceánicas están compuestas por materiales pertenecientes al cinturón ofiolítico septentrional y los arcos de islas volcánicos del Cretácico y el Paleógeno. El neoautóctono está constituido por materiales terrígenos-carbonatados poco deformados del Eoceno Superior tardío al Cuaternario, que cubren discordantemente el cinturón plegado.

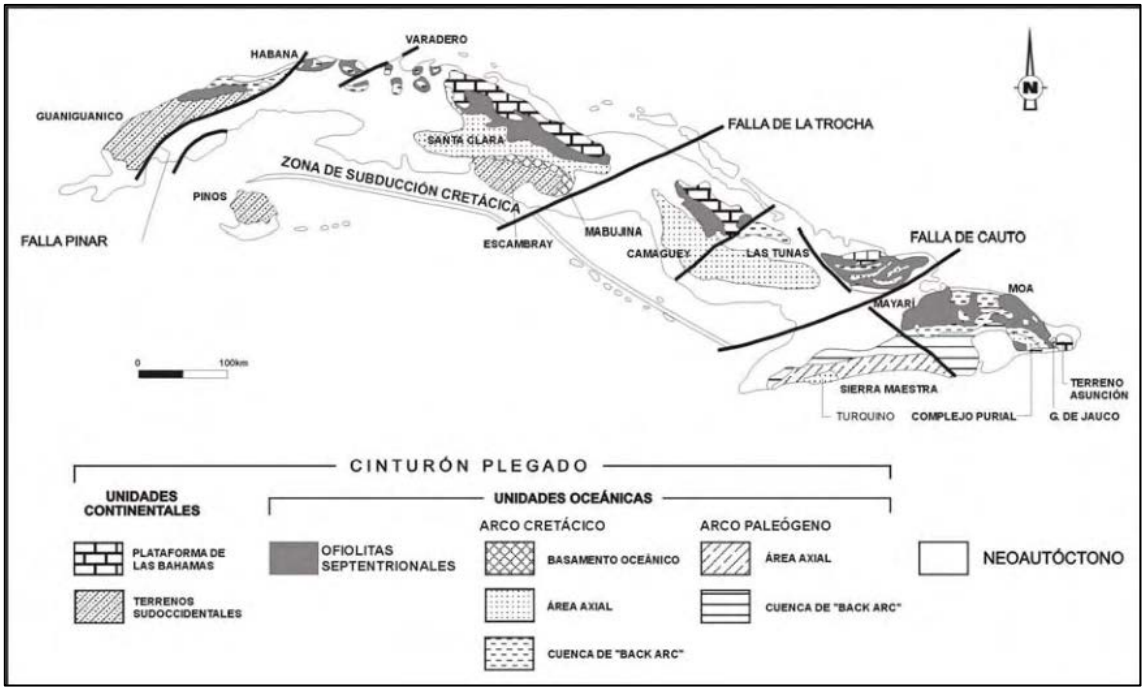


Figura 5. Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoautóctono (tomado de Iturralde Vinent, 1997).

En el sector de estudio, de forma general, predominan las rocas peridotíticas; en la parte Este, en una franja que se despliega de Norte a Sur, aparecen las diseminaciones de cromitas, y un poco más distante, las rocas de composición antigoríticas que determinan bajos valores de níquel en los ocres estructurales. El norte del sector se encuentra atravesado por una falla activa en dirección noreste, la misma se caracteriza por el desplazamiento del cuerpo mineral y control de la mineralización, además que delimita el límite de distribución de las rocas antigoríticas (Muñoz Gómez, Rodríguez Infante, Martínez Vargas, & Vera Sardiñas, 2007). Dentro de los ocres aparecen fragmentos serpentiníticos e inclusiones de bloques de diferentes litologías que deben tenerse en cuenta para

la estimación de recursos geológicos por bloques y para el control de la explotación minera (Urra Abraira et al., 2012).

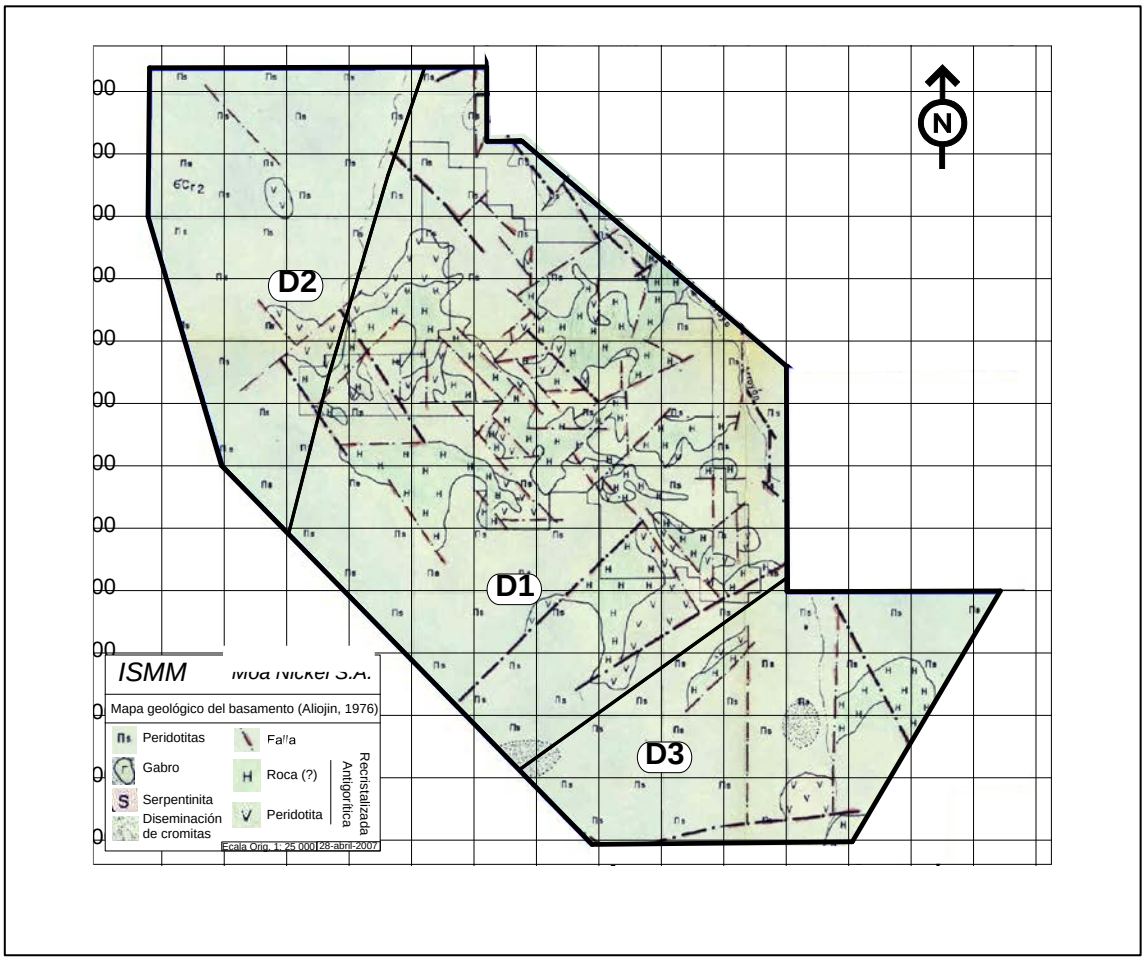


Figura 6. Fotografía del mapa geológico del basamento de Camarioca Sur (Aliojin, V., et al., 1977) con escala original 1:25 000, con los dominios geológicos (Muñoz, J. N., et. al, 2007).

1.10 Corteza de meteorización

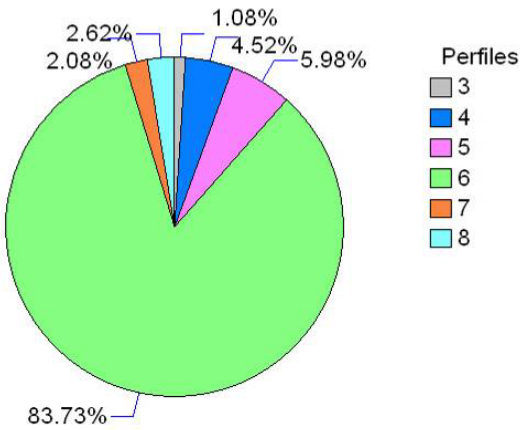
La laterita es el suelo propio de las regiones cálidas, caracterizado por la pobreza en sílice y su elevada cantidad de hierro, alúmina y/u otros minerales. Las costras lateríticas se deben a la meteorización de la capa superficial del suelo, es decir, a la acción in situ de los agentes meteorológicos (lluvia, insolación, viento, acción de los seres vivos, etc.).

Los suelos lateríticos son los subsuelos de las selvas, de las sabanas de las regiones tropicales húmedas.

La meteorización tropical (laterización) es un prolongado proceso de meteorización química donde los suelos y regolitos resultantes varían en grosor, química y mineralogía. Los productos iniciales de la meteorización son rocas esencialmente caolinizadas llamadas saprolita. Un período de laterización se extendió desde aproximadamente mediados del período Terciario a mediados del Cuaternario (35 a 1,5 millones de años atrás). Este cambio brusco fue global y representa principalmente a un aumento de la masa de hielo coincidiendo casi al mismo tiempo con una disminución brusca de las temperaturas superficiales de los océanos. Estos dos cambios indican un enfriamiento global repentino. La tasa de laterización habría disminuido con el enfriamiento brusco de la tierra. La meteorización en los climas tropicales continúa hasta nuestros días una tasa reducida.

La corteza laterítica en el yacimiento se caracteriza por ser heterogénea, predominando los perfiles laterítico-saprolíticos; algunas áreas presentan un perfil de tipo laterítico estructural siendo extremadamente escasos los perfiles lateríticos inestructurales (Urra Abraira et al., 2012).

El espesor friable de la corteza de intemperismo presenta oscilaciones en la mayor parte del yacimiento. Hacia la parte Este el espesor es superior a 5 m con numerosas zonas de más de 10 m. Hacia la parte occidental las cortezas alcanzan como promedio 4.95 m, con una amplia difusión de zonas con 2-3 m de espesor friable. De igual forma se observan variaciones de norte a sur, encontrándose los mayores valores promedios hacia la parte central.



Tipos de perfiles	
3	Laterítico estructural completo
4	Laterítico estructural incompleto
5	Lateritico-saprolitico estructural completo
6	Lateritico-saprolitico estructural incompleto
7	Saprolíticos estructural completo
8	Saprolíticos estructural incompleto

Figura 7. Distribución de los perfiles de intemperismo en el yacimiento.

La corteza laterítica se asienta sobre un basamento constituido principalmente por 6 tipos de rocas lo cual le imprime regularidades entre las que destacan los contenidos de Fe, que alcanzan sus mayores valores en la corteza desarrollada sobre las peridotitas alteradas, mientras que los mayores contenidos de Ni, se asocian a las cortezas sobre dunitas y harzburgitas, relacionado con la mayor presencia de olivino de estas rocas (≥ 87 %).

