

DOMINIOS GEOLÓGICOS DEL YACIMIENTO LATERÍTICO DE PUNTA GORDA, MOA: DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

GEOLOGICAL DOMAINS AT PUNTA GORDA ORE DEPOSIT, MOA: DELIMITATION AND CHARACTERIZATION

LEÓN O. VERA SARDIÑAS

ANTONIO RODRÍGUEZ VEGA

JOSÉ MANUEL CORDOBÉS PEDRIANES

ARÍSTIDES ALEJANDRO LEGRÁ LOVAINA

Email: overa@ismm.edu.cu

Instituto Superior Minero Metalúrgico

Instituto Superior Minero Metalúrgico

Centro de Ingeniería y Tecnología de la Construcción

Instituto Superior Minero Metalúrgico

RESUMEN: El yacimiento Punta Gorda es un depósito residual de Ni, Co y Fe, asociado a una corteza de meteorización laterítica desarrollada sobre rocas ultrabásicas. No obstante a su aparente homogeneidad, se ha podido comprobar que las características de esta corteza varían espacialmente de modo significativo; se hace necesario entonces delimitar sectores o dominios con rasgos distintivos dentro del depósito. Mediante el empleo de una metodología basada en la modelación digital del terreno (Martínez y Pérez, 2000), se logró subdividir el depósito en siete dominios, atendiendo a determinadas características geomorfológicas, geológicas y geoquímicas propias. Se ofrece el mapa de dominios del yacimiento y se describen las características de cada uno de ellos.

Palabras clave: dominios geológicos, depósito residual, Ni, Co, corteza de meteorización.

ABSTRACT: Punta Gorda is a residual Ni, Co, Fe ore deposit, associated with a weathering crust developed on ultra basic rocks. Despite of its apparent homogeneity has been proved the characteristic of the crust differs spatially; thus it is necessary to delimited sectors or domains with distinctive features inside the deposit. Through a methodology based on terrain digital modelling the deposit was subdivided into 7 geological domains taking in account their own geomorphological, geological and geochemical characteristics. The domains map and the particular characteristics of each domain are given.

Key words: geological domains, residual ore deposit, weathering crust.

INTRODUCCIÓN

El yacimiento Punta Gorda es un típico depósito residual de Ni, Co y Fe, asociado a una corteza de meteorización desarrollada en forma de un potente manto, esencialmente laterítico (Smirnov, 1982), sobre un macizo de rocas ultrabásicas serpentinizadas. El yacimiento, de manera general se caracteriza por determinados parámetros geomorfológicos, geológicos y geoquímicos (tabla 1), los cuales se interrelacionan. Las características geomorfológicas de mayor influencia en el desarrollo y conservación de la corteza de meteorización laterítica, son el nivel hipsométrico, la pendiente y la rugosidad del relieve (Rodríguez Infante, 1998). Por otra parte, las particularidades geológicas y geoquímicas del depósito en gran medida han sido condicionadas por las características geomorfológicas antes citadas.

El conocimiento de las regularidades geológicas por dominios constituye una necesidad para la ejecución de un acertado pronóstico y para la planificación y control eficientes de la minería (Legrá, 1999).

Con independencia de la aparente homogeneidad de la corteza de meteorización, se ha podido comprobar que sus características físicas y geoquímicas varían espacialmente de forma significativa (Arderí, 1985), lo que conlleva la necesidad de delimitar aquellos sectores o dominios con rasgos distintivos dentro del marco general del depósito. Se define como dominio geológico a la unidad geodinámica que caracteriza las zonas de un yacimiento por propiedades litológicas, estructurales, geoquímicas, mineralógicas, geomorfológicas e hidrogeológicas, sustancialmente diferenciadas con respecto a otras zonas del propio yacimiento (Quintas, 1999; Bates and Jackson, 1987).

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar la heterogeneidad geológica del yacimiento Punta Gorda con el auxilio de técnicas de modelación digital del terreno y de análisis geológicos y geoquímicos, delimitando dominios relativamente homogéneos para facilitar la implementación de redes de exploración más racionales y garantizar una explotación eficiente de las reservas y recursos disponibles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Inicialmente, con apoyo en la información contenida en la base de datos del yacimiento Punta Gorda, así como en las observaciones de campo realizadas, se confeccionó el modelo digital del terreno, a partir del cual se elaboraron los mapas hipsométrico (Fig. 1), de pendiente (Fig. 2) y de rugosidad del relieve (Fig. 3). Se elaboraron también los mapas de contenido de Ni, Fe y Co, tanto para la potencia total de la corteza como para la capa útil del yacimiento (Figs. de la 4 a la 9), así como los mapas de distribución de potencias de toda la corteza (Fig. 10), de la capa útil (Fig. 11) y de la capa de escombro (Fig. 12).