Los contenidos de Co son similares en las cortezas sobre harzburgitas y dunita alterada y una regularidad constante en el resto, esta situación se observa diferente en los contenidos de Si y Mg, donde los valores más elevados se encuentran en la corteza desarrollada sobre lherzolitas, en contraste con las rocas ricas en olivino, las cuales reflejan menores valores, aunque ligeramente superior en aluminio.

Según esas regularidades geoquímicas en las lateritas se determina que las áreas perspectivas en el yacimiento se localizan en las cortezas desarrolladas sobre un basamento constituido por harzburgitas y dunita.

Respecto a las litologías del perfil laterítico existe predominio de los Ocres Estructurales Finales (41 %) y subordinadamente, los Ocres Estructurales Iníciales (32 %).(Urra Abraira et al., 2012)

1.11 Economía

Según el estimado de 1999 la población de Moa es de 64 684 habitantes, y para 2013 según la información aportada por la Dirección Municipal de Estadística los habitantes habían ascendido a 75 301.

La región de Moa se caracteriza por el desarrollo de la industria minera, contando con dos plantas metalúrgicas para el procesamiento de las menas niquelíferas, la Comandante Pedro Soto Alba y la Comandante Ernesto Che Guevara. Una tercera planta para la obtención de ferroníquel se encuentra en fase de construcción.

Además, existen otras industrias y empresas relacionadas con la actividad minero metalúrgica tales como: La Empresa Mecánica del Níquel, la UPI Las Camariocas, la Empresa Constructora y Reparadora de la Industria del Níquel (ECRIN), el Centro de Proyecto del Níquel (CEPRONIQUEL) y otros organismos de los cuales depende la economía de la región como la Empresa Geominera de Oriente, el Combinado Lácteo y otros.

En la región se explotan también los recursos forestales por la Empresa Municipal Agroforestal (EMA), al constituir los recursos forestales un eslabón importante de la economía de la región (Maceo Rustán, 2018).

Capítulo II. Procedimientos y métodos empleados

2.1 Introducción

El objetivo fundamental de este capítulo es exponer el organigrama de trabajo seguido en el desarrollo de la investigación y ofrecer una descripción de los métodos empleados para obtener las características de la corteza de meteorización.

La elevada demanda universal de materias primas minerales ha provocado el incremento de la aplicación de las técnicas geofísicas en una gran variedad de yacimientos minerales (Dentith & Mudge, 2014).

El método geofísico de GPR permitió la evaluación del espesor de la corteza y la ubicación del basamento rocoso. Las investigaciones precedentes recogen la información general de los datos de las explotaciones realizadas en este yacimiento, en específico las perforaciones de exploración que utilizaron los métodos de perforación con barrena espiral para la precisión geoquímica de la corteza y el método a columna para la determinación del tipo de basamento rocoso.

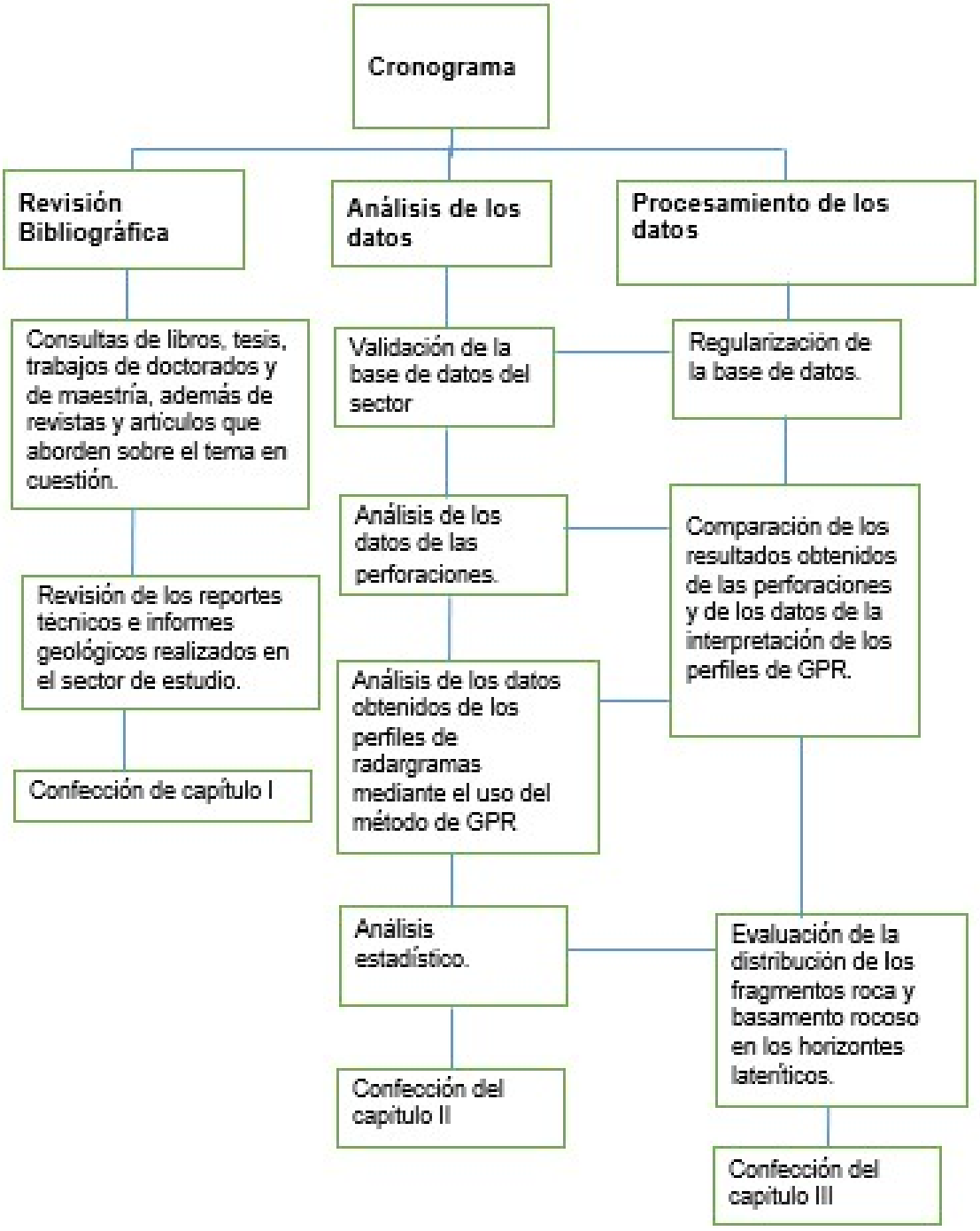


Figura 8. Diseño del organigrama de trabajo.

2.2 Método geofísico de GPR

El georadar es un método de prospección electro-magnética para el estudio no destructivo del subsuelo. La señal recibida se amplifica, digitaliza y almacena para posteriormente, mediante un adecuado procesado podamos adquirir información de las características, contenido y posibles anomalías del subsuelo. Entre la posible información obtenida de un georadar está la profundidad, orientación, tamaño y forma de objetos enterrados.

Se debe tener en cuenta que la única información fiable de la que disponemos es el tiempo de viaje de la señal electromagnética: tiempo que transcurre desde que la señal es emitida por la antena emisora, penetra en el terreno, encuentra una anomalía y se refleja el eco, captándose el evento en la antena receptora. A partir de estos datos y mediante un buen procesado se puede obtener una estimación fiable de la geometría del reflector (Espín de Gea, Reyes Urquiza, & Gil Abellán, 2017).

En esta investigación se usó este método fundamentalmente para estudiar el comportamiento de la corteza, así como sus límites de capas y la variabilidad y continuidad horizontal que esta presenta, además de revelar la presencia de rocas flotantes.

En este caso se empleó una antena del tipo biestática que consiste en un tubo flexible donde están acoplados las antenas emisoras y receptoras. La antena de baja frecuencia es de 50 MHz con una longitud de 10 m aproximadamente y un peso por debajo de los 12 kg (Francké & Geoph, 2006).

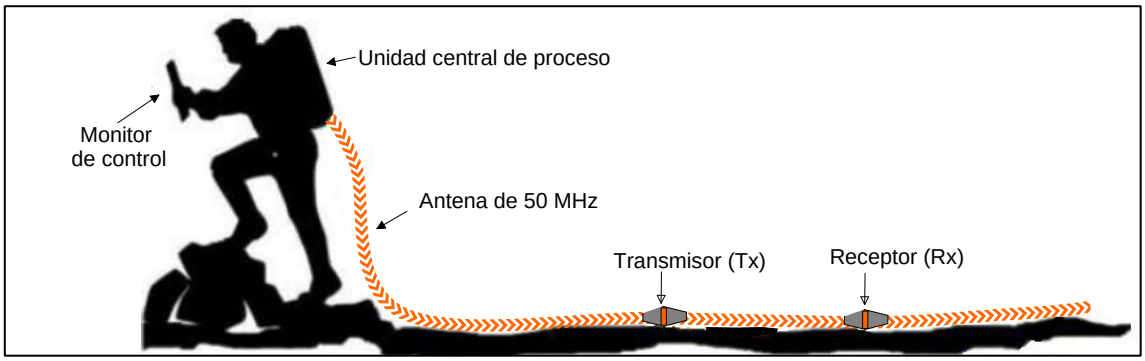


Figura 9. Representación del uso del GPR para este caso

En la figura anterior se muestra el funcionamiento del GPR de 50 MHz, usado en las investigaciones de la corteza lateritica. La función de la unidad central es controlar los sistemas electrónicos y almacenar toda la información, por otra parte, el monitor registra y visualiza en tiempo real los registros obtenidos además de la calibración del equipo antes de comenzar los trabajos. El GPR está diseñado para trabajar de forma autónoma alimentándose por tecnología de iones de litio, desarrollado específicamente por GroundProbe (Maceo Rustán, 2018).

Al desplazar la antena sobre la superficie del terreno se registran las reflexiones detectadas en el subsuelo bajo la línea de desplazamiento del GPR, el resultado obtenido es un perfil vertical continuo del subsuelo. Estos registros obtenidos son denominados radargramas, y constituyen una acumulación sucesiva de trazas, las cuales son señales que se van registrando a través del tiempo y contienen las características electromagnéticas del medio atravesado (Maceo Rustán, 2018).

El sistema fue diseñado para ser resistente al agua, ya que en la realización de los trabajos fue sometido a cursos de aguas activos y a numerosos aguaceros.

El comportamiento de las ondas electromagnéticas que se propagan a través de un material está determinado, en gran medida, por tres parámetros que definen sus características electromagnéticas, a continuación, se describen:

- La conductividad eléctrica (σ) nos proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica; es así cómo materiales muy conductivos transportaran con mayor facilidad la energía, obteniéndose mayor penetración de la parte eléctrica de la onda electromagnética y disipación o atenuación del objeto en la imagen obtenida (Ocaña Levario, 2014).
- La permitividad eléctrica (ε) es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Proporciona un valor de la respuesta estática del material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo. La permitividad eléctrica (también conocida como constante dieléctrica) relativa del vacío es 1 (aire).

- La permeabilidad magnética (μ) es la capacidad que posee un medio para atraer y hacer pasar un campo magnético. Es una medida que nos proporciona su capacidad de almacenar energía magnética y únicamente los medios de composición ferromagnética (que pueden ser atraídos por un imán) tienen esta capacidad (Ocaña Levario, 2014).

Cuando la energía electromagnética emitida por el GPR alcanza una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del medio por el cual se propaga, se producen los fenómenos de reflexión y de refracción, lo que está relacionado con el cambio en la dirección de propagación de la señal. En la Figura 10 se presenta de forma esquemática los fenómenos de reflexión y refracción.

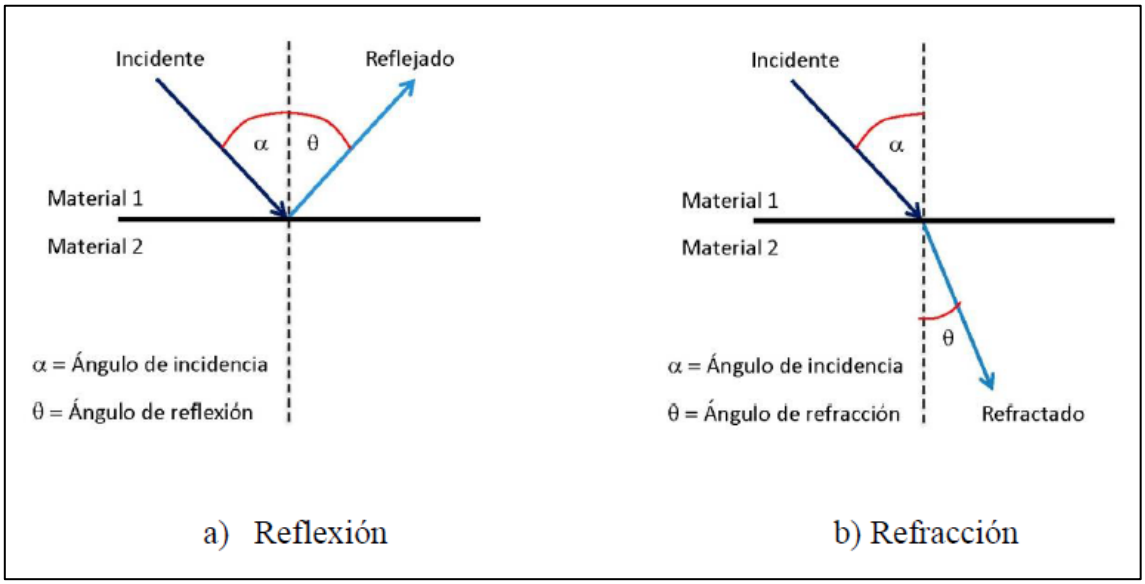


Figura 10. Efecto de reflexión y refracción de la energía incidente.

Una onda es reflejada cuando se encuentra con un cambio en el material y varían las propiedades del mismo; el ángulo de reflexión es el mismo que el ángulo de incidencia, por lo general, tomando como referencia la perpendicular a la superficie, o la línea normal (Figura 10 a)). Por otro lado, el cambio de dirección de la señal se produce cuando se pasa de un medio a otro con diferente velocidad (diferente índice de refracción), con un ángulo de incidencia diferente a cero grados con respecto a la normal de la interface (Figura 10 b)) (Maceo Rustán, 2018).

2.3 Breve caracterización del método geofísico del radar de penetración de suelo (GPR)

El método geofísico electromagnético de geo-radar o GPR (Ground penetrating radar), permite detectar y ubicar estratos y objetos enterrados con alta precisión, obteniéndose mapas detallados del subsuelo. Este método consiste en la emulsión de pulsos electromagnéticos desde la superficie del suelo y se propagan dentro de este reflejando así las discontinuidades que hallan a su paso. La energía de los pulsos reflejados se mide por medio de dispositivos receptores ubicados en un monitor en la superficie, el tiempo que tarda la señal después de emitida, al receptor da una medida de la profundidad del área o de los límites de las capas del sector.

Las aplicaciones del geo-radar como técnica ecológica no destructiva y de alta resolución están ampliamente generalizadas, dada la gran versatilidad que lo caracteriza. Uno de los desafíos a los que se enfrenta esta técnica es incrementar la profundidad de investigación del subsuelo, además de mejorar los métodos de representación de los datos obtenidos, de forma tal que permitan un mejor interfaz de interpretación.

Una disposición típica del uso de este método para la prospección consiste en el uso de dos antenas, una emisora y otra receptora, las cuales se van desplazando por toda el área de interés obteniéndose para cada posición el tiempo que tarda el pulso en recorrer los trayectos de ida y vuelta, estimándose así las profundidades de los reflectores para cada posición sobre la superficie (Bonomo & De la Vega).

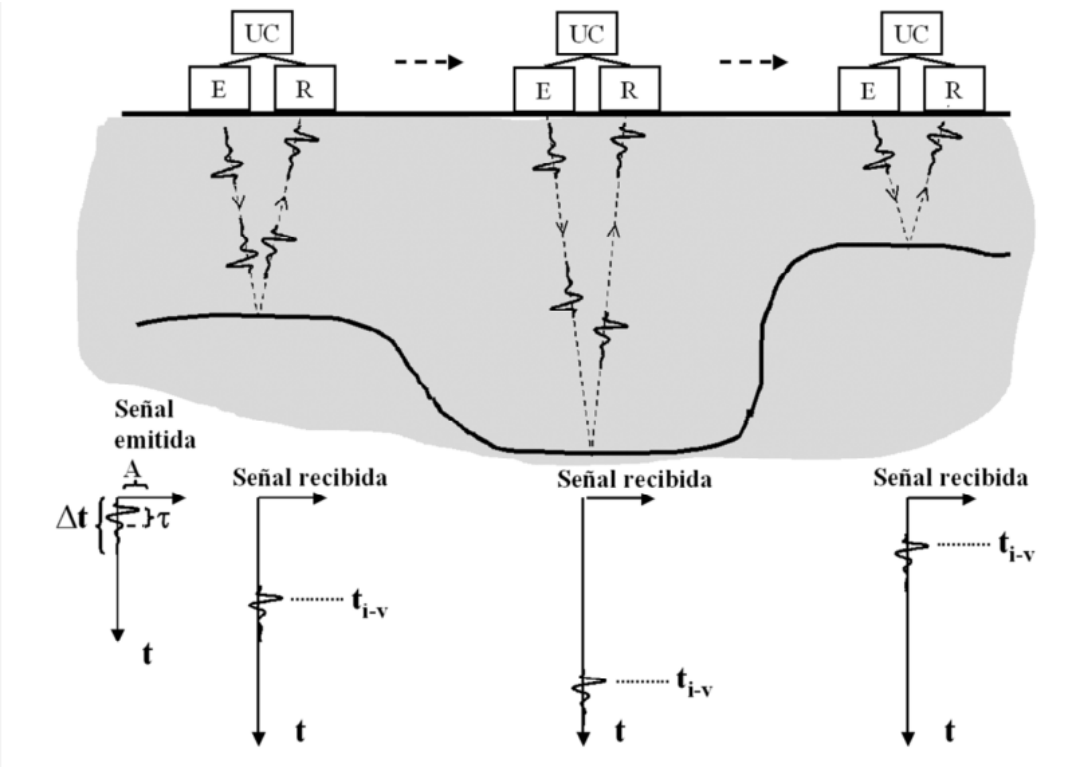


Figura 11. Secuencia en la cual un emisor y un receptor son desplazados conjuntamente.

2.4 Antecedentes del uso del GPR en los yacimientos lateríticos

El empleo del método geofísico de GPR en la geología y la minería para la estimación de recursos en los yacimientos lateríticos en Cuba es reciente, aunque en los últimos tiempos ha ido en ascenso, diferentes investigaciones llevadas a cabo haciendo uso de este método en los yacimientos lateríticos cubanos, ejemplos de estas investigaciones tenemos:

En el estudio presentado por (Acosta Breal, Gentoiu, & Lavaut Copa, 2005) se muestran los resultados del empleo del geo-radar (GPR) para determinar los contactos entre los horizontes lateríticos, saprolíticos y el basamento. Los límites obtenidos presentan una alta resolución propia de la variabilidad de estos tipos de depósito, además se resaltan los fragmentos de bloques flotantes (boulders).

El autor (Urra Abraira, 2007) introduce la aplicación de la geofísica de geo-radar (GPR) en combinación con las técnicas geoestadística para confirmar la continuidad geológica de la mineralización; enfatiza en que las campañas de

perforación en los yacimientos ferroniquelíferos no son suficientes para identificar la distribución de la mineralización, generando una inapropiada modelación geológica.

El artículo presentado por (Acosta Breal & Gentoiu, 2007) incorpora la técnica de GPR para el estudio de los depósitos lateríticos, donde obtiene imágenes de subsuelo con alta resolución para determinar los contactos entre la limonita, la saprolita y el basamento, además de los relictos de las rocas flotantes en la corteza de meteorización; los resultados obtenidos fueron desarrollados en sectores del yacimiento Yagrumaje Sur.

En el estudio realizado por (Gentoiu & Acosta Breal, 2014) se muestra una metodología para la incorporación de datos de las perforaciones y de Radar de Penetración de Suelo (GPR) en la estimación de los recursos niquelíferos mediante el empleo de geoestadística multivariada (cokriging ordinario y cokriging colocado). Se confeccionaron modelos de distribución espacial del espesor de la corteza de intemperismo y mena con una red más densa que la inicial. Los resultados obtenidos fueron comparados con los datos de la extracción minera, y se demostró estadísticamente mayor equivalencia con la minería cuando se incorporan los datos de geo-radar.

2.5 Modelación de yacimientos

Según (David, 1977) la modelación e interpretación de un depósito mineral consiste en establecer las continuidades, distribución, límites y el grado del metal o minerales de interés, donde se establece la zona o cuerpo discreto. Lo fundamental para una buena interpretación es conocer y usar al máximo el conocimiento geológico para establecer la continuidad geológica de los minerales o metales de interés.

En la actualidad la modelación está marcada por un elevado empleo de las técnicas informáticas, donde se desataca el uso de un sinnúmero de software, entre ellos: Gemcom©, Datamine©, Micromine©, Vulcan© y Surpac©, los cuales constituyen herramientas que facilitan el proceso de interpretación geológica.