A partir de la interpretación de estos mapas se delimitaron los dominios geológicos. En cada dominio y para cada parámetro estudiado se calcularon los estadígrafos siguientes: mínimo, máximo, media, desviación standard y coeficiente de variación. Para la generación de los mapas se utilizó el software SURFER, versión 7, excepto en el caso del mapa de rugosidad del relieve para el que se empleó el soft MORF GRD

CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO

Características geomorfológicas

El yacimiento Punta Gorda ocupa la divisoria de las aguas y la vertiente norte de una cadena de colinas con una orientación NE-SW situada dentro del macizo montañoso Moa-Baracoa. Dentro del yacimiento se distinguen varios niveles hipsométricos enmarcados entre 10 y 180 m. Los menores niveles se localizan hacia el límite norte del yacimiento y aumentan progresiva y suavemente hacia el límite sur. Las características geomorfológicas más significativas del yacimiento se muestran en la tabla 1.

Constituye una regularidad en este yacimiento el hecho de que valores bajos de rugosidad coinciden con valores bajos de pendiente, observándose una relación directa entre ambos parámetros, aunque en algunas áreas, fundamentalmente hacia la mitad norte del yacimiento, esta relación se invierte.

Características geológicas

En el yacimiento Punta Gorda se distinguen tres tipos de perfiles: *in situ*, mixto y redepositado (Delgado y Bozán, 1999); regularmente se sitúan hacia el sur los de primer tipo, hacia la porción central los mixtos y hacia el norte los redepositados. Estos últimos suelen guardar relación con paleoambientes marinos poco profundos, lagunares y palustres.

Se ha podido observar una marcada relación entre la potencia de la corteza, la pendiente, la rugosidad superficial y el nivel hipsométrico. Los sectores situados en niveles hipsométricos elevados presentan mayores potencias de la corteza y de su capa útil, y se pone de manifiesto una paulatina y regular disminución de estas en la medida en que se avanza hacia niveles hipsométricos más bajos. Hacia el extremo suroeste del yacimiento se conjugan niveles hipsométricos elevados y pendientes moderadamente altas, lo cual propicia una erosión

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL YACIMIENTO PUNTA GORDA

Geomorfológicas				
Parámetros	Mínimo	Máximo	Media	C.V. %
Características				
Pendiente (°)	0,00	58,50	5,19	54,03
Rugosidad superficial (%)	0,00	67,67	3,7	64,62
Geológicas				
Pot. total de corteza (m)	0,00	56,19	16,86	37,5
Pot. útil de la corteza (m)	0,00	34,29	8,92	52,24
Pot. de escombros (m)	0,00	28,26	5,20	69,67
Geoquímicas				
Cont. de Fe en corteza (%)	5,00	50,37	37,28	14,63
Cont. de Fe capa útil (%)	5,00	51,62	36,15	20,92
Cont. de Ni corteza (%)	0,2	2,14	0,994	23,38
Cont. de Ni capa útil (%)	0,2	3,23	1,294	21,55
Cont. de Co corteza (%)	0,01	0,32	0,08	31,63
Cont. de Co capa útil (%)	0,01	0,49	0,092	34,49

más intensa que provoca una notable reducción del espesor de la corteza.

Tocante a la rugosidad, vale decir que cuanto mayor es el valor del coeficiente de variación del relieve, tanto menor es la potencia de la corteza y de su capa útil. Aquellos sectores situados en los niveles hipsométricos más bajos y en los cuales los valores de pendiente son bajos y la rugosidad es alta, exhiben menores potencias tanto para la corteza como para la capa útil en relación con el resto del depósito. Es también característico de estos sectores una potencia de escombros mayor.

Generalmente en el yacimiento se observa una relación inversa entre potencia de escombros y nivel hipsométrico; así, hacia la parte central y norte del depósito aumentan en número y extensión los sectores de grandes espesores de escombros, mientras que hacia el sur predominan los espesores poco potentes; sin embargo, hay que decir que en esta zona aparecen también algunos sectores intercalados de pequeñas dimensiones que exhiben potencias grandes de escombros.

Es una regularidad tanto al norte como al sur, el hecho de que los sectores de grandes potencias de escombros presentan las más bajas pendientes.

En el yacimiento Punta Gorda la relación entre la potencia de la capa útil y de la corteza total es de 0,5 (Fonseca, 1986), entendiéndose como la primera aquella zona donde el contenido de Ni es mayor o igual a 0,9 % y el de Fe es superior o igual a 12 %.

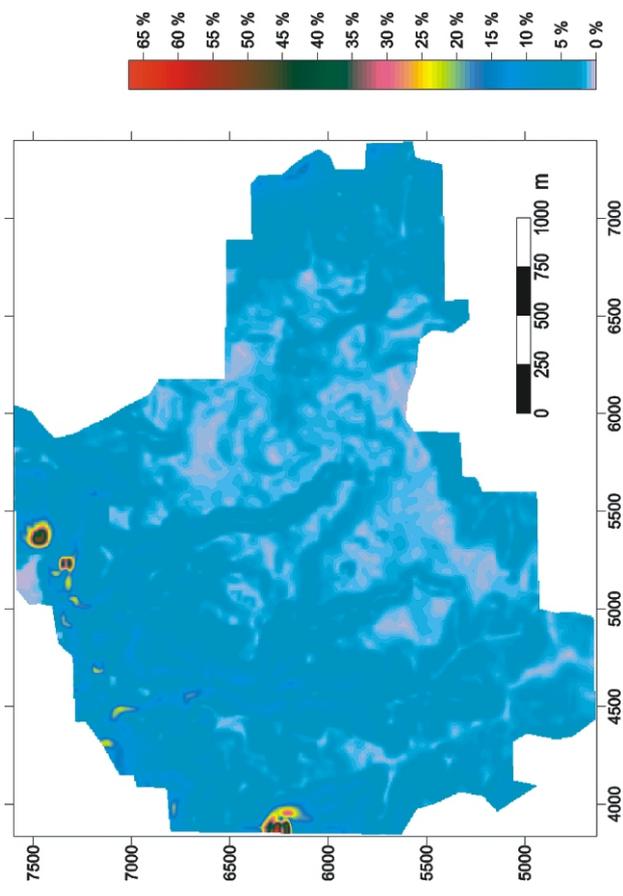


Fig. 3. Mapa de rugosidad superficial.

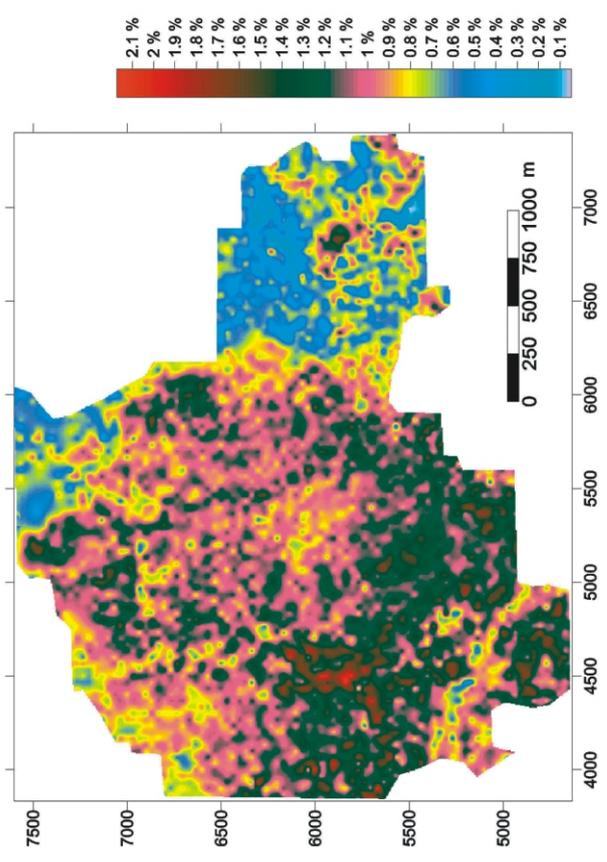


Fig. 4. Mapa de contenido de Ni en la corteza total.

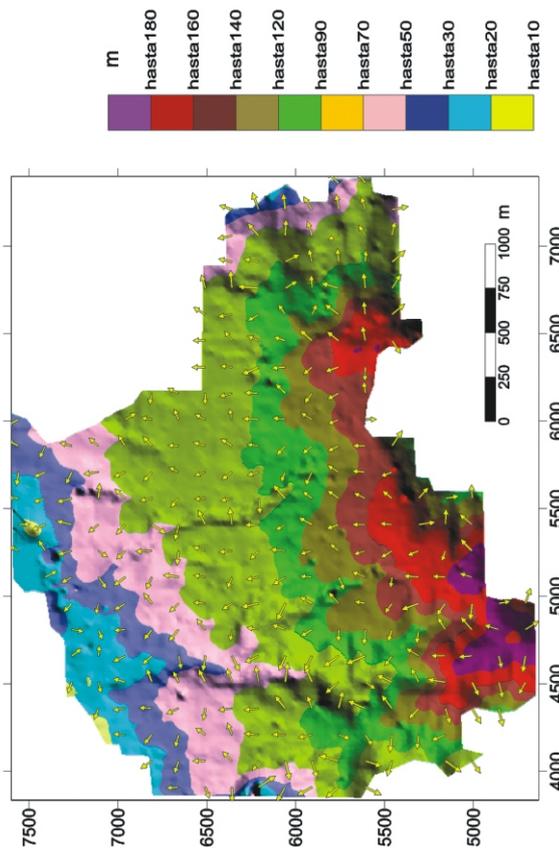


Fig. 1. Mapa hipsométrico con dirección del drenaje superficial.