Los modelos de yacimientos de dividen en tres grupos principales (Manteca Martínez, 1993) y (Martínez Vargas & Pérez Martínez, 2000): modelo geológico o geólogo- genético, modelo geométrico y modelo numérico, matemático o de bloque.(Maceo Rustán, 2018)

2.6 Geoestadística

La Geoestadística es una rama de la geografía matemática que se centra en los conjuntos de datos de la superficie terrestre, conocidos también como datos espaciales o espacio-temporales. Desarrollado originalmente para predecir las distribuciones de probabilidad de las leyes de mineral para las operaciones mineras, se aplica en la actualidad en diversas disciplinas geográficas como la hidrología, la ecología del paisaje, la pedología, la climatología, entre otras. La geoestadística no solo se aplica en diversas ramas de la geografía, sino también en otras ciencias tales como la oceanografía, la geoquímica, la geología del petróleo, la hidrogeología, la geometalurgia, la silvicultura y la agricultura (especialmente en la agricultura de precisión). También en problemas particulares como los destinadas a la propagación de enfermedades (epidemiología), la práctica del comercio y de la planificación militar (logística), y el desarrollo de redes espaciales eficientes. Algoritmos geoestadísticos se incorporan en muchos lugares, incluyendo los sistemas de información geográfica (SIG). También se puede decir que la geoestadística es una rama de la estadística aplicada que se especializa en la modelación de la variabilidad espacial de las variables aleatorias. Su objeto de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en el espacio, la geoestadística como la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio.

La variable aleatoria es una función que asigna un número real a cada elemento del espacio la misma puede representar tanto fenómenos discretos (categóricos) como continuos. Dentro de las variables que pueden ser modeladas por funciones aleatorias continuas están: la porosidad, la permeabilidad y la concentración de metal; las que pueden ser modeladas mediante variables discretas se encuentran los horizontes litológicos.

Una variable regionalizada es aquella que presenta una estructura de correlación espacial. Por tanto, se usa habitualmente para representar fenómenos naturales, y puede definirse simplemente como una función Z(x) que adopta un valor para cada punto x en el espacio R^n de n dimensiones. Una variable regionalizada generalmente presenta dos aspectos: aleatorio (asociado con variaciones erráticas o impredecibles) y estructurado (que refleja las características globales del fenómeno regionalizado), La función aleatoria se caracteriza por ser un conjunto de variables aleatorias Z(x) en el espacio R^n de n dimensiones (Maceo Rustán, 2018).

2.7 Muestreo, ensayos y análisis realizados

En la ejecución de los trabajos de campo en el yacimiento fue realizada la toma de muestras básicas en los pozos ordinarios, mineralógicos, pozos criollos y muestras para estudios de petrografía y lixiviación. A continuación, se presentan los tipos de muestreo realizados.

Toma de muestras básicas (ordinarias)

Con el objetivo de caracterizar la composición química del yacimiento fue realizada la toma de muestras básicas (químicas), según el manual de procedimientos del níquel 2007 según la instrucción IT-91-01-04. Las muestras fueron enviadas al laboratorio Elio Trincado Figueredo para la determinación de los ocho elementos químicos.

Muestreo mineralógico y petrográfico

Estas muestras se tomaron de los pozos seleccionados para caracterizar el basamento del yacimiento. Las muestras mineralógicas se tomaron del friable por tipo litológico para el estudio mineralógico y las petrográficas del basamento rocoso.

Los métodos utilizados en los análisis de las muestras fueron los siguientes:

- Determinación de Ni, Co, SiO_2, Al_2O_3, MgO, MnO y Cr_2O_3 por ICP (ISCL- 318:00).

- Determinación volumétrica directa de Fe. Método del dicromato de potasio (ISCL -315:00).

CAPÍTULO III. Análisis de la distribución espacial de la mena limonítica en la corteza laterítica, sector Camarioca Sur

3.1 Introducción

El objetivo fundamental de este capítulo es exponer los resultados obtenidos a través de las interpretaciones de los perfiles de GPR o radargramas realizados en el sector de estudio, para una caracterización de la distribución de las menas de interés para la producción en el proceso de lixiviación ácida a presión de la empresa Pedro Sotto Alba.

3.2 Distribución de los pozos de exploración vs líneas de GPR

Para la realización de este trabajo se seleccionó un sector de estudio donde se perforaron los pozos de exploración geológica para la determinación de los recursos medidos de laterítica niquelífera, en redes de 100 x 100 m, 33 x 33 m y 35 x 35 m. La distribución de los pozos de resultantes de todas las redes de exploración no sigue un espaciamiento uniforme entre pozos, en total existen 1,707 pozos con 12,493 m. (ver Figura 12).

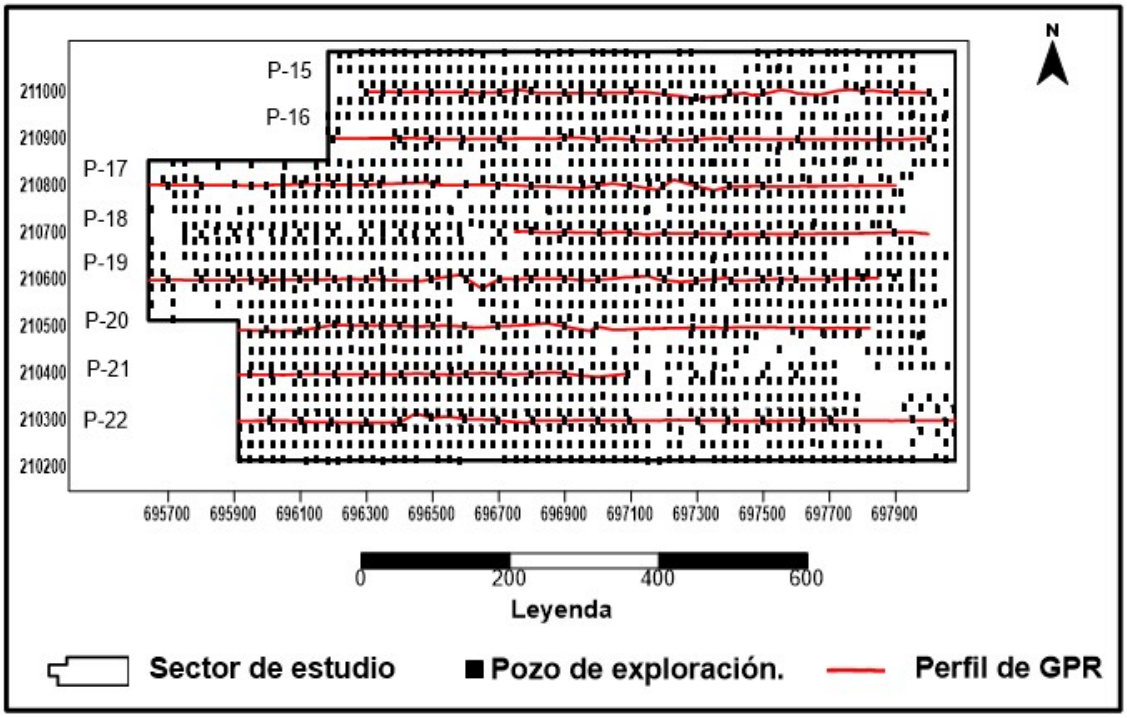


Figura 12. Esquema de ubicación del sector de estudio, yacimiento Camarioca Sur.

El yacimiento Camarioca Sur se caracteriza por bajos espesores de la corteza laterítica, como promedio de 7.7 m, mostrando una alta variabilidad lateral entre los pozos de exploración. En diferentes partes del yacimiento existen afloramientos del basamento rocoso, evidenciado por ausencia de corteza laterítica y abundantes fragmentos de rocas mezclados en los diferentes horizontes lateríticos.

El método de geofísica de GPR fue aplicado dentro del sector de estudio para precisar el contacto del horizonte limonítico con el horizonte saprolítico mezclado con rocas y el basamento rocoso. En el sector de estudio se realizaron ocho perfiles de exploración de GPR, con una separación de 100 m entre perfiles, alcanzando un total de 12.5 km lineales dentro del sector.

Los perfiles de GPR han revelado una corteza con abundantes fragmentos de rocas flotantes dentro del horizonte limonítico, lo que ofrece la posibilidad de determinar la distribución espacial de los registros de los pozos de exploración en relación a los diferentes horizontes delimitados por la geofísica de GPR.

El yacimiento tiene una superficie total de 2 366 ha y el sector una superficie de 192 ha, que representa el 8,11 % del área total del yacimiento.

A partir de los perfiles de radargramas de GPR se realizó la selección de los pozos de las redes de exploración ubicados sobre las líneas de geofísica, obteniendo un total de 153 pozos y 1 293 m, que representa un 9.0 % y 10.3 % de los datos totales de exploración dentro del sector respectivamente. (ver Figura 13)

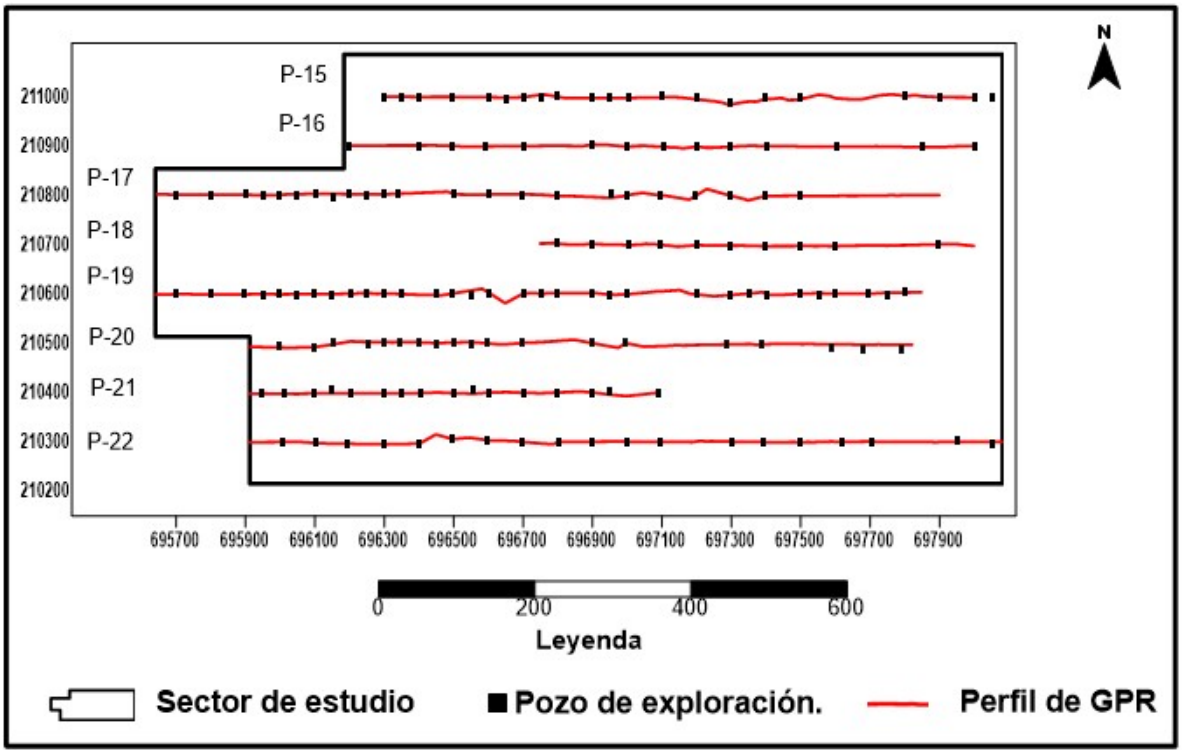


Figura 13. Esquema de distribución de los pozos de exploración sobre las líneas de GPR.

La determinación de los horizontes de la corteza se basó en los resultados de los pozos de exploración ubicados sobre las líneas de GPR, considerando los límites determinados por la interpretación geofísica de los radargramas.

3.3 Estadística básica de los principales elementos químicos en los pozos de exploración

Con el objetivo de observar los datos, su distribución y estructura espacial, así como sus desviaciones se realizó el análisis estadístico de los datos del sector en particular, de forma global, y dividido entre los pozos sobre las líneas de GPR.

El sumario de los estadígrafos analizados globalmente para cada variable se puede apreciar en la tabla 2. Algunas de las características que se distinguen en la estadística descriptiva de los datos, es la falta de normalidad de todas las variables analizadas, exceptuando el caso del Ni, aproximándose a una distribución normal. Los elementos con mayor variabilidad son el hierro, magnesio y sílice.

El sector cuenta con 12 493 registros y 1,707 pozos, de los cuales 153 están encima de las líneas de GPR.

Los estadígrafos generales del sector de estudio se muestran en tabla siguiente:

Variable (%)	Mínimo	Máximo	Moda	Media	Mediana	Varianza	Desv.Est.	Coef. Var.
Ni	0.08	2.90	0.99	1.056	1.04	0.14	0.38	0.36
Fe	0.90	53.4	44.70	36.21	39.10	103.15	10.16	0.28
Co	0.002	0.84	0.11	9.93	0.095	2.63	5.13	0.52
SiO_2	0.33	73.92	3.94	14.63	12.02	102.83	10.14	0.69
Mg	0.13	26.87	0.34	4.25	2.58	21.06	4.58	1.08
Al	0.22	18.84	4.49	4.67	4.52	3.62	1.90	0.41

Tabla 2. Estadígrafos de los elementos químicos principales del sector analizado.

El análisis estadístico de los contenidos de Ni, Fe y Co obtenidos de las perforaciones de exploración se realizó con el objetivo de evaluar la distribución y estructura espacial de los datos geoquímicos. En el análisis univariado se calcularon los estadígrafos fundamentales de tendencia central, dispersión y forma. La varianza del Ni (0.14) muestra que existe una distribución normal de esta variable dentro del sector, en relación a la varianza del Fe (103.15) cuyo alto valor indica una aparente mezcla de poblaciones.

El comportamiento de los estadígrafos de los pozos sobre las líneas de GPR (153 pozos), con 1 293 registros se muestra en la tabla 3.

Variable (%)	Mínimo	Máximo	Moda	Media	Mediana	Varianza	Desv.Est.	Coef. Var.
Ni	0.13	2.38	1.06	1.00	0.99	0.15	0.38	0.38
Fe	3.13	51.3	46.3	34.33	38.20	150.27	12.25	0.36
Co	0.002	0.38	0.103	0.09	0.089	0.002	0.05	0.58
SiO2	1.66	73.92	3.21	16.44	13.42	142.68	11.94	0.73
Mg	0.14	23.35	0.3	5.70	2.83	41.99	6.48	1.14
Al	0.243	14.47	4.47	4.28	4.32	3.88	1.97	0.46

Tabla 3. Estadígrafo de los pozos sobre las líneas de GPR.

En los estadígrafos de los pozos sobre las líneas de GPR al igual que en el sector, el comportamiento de la varianza del “Ni” se mantiene uniforme con una distribución normal, mientras que la varianza del “Fe” aumenta significativamente cuyo valor indica la aparente mezcla de poblaciones.

3.4 Clasificación de las menas

La clasificación de las menas presentes en los pozos se basó en los límites utilizados en la estimación de recursos, según los contenidos de níquel y hierro del reporte geológico de exploración para la elevación de categoría de recursos indicados a recursos medidos, (Urra Abraira et al., 2012). (ver tabla 4).

Tipos de Menas		
Mena 1	FF	(Ni < 0.70) y (Fe ≥ 35)
Mena 2	LB	(Ni ≥ 1) y (Fe ≥ 35)
Mena 3	SB_{AFe}	(Ni ≥ 1) y (25 ≤ Fe < 35)
Mena 4	LF	(0.7 ≤ Ni < 1) y (Fe ≥ 35)
Mena 5	RE	(Ni < 1) y (Fe < 12)
Mena 6	SF	(Ni < 1) y (12 ≤ Fe < 35)
Mena 7	SD	(Ni ≥ 1) y (Fe < 12)
Mena 8	SB_{BFe}	(Ni ≥ 1) y (12 ≤ Fe < 25)

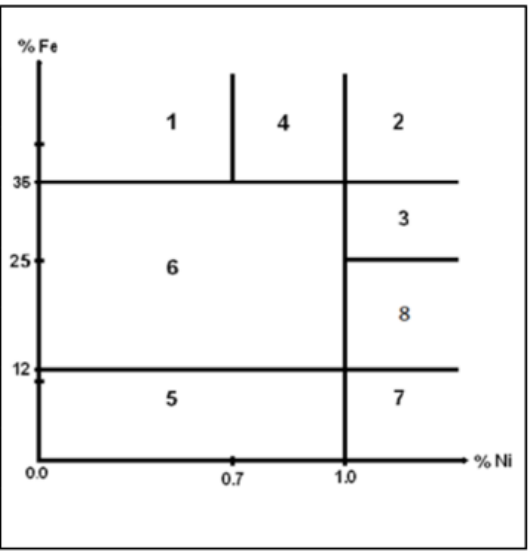


Tabla 4. *Clasificación por tipo de mena en función de los contenidos de Fe y Ni, según (Urra Abraira et al., 2012) en el informe de la exploración de Camarioca Sur.*

- (FF) Mena Ferrosa fuera de balance.
- (LF) Mena lateritica niquelífera fuera de balance.
- (LB) Mena lateritica niquelífera de balance.
- (SBAFe) Serpentinita de Balance de alto hierro.
- (RE) Roca estéril.
- (SF) Mena Serpentinítica Niquelífera de Fuera de Balance.
- (SD) Serpentinita dura.
- (SBBFe) Serpentinita de Balance de bajo hierro.

En la base de datos se determinaron los tipos de menas en cada registro de exploración. La mena LB representa el 41 % del sector y 11 % la mena SBAFe, siendo las menas de mayor interés para la producción de níquel y cobalto, (ver Figura 14).

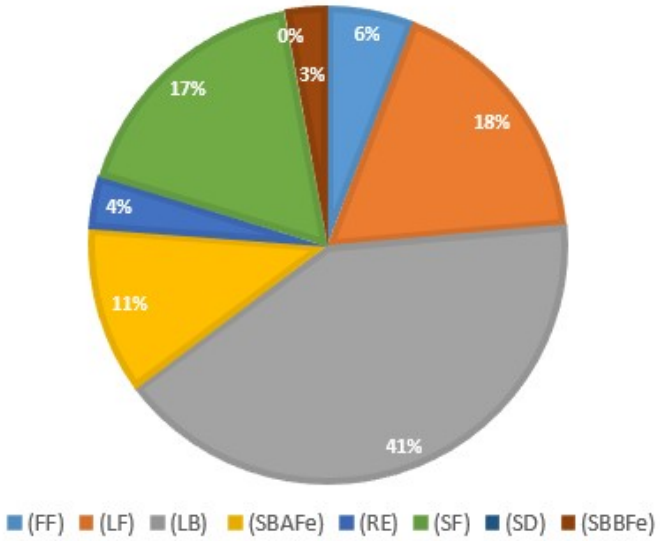


Figura 14. Distribución espacial de las menas presentes en el sector, en función del contenido de níquel y hierro.

La mena LF presenta una distribución significativa, alcanzando un 18 %, esta mena es utilizada en el proceso de extracción, siendo mezclada con las menas principales.

Los pozos localizados sobre las líneas de GPR presentan una ligera disminución de la representatividad de la mena LB y SBAFe en relación a los registros totales dentro del sector, disminuyendo solo en un 3 % para la mena LB y en un 2 % en la mena SBAFe, (ver Figura 15).

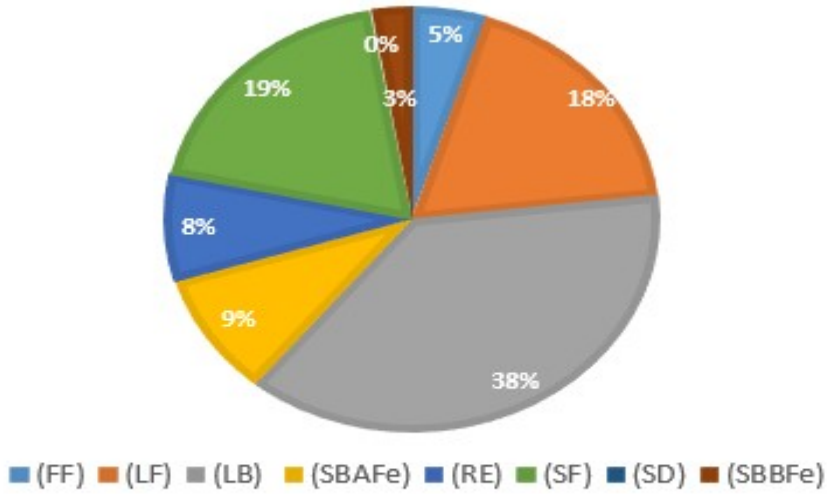


Figura 15. Distribución espacial de las menas presentes en los pozos sobre las líneas de GPR, en función del contenido de Ni y Fe.

En este caso se observa el predominio de mena LB en los datos de los pozos sobre las líneas de GPR con respecto a las otras menas.

3.5 Clasificación de los horizontes de la corteza

La clasificación o determinación de los horizontes se basó en los resultados de la interpretación de la geofísica de GPR, donde se determinó el techo de la saprolita y el fondo del basamento rocoso, a partir de la superficie topográfica. La ubicación espacial de los registros de cada pozo dentro de la corteza se determinó utilizando los contactos de la línea de saprolita y del basamento rocoso, agrupándolo en tres horizontes principales:

1. Horizonte limonítico.
2. Horizonte Saprolítico.
3. Basamento rocoso.

Según esta agrupación en horizontes se determinó que los registros de los pozos sobre las líneas de GPR presentan una mayor representatividad en el horizonte limonítico (71 %), el 26 % el horizonte saprolítico y los registros dentro del basamento rocoso el 3 %, (ver Figura 16).