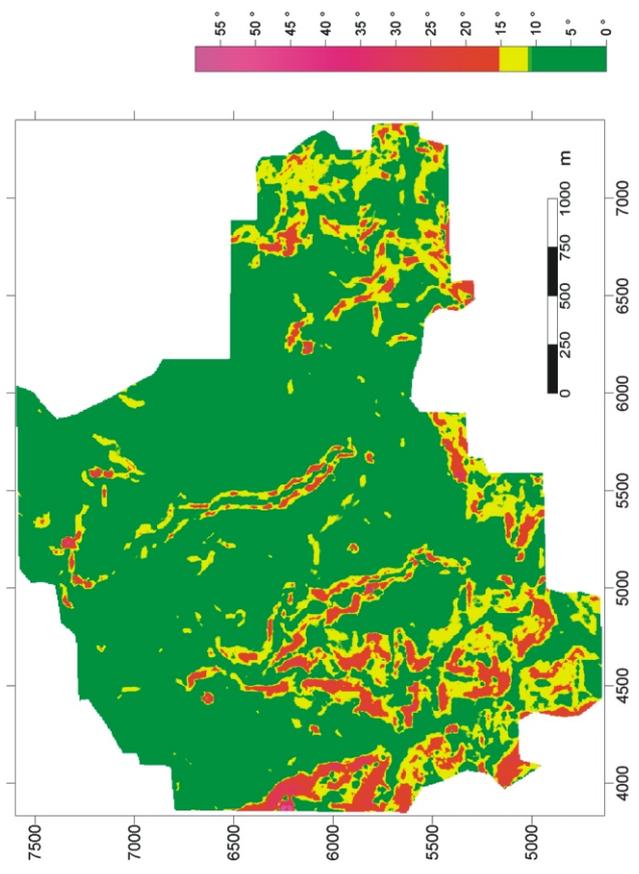


Fig. 2. Mapa de pendientes

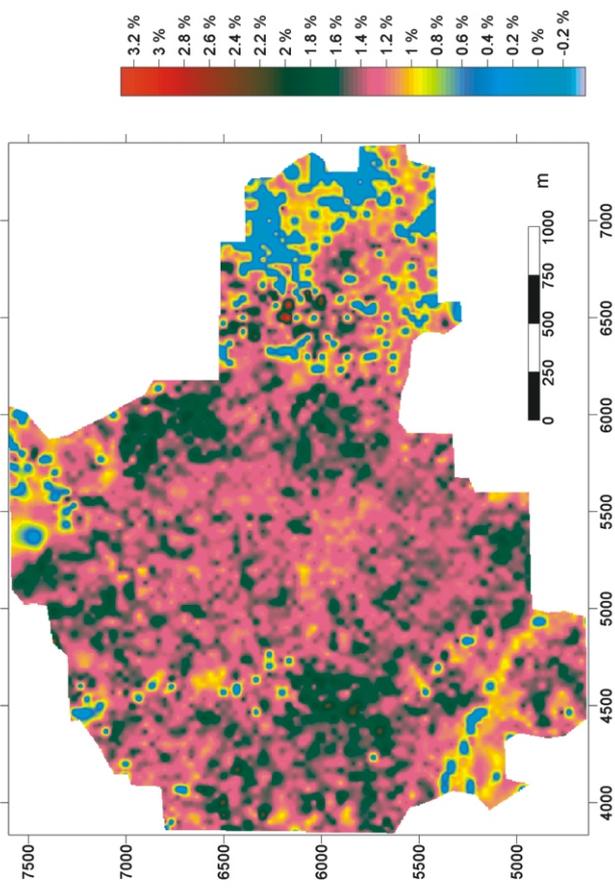


Fig. 7. Mapa de contenido de níquel en la capa útil.

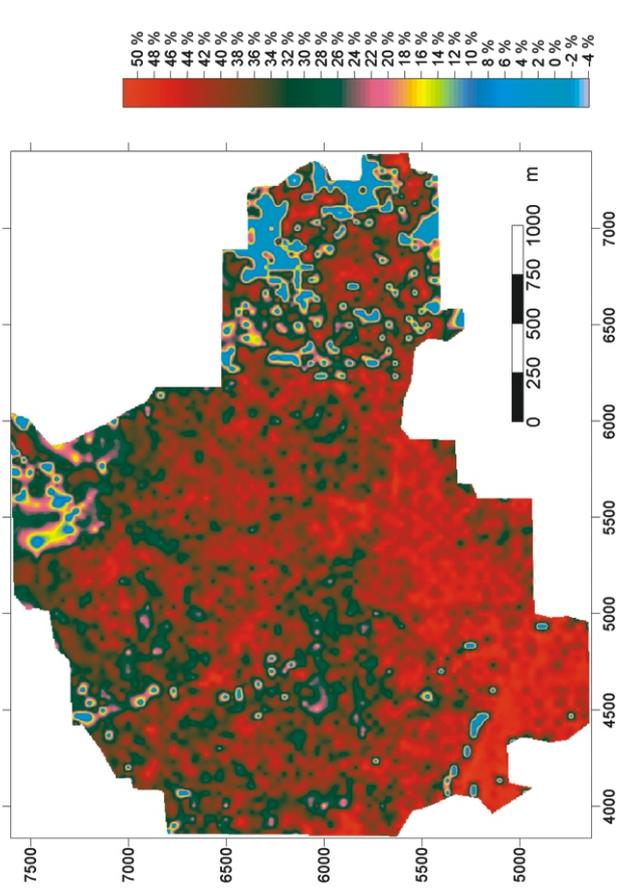


Fig. 8. Mapa de contenido de hierro en la capa útil.

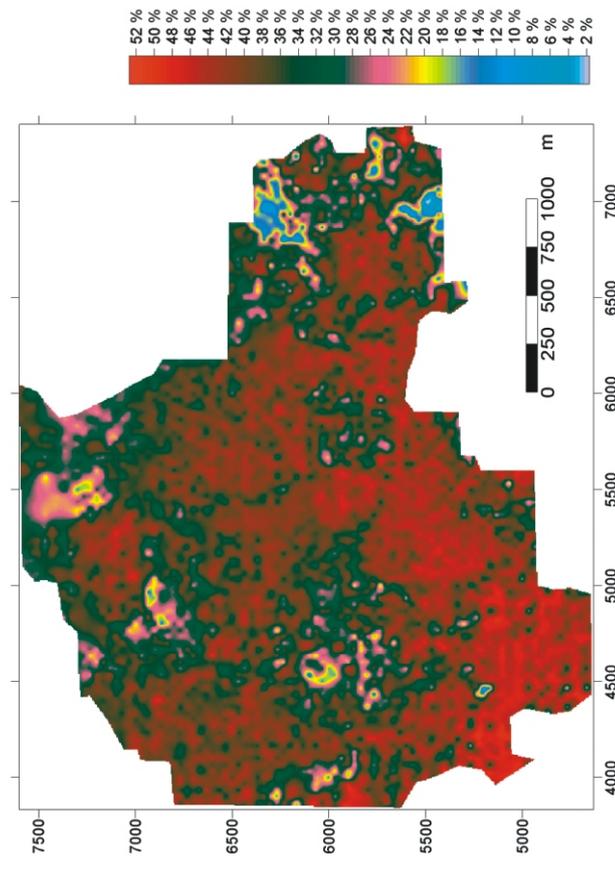


Fig. 5. Mapa de contenido de hierro en la corteza total.

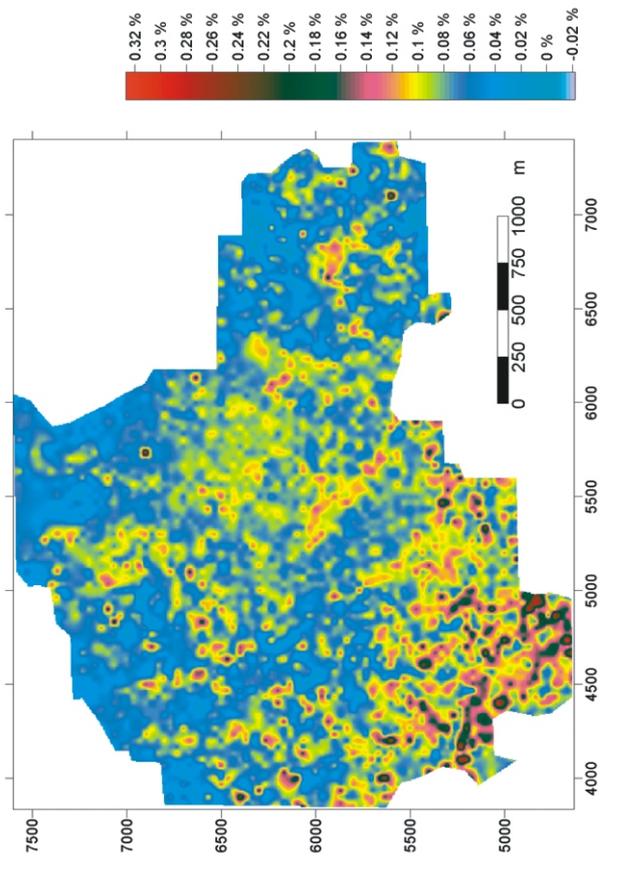


Fig. 6. Mapa de contenido de cobalto en la corteza total.