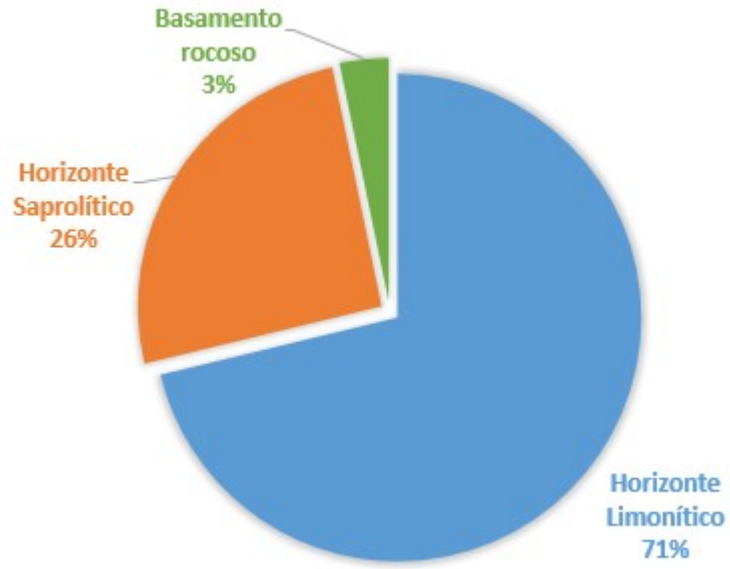


Figura 16. Distribución de los registros de perforación, según el tipo de horizonte.

Los resultados de clasificación de los registros, utilizando los tipos de horizontes, permitió determinar que el 25 % de los registros de la mena LB se localizan dentro del horizonte saprolítico y del basamento rocoso; siendo este último un 3 %.

El comportamiento de la distribución geoquímica de las variables en el sector tuvo un comportamiento estable, representando un perfil laterítico propio de las cortezas de meteorización de la región de Moa. (ver *Figura 17*).

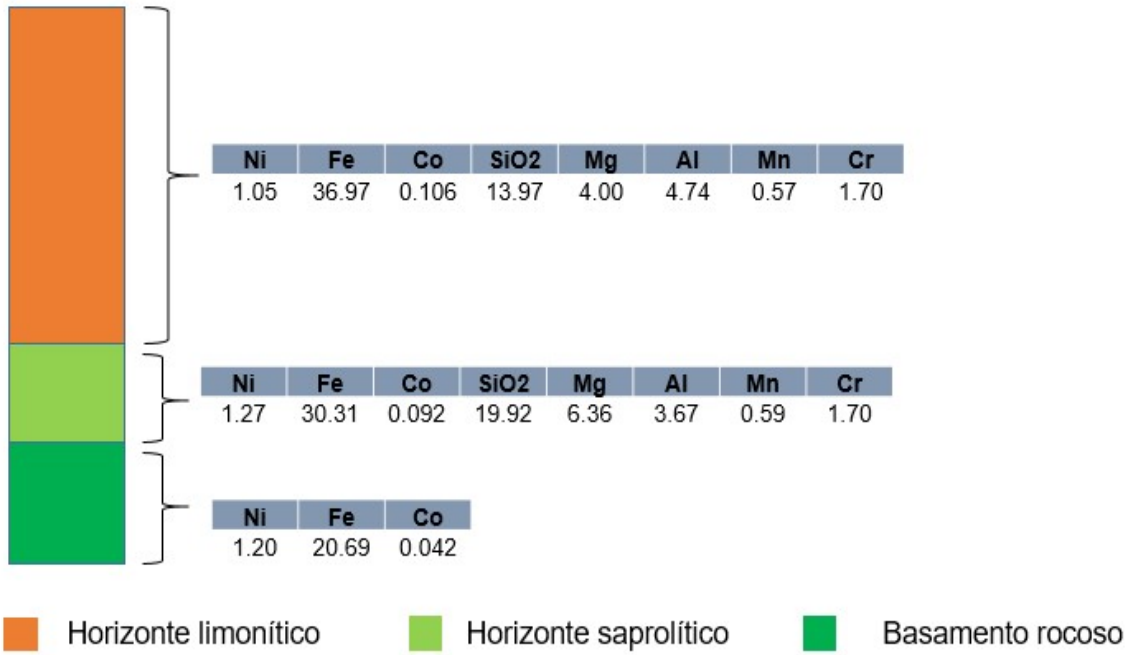


Figura 17. Composición química promedio por tipo de horizonte en el sector

La corteza laterítica en el yacimiento se caracteriza por ser heterogénea, predominan*do* los perfiles laterítico-saprolíticos; algunas áreas presenta*n un perfil de tipo laterítico* estructural siendo extremadamente escasos los perfiles lateríticos inestructurales. En la base de datos no existen determinaciones de los otros elementos para el basamento rocoso, (Sio_2, Mg, Al, Mn, Cr).

En los pozos perforados sobre las líneas de GPR en el sector se ubicaron 488 m de LB y 121 m de SBAFe los cuales se distribuyen en todos los horizontes. (ver Figura 18).

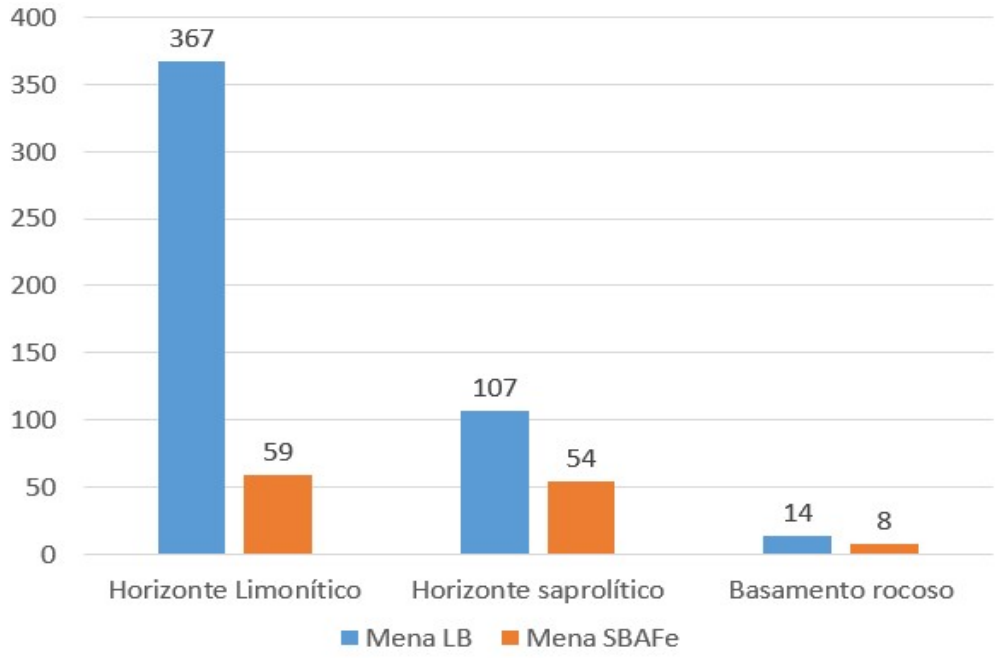


Figura 18. Distribución de las menas LB y SBAFe en los diferentes horizontes

En el gráfico se muestra que la distribución de la mena LB se localiza en mayor medida en el horizonte limonítico, siendo menos representativo en el horizonte saprolítico y en el basamento rocoso. En relación a la mena SBAFe se presenta una distribución regular en el horizonte limonítico y saprolítico, no así en el basamento rocoso.

En la tabla 5 se observa que la mena LB en los pozos sobre las líneas de GPR poseen una mayor presencia con respecto a las otras menas. (ver Tabla 5)

Horizonte	Tipo de Mena	Registro
Horizonte Limonítico	(FF)	62
	(LF)	219
	(LB)	367
	(SBAFe)	59
	(RE)	34
	(SF)	170
	(SD)	0
	(SBBFe)	10
Horizonte Saprolítico	(FF)	1
	(LF)	18
	(LB)	107
	(SBAFe)	54
	(RE)	60
	(SF)	68
	(SD)	2
	(SBBFe)	20
Basamento rocoso	(FF)	0
	(LF)	0
	(LB)	14
	(SBAFe)	8
	(RE)	11
	(SF)	5
	(SD)	0
	(SBBFe)	4

Tabla 5. Representatividad de las menas por tipo de horizonte laterítico, en los pozos sobre las líneas de GPR.

Los trabajos de perforación incluyeron pozos ordinarios, pozos criollos, pozos del basamento e hidrogeológicos, de los cuales se obtuvo la información para caracterizar litológica, mineralógica, hidrogeológica y químicamente las rocas del yacimiento y la corteza ferro niquelífera sobre ellas desarrollada. Toda la información obtenida por los métodos de perforación, en el cartografiado geológico, en los análisis químicos y mineralógicos está recogida en las bases datos.

3.6 Evaluación de los radargramas de la geofísica de GPR

El método geofísico de GPR ha mostrado potencial en la definición de los espesores de cortezas lateríticas, la presencia de fragmentos de rocas y la definición de la ubicación espacial del basamento rocoso.

La aplicación de este método en el yacimiento Camarioca Sur, ha permitido revelar la existencia de una corteza mezclada con fragmentos de rocas o bloques flotantes. La red de exploración utilizada en la investigación de estas cortezas no ha garantizado la caracterización de la variabilidad lateral a corta distancia de estos fragmentos de rocas, generando una inapropiada modelación geológica de los depósitos. Estos modelos carecen del pronóstico de ocurrencia de pináculos de roca mezclados con material limonítico, brindando una estimación de los recursos y reservas menos precisa, con una pobre evaluación del pronóstico de pérdidas, incidiendo en una inadecuada selección de los parámetros de explotación.

La aplicación del método geofísico de GPR y la interpretación geológica de sus resultados en los yacimientos lateríticos cubanos es insipiente, existiendo divergencia de opiniones en la efectividad durante las exploraciones geológicas.

La tendencia mundial es aplicar la combinación de los métodos de geofísica de GPR de bajo costo con redes de perforación para confirmar, entre otros aspectos, la continuidad de la mineralización. La relación entre densidad de las perforaciones, espaciado óptimo de líneas de geofísica de GPR y el costo de exploración aún están por definir, son aspectos que deben reflejarse en un equilibrio de costo beneficio.

Horizonte limonítico

En las ocho líneas de radargramas existentes en el sector, de forma general en el horizonte limonítico, se puede apreciar que algunos pozos no alcanzaron la profundidad total del perfil, quedando por encima del horizonte saprolítico. Al

parecer las perforaciones fueron detenidas por fragmentos de rocas flotantes, lo que brindó una menor perspectiva del potencial del yacimiento (ver *Figura 19*).