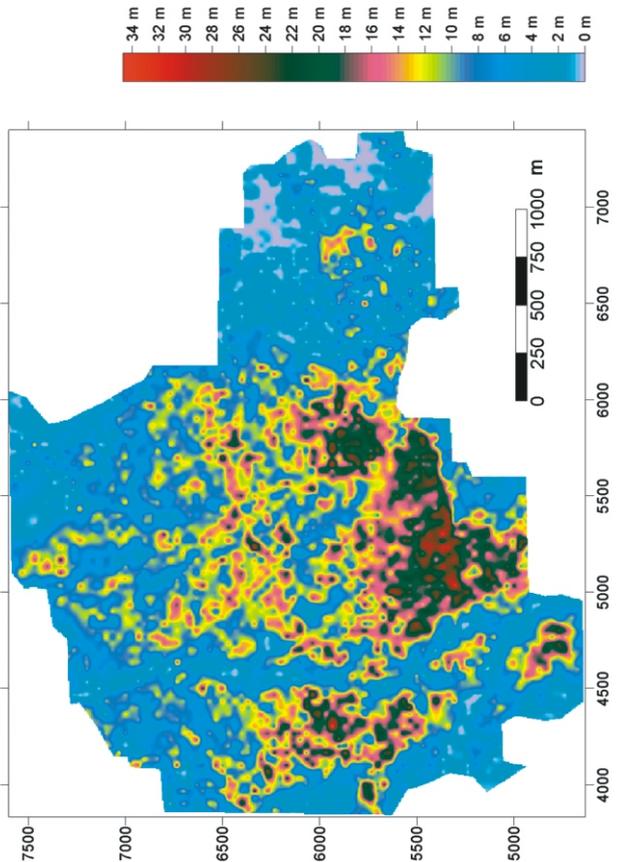


Fig. 9. Mapa de contenido de cobalto en la capa útil.

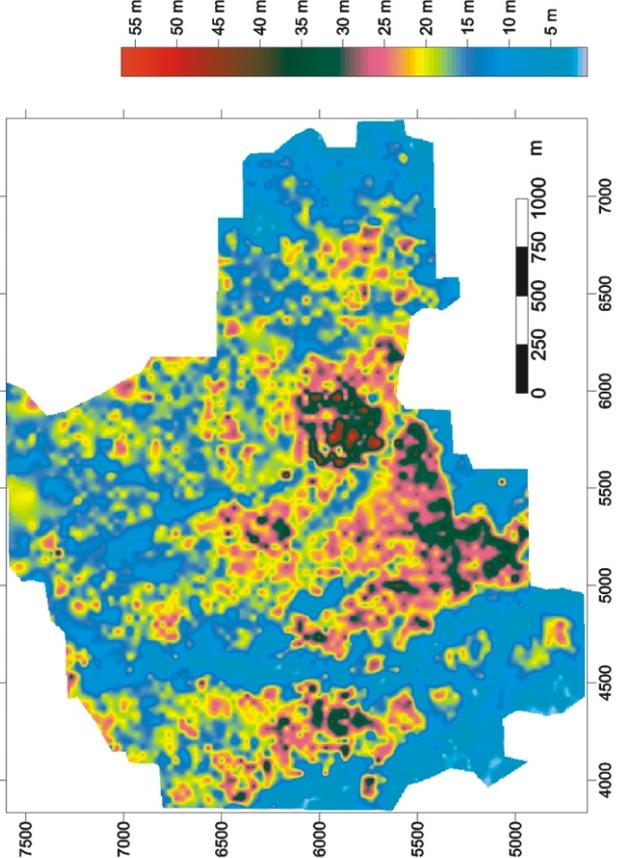


Fig. 10. Mapa de potencia de la corteza total.

Fig. 11. Mapa de potencia de la capa útil.

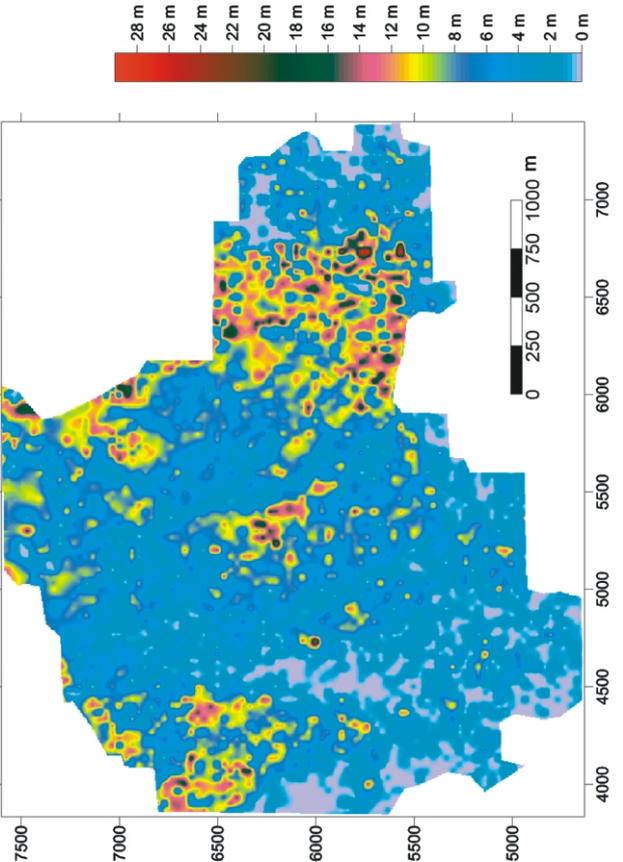


Fig. 12. Mapa de potencia de escombros.

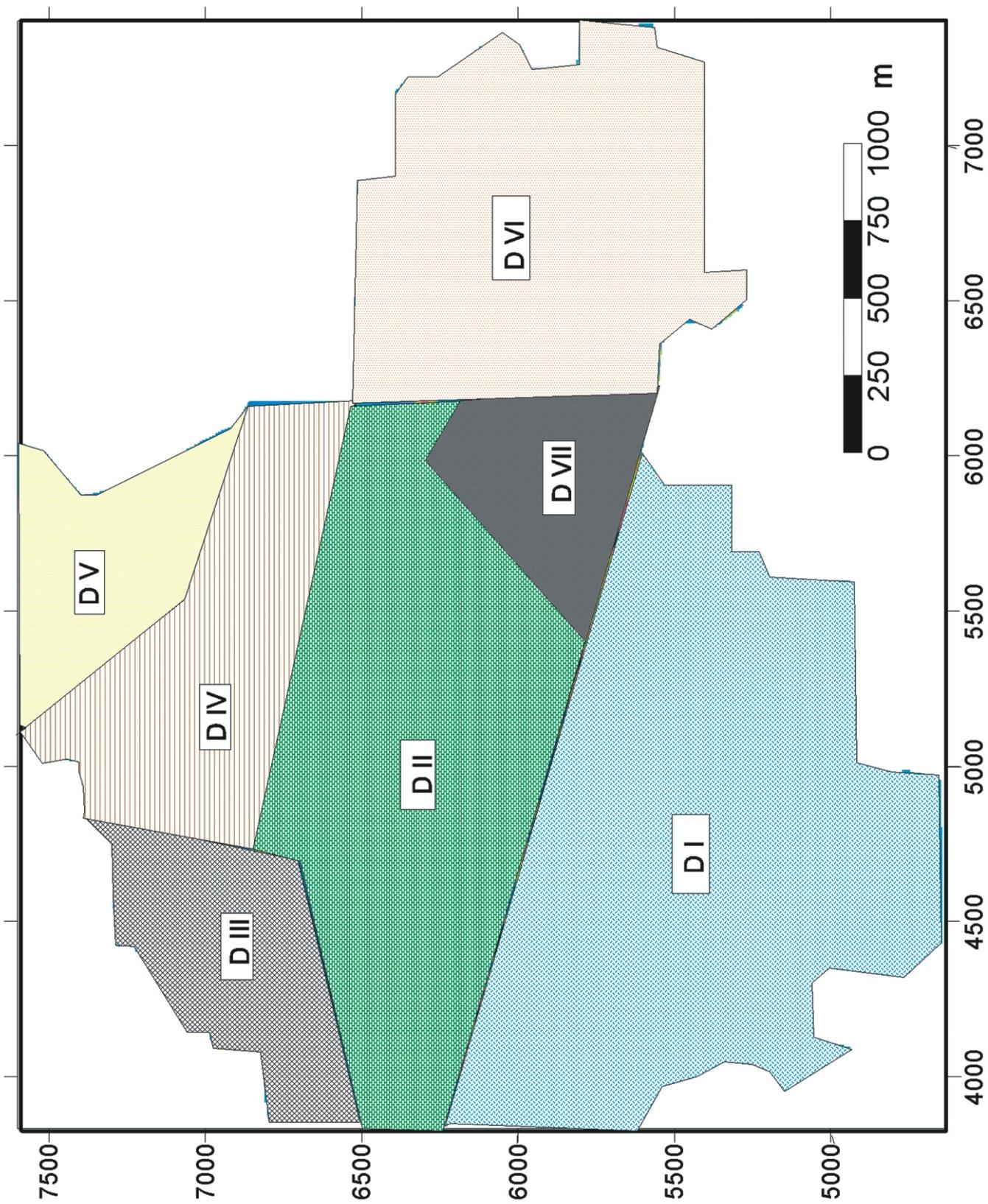


Fig. 13. Mapa de dominio total.