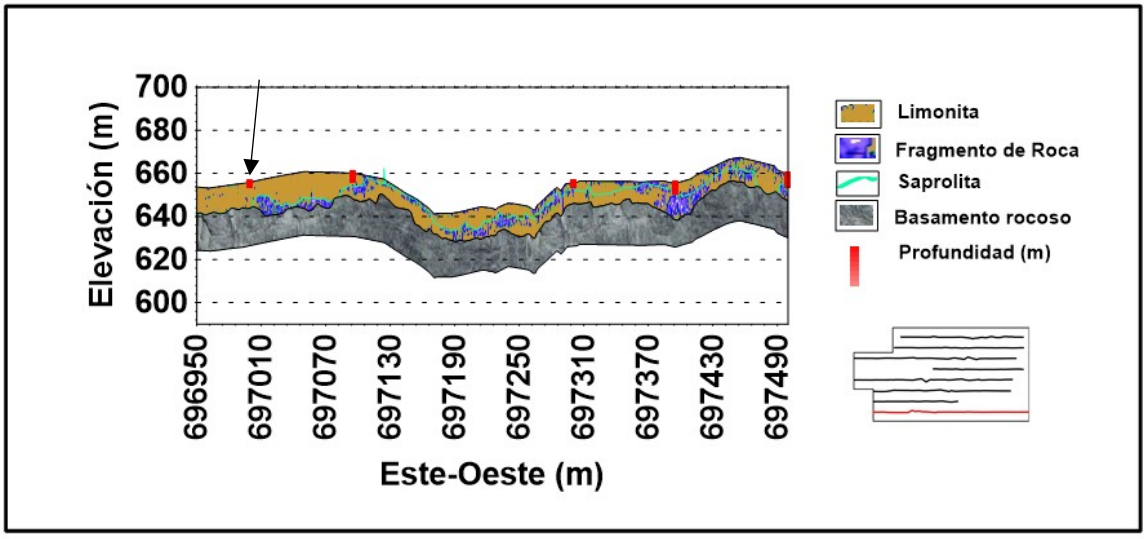


Figura 19. Ejemplo de pozo que no alcanzó la totalidad del horizonte limonítico, radargrama P-22A, Norte 210300

Las rocas dentro de este horizonte presentan un comportamiento irregular en el horizonte limonítico, no están orientadas hacia una dirección específica y se localizan a diferentes profundidades del horizonte.

La evaluación de los pozos en las líneas de GPR para el horizonte limonítico, en el sector estudiado permitió determinar que 25 pozos no alcanzaron la profundidad total del horizonte, dejando sin investigar aproximadamente 175 m; lo que representa el 14 % de los pozos ubicados sobre las líneas de GPR.

En la figura 20 se muestra la representatividad de los pozos, en los que se debe completar la perforación para lograr investigar la totalidad del horizonte limonítico. (ver Figura 20).

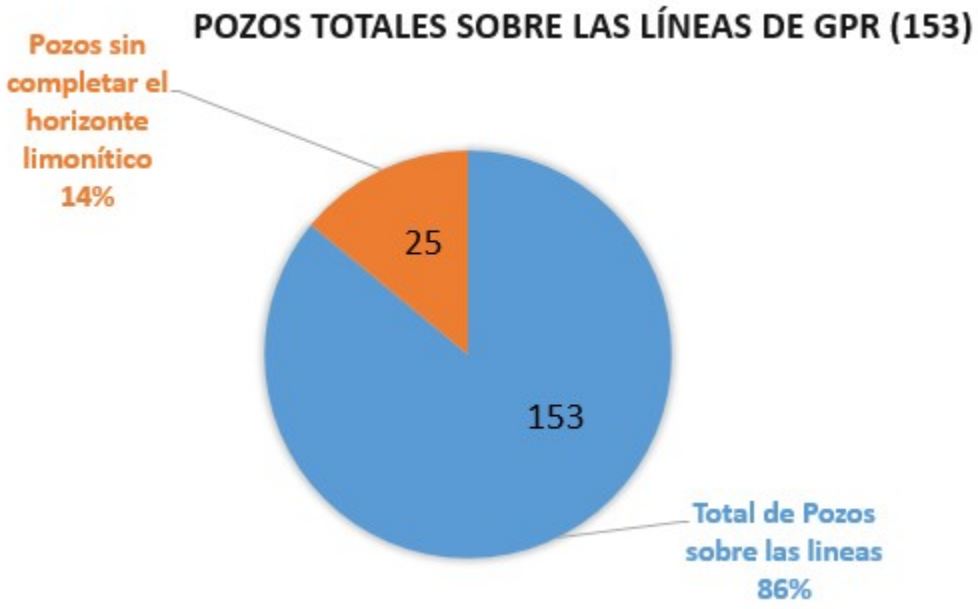


Figura 20. Representatividad de los pozos donde se debe completar la perforación del horizonte limonítico.

La distribución de los pozos sobre las líneas de GPR que no alcanzaron la totalidad del horizonte limonítico se muestra en la Figura 21.

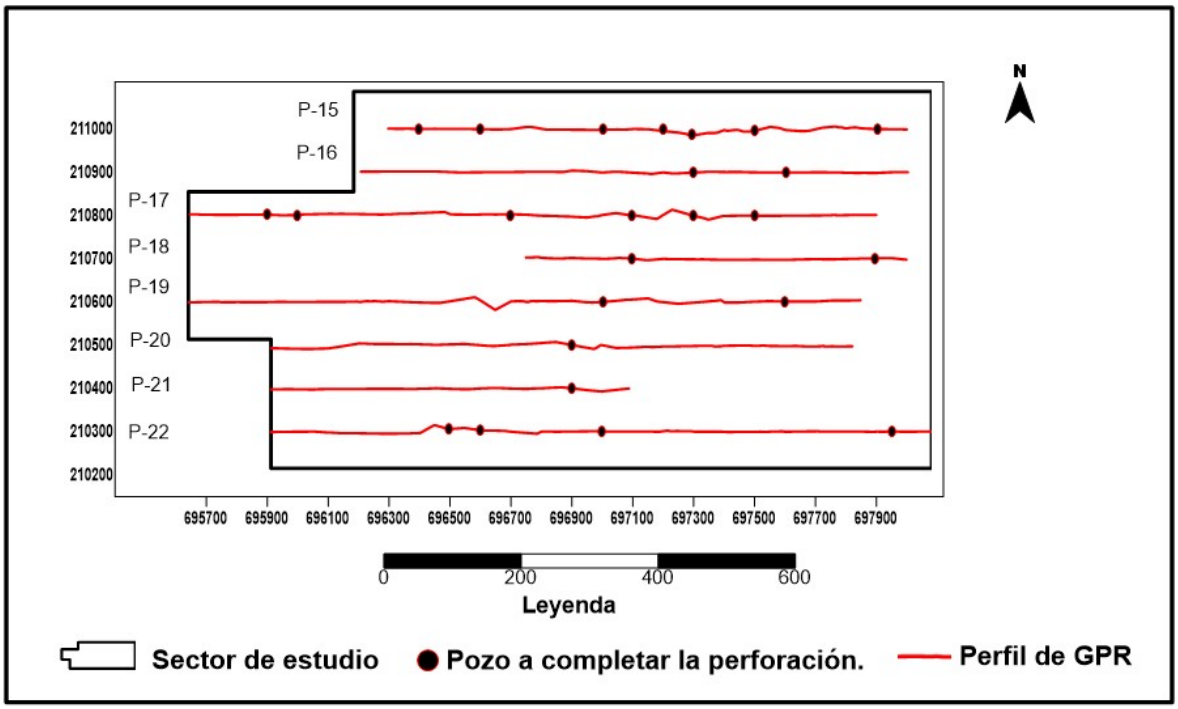


Figura 21. Distribución de los pozos a completar la perforación en el horizonte limonítico.

Horizonte de saprolítico

El horizonte saprolítico se caracteriza por una alta concentración de fragmentos de rocas, la interpretación geofísica del techo del horizonte saprolítico (línea de color verde) incluye debajo zonas que al parecer se corresponden con un horizonte limonítico.

El techo del horizonte saprolítico en algunos casos revela la presencia de una “capa” de rocas y debajo la presencia de un horizonte limonítico. Las mediciones realizadas en las líneas muestran que existen sectores que alcanzan hasta 8 m de espesor del horizonte limonítico debajo de esta “capa”, con longitud promedio de 7.35 m. (ver *Figura 22*). Esta zona no fue evaluada durante el análisis de la red de perforación.

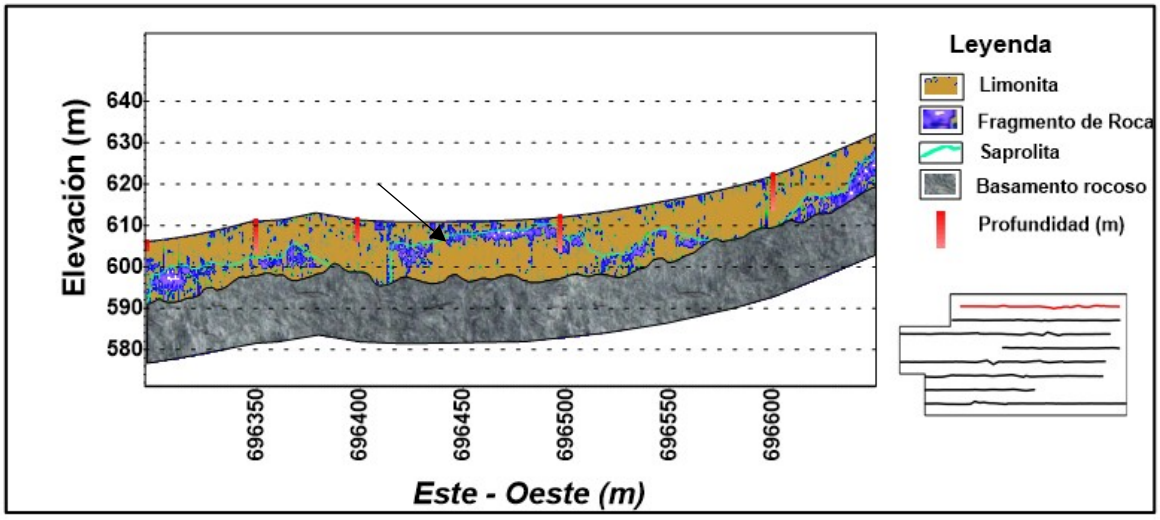


Figura 22. Ejemplo de horizonte limonítico no perforado bajo la capa de roca, radargrama P-15A Norte - 211000

En la zona señalada en la figura 20 se observa que debajo de los fragmentos de roca identificados por el GPR (color azul y blanco), en el techo de la saprolita se encuentran zonas correspondientes al horizonte limonítico.

En el sector sobre las líneas de GPR se realizaron mediciones en todos los radargramas, en las zonas donde se muestra el horizonte “limonítico potencial” debajo de la capa de rocas, dentro del horizonte saprolítico.

El espesor de la capa de fragmentos de rocas identificados en los radargramas, mide aproximadamente 2.8 m como promedio de todas las líneas. En el horizonte “limonítico potencial” existe un total de 132 m que deben ser evaluados, con un espesor promedio de 7.35 m; lo cual incrementa la perspectiva de potencia de corteza laterítica.

Las zonas con horizonte “limonítico potencial” fueron seleccionadas en cada línea de GPR, obteniéndose un mapa con la distribución espacial de estos sectores. Las principales zonas se localizan hacia el norte y sur del sector (ver Figura 23).