Aunque existe una relación directa y estrecha entre la potencia total de la corteza y la potencia de la capa útil, en el yacimiento se distinguen las situaciones particulares siguientes:

- Extensos sectores de gran potencia, homogéneamente distribuidos, en los que la potencia de capa útil es también grande, con excepción de pequeñas zonas o franjas de escasa potencia asociadas a los cauces fluviales donde la pendiente y la rugosidad son altas.
- Sectores de escasas potencias de corteza y de capa útil dentro de los cuales existen numerosos pequeños sectores de grandes potencias.
- Sectores de gran potencia de corteza en los que la potencia útil es muy pequeña y la capa de escombros grande, dentro de un fondo con potencia de corteza predominantemente pequeña.

La situación a) coincide con perfiles *in situ* completos, con ausencia de redeposición donde existe un potente horizonte superior poco o nada erosionado.

La situación b) se asocia a una corteza bien desarrollada con perfil *in situ*, cubierta por materiales redepositados donde, debido a la existencia de una alta rugosidad del relieve, tiene lugar una erosión desigual de la corteza en diferentes sectores.

La situación c) responde a una corteza de perfil *in situ*, de poco espesor, probablemente relicto de una corteza *in situ* muy erosionada, cubierta por espesores significativos de material laterítico redepositado.

La existencia de estas tres situaciones se vincula a que la corteza laterítica después de originada fue sometida a un proceso de erosión y desmembramiento asociado a los movimientos neotectónicos (Rodríguez Infante, 1998). Los sectores de más intensa erosión y desmembramiento y, por lo tanto, de menores potencias guardan relación estrecha con los máximos valores de pendiente y rugosidad del relieve, mientras que los más extensos y de elevada potencia coinciden con los más bajos valores de estos parámetros.

Cuando el nivel de erosión es poco profundo, sólo se afecta la capa de escombros quedando intacta la capa útil; en la medida que el nivel de erosión gana en profundidad, la capa útil es también afectada, y por consiguiente, el espesor de la corteza disminuye considerablemente respecto a las zonas donde la erosión es escasa o nula. Esta situación es muy común hacia la parte centro-oriental del yacimiento.

Características geoquímicas

La distribución de las concentraciones de Fe, Ni y Co en las cortezas lateríticas desarrolladas sobre rocas ultrabásicas, depende de numerosos factores, dentro de los que se destacan los siguientes: tipo de perfil y su potencia, profundidad del corte de erosión y su relación con los diferentes horizontes de la corteza y carácter zonal de la distribución de los elementos químicos en la corteza.

Para el yacimiento Punta Gorda se establecen las siguientes relaciones:

- Contenido de Ni en capa útil / Contenido de Ni en corteza total = 1,28
- Contenido de Fe en capa útil / Contenido de Fe en corteza total = 0,96
- Contenido de Co en capa útil / Contenido de Co en corteza total = 1,15

Los valores de los contenidos de Fe en la corteza total y en la capa útil del yacimiento Punta Gorda se muestran en la tabla 1. Atendiendo a la relación entre los contenidos de los elementos en la capa útil y en la corteza total, se puede decir que el Fe presenta una menor movilidad que el Ni y el Co. Los máximos contenidos de Fe en la corteza total para todo el yacimiento se asocian a los sectores con perfil *in situ*, tanto de elevadas potencias con perfiles completos, como de bajas potencias con perfiles parcialmente erosionados donde el nivel de erosión es poco profundo y sólo afecta el horizonte superior de la corteza *in situ*, es decir, la capa de escombros.

Vale aclarar que los sectores de mayor potencia presentes en el yacimiento, que además corresponden a perfiles *in situ*, exhiben bajos contenidos de Fe. Esto hace pensar en la existencia de una corteza muy bien desarrollada sobre la cual actuó una erosión muy intensa que eliminó en gran medida la capa de escombros. Esta idea se afianza por los bajos contenidos de Co y los altos de Ni en estos sectores.

En los sectores de perfiles mixtos el Fe presenta un comportamiento diferente en relación con la corteza de perfil *in situ