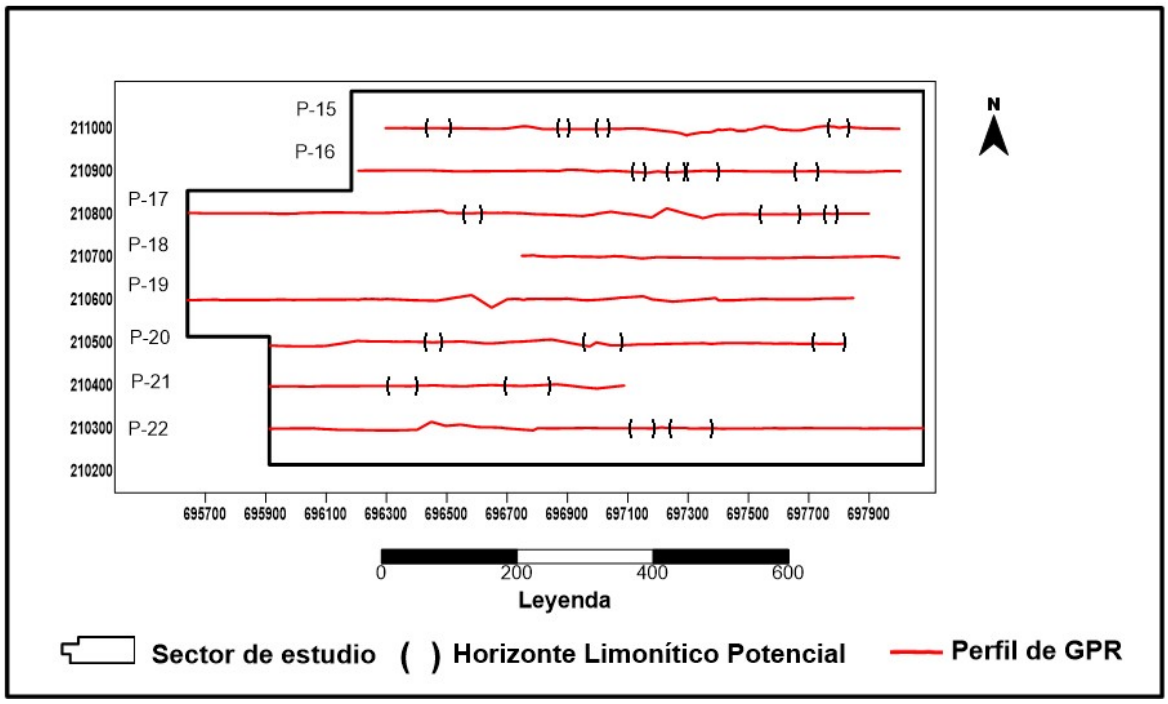


Figura 23. Distribución del horizonte limonítico potencial debajo de la capa de rocas

La confirmación de este horizonte “limonítico potencial” debe ser verificado mediante el método de perforación a columna, para garantizar la totalidad de investigación de la corteza laterítica.

Basamento rocoso

Los radargramas de GPR muestran la distribución espacial del basamento rocoso en cada línea de investigación. Las perforaciones ejecutadas durante la explotación geológica incluyen la caracterización de las rocas presentes mediante la toma de muestras dentro del basamento.

En este tipo de perforación se utiliza el método de perforación a columna. En los 153 pozos sobre las líneas de GPR, 32 pozos fueron perforados hasta el basamento, lo cual representa un 20.9 % del total de pozos. (ver *Figura 24*).

Figura 24. Representatividad de los pozos que alcanzaron el basamento rocoso

La mena LB en el basamento rocoso, no presenta una gran distribución o representatividad, solo en tres pozos fue identificada con un total de 14 m, representando solo el 3 % del total de la mena LB para los pozos sobre las líneas de GPR. Estos metros de LB se encuentran en contacto directo con el basamento rocoso, mostrando una ausencia del horizonte saprolítico, esto puede estar motivado por la posible génesis de redepósito del yacimiento. (ver *Figura 25*).

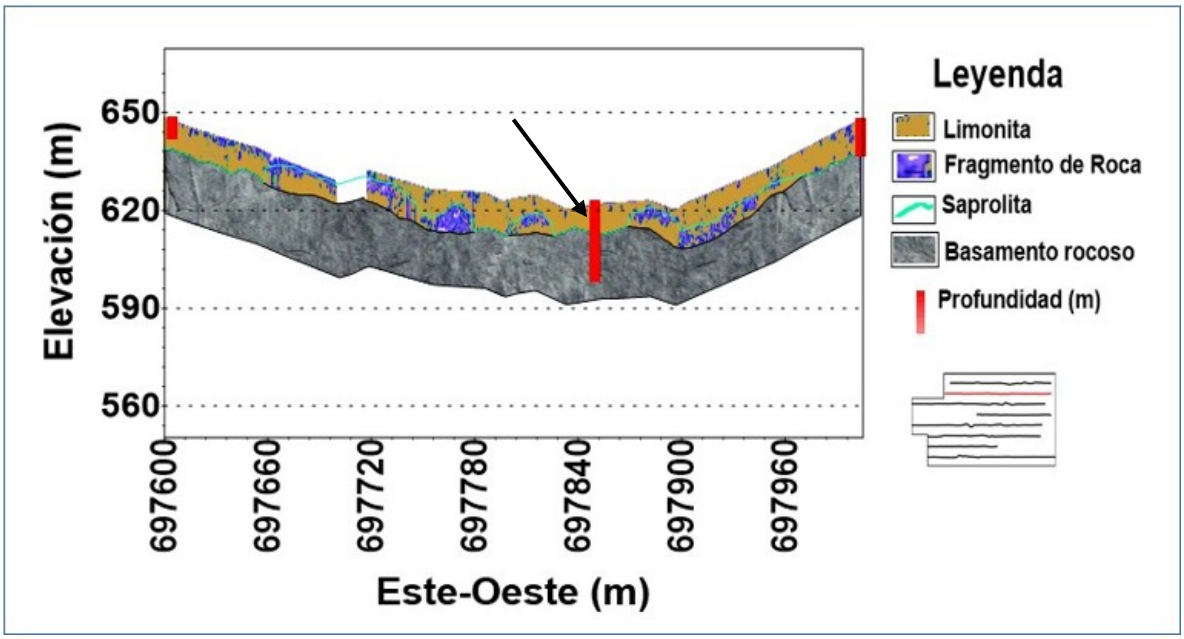


Figura 25. Ejemplo de pozo de basamento con muestra de LB, P-16A, Norte - 210900

En la estimación de los recursos de mena LB se debe realizar una diferenciación de los registros de esta mena en contacto con el basamento rocoso, las estimaciones pueden estar incorporando recursos que en la práctica no pueden ser explotados. La utilización de la interpretación del basamento rocoso a partir de la información brindada por la geofísica de GPR permite obtener un estudio general de la corteza de meteorización.

CONCLUSIONES

1- Los radargramas de GPR permitieron determinar que las perforaciones de la red de exploración no alcanzaron la totalidad de la potencia del horizonte limonítico en 25 pozos con potencia aproximada de 175 m debido a la presencia de grandes fragmentos de rocas flotantes.

2- Los resultados de la geofísica de GPR y los pozos de exploración muestran que el 22 % de los registros de la mena LB se localizan dentro del horizonte saprolítico y el 3 % en el basamento rocoso.

3- La confirmación del horizonte “limonítico potencial” debe ser realizada mediante la perforación a columna, para garantizar la total certeza de su presencia en la corteza laterítica.

4- La frecuente presencia de fragmentos de rocas en los yacimientos lateríticos afecta la exactitud de la estimación de las reservas geológicas utilizando solo la red de exploración.

RECOMENDACIONES

1. Extender la aplicación del método geofísico para la evaluación de las reservas geológicas del yacimiento Camarioca Sur.
2. Utilizar el método de perforación a columna para la evaluación del horizonte limonítico localizado debajo de los fragmentos de rocas.

Bibliografía

Acosta Breal, J., & Gentoiu, M. M. (2007). Prospección con georradar en los yacimientos lateríticos de Yagrumaje Sur. *II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*.

Acosta Breal, J., Gentoiu, M. M., & Lavaut Copa, W. (2005). Resultados de la utilización del georradar (GPR) en la evaluación de yacimientos lateríticos en Cuba Oriental. *I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*.

Bonomo, N., & De la Vega, M. *El Método de Georadar.* (Ph. D.).

David, M. (1977). Geostatistical Ore Reserve Estimation. *New York: Elsevier Scientific Publishing Company*.

Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). Geophysics for the Mineral Exploration.

Espín de Gea, A., Reyes Urquiza, M., & Gil Abellán, A. (2017). Los métodos geofísicos como herramienta de mejora para el conocimiento y aprovechamiento de los yacimientos de roca ornamental. *Boletín geológico yminero., 2*. doi: 10.21701/bolgeomin.128.2.006

Francké, J. C., & Geoph, P. (2006). Report to Moa Nickel S.A. on the Ground Penetrating Radar Survey Camarioca Norte and Camarioca Sur. South Brisbane, Australia: , GroundProbe.

Gentoiu, M. M., & Acosta Breal, J. (2014). Utilización de los datos de georradar en la estimación de recursos minerales con el empleo de la geoestadística, en yacimientos ferroniquelíferos. *Anuario de la Sociedad Cubana de Geología No.2*.

Iturralde Vinent, M. (1997). Sinopsis de la constitución y evolución geológica de Cuba, Inédito. Cuba.

Maceo Rustán, Y. (2018). *Modelación 3D de las rocas intercaladas en la corteza laterítica a partir de los radargramas de geofisica de GPR, en un sector del yacimiento Camarioca Norte.* (Ph. D.), Universidad de Moa.

Manteca Martínez, J. I. (1993). *De la modelización del yacimiento a la producción mineral diaria.* (Tesis Doctoral), Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

Martínez Vargas, A., & Pérez Martínez, Y. (2000). *Metodología para la modelación de yacimientos residuales de níquel* (Tesis de Diploma), Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba.

Muñoz Gómez, J. N., Rodríguez Infante, A., Martínez Vargas, A., & Vera Sardiñas, L. O. (2007). Caracterización de los dominios geológicos en las concesiones mineras Camarioca Norte y Camarioca Sur. Moa, Cuba: , Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Ocaña Levario, S. J. (2014). *Reconocimiento de patrones para la identificación de tuberías enterradas en sistemas de abastecimiento de agua a partir de imágenes de GPR.* (, Tesis de Maestría), Universidad Politécnica de valencia Valencia, España.

Urra Abraira, J. L. (2007). Recuperación de área abandonada en un yacimiento Laterítico de Ni y Co mediante la integración de la Geofísica de GPR y Exploración Geológica. *II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*.

Urra Abraira, J. L., Rodrguez Infante, A., & Muñoz Gómez, J. N. (2012). Informe de los trabajos de exploración detallada para la elevación de categoría de los recursos del yacimiento Camarioca Sur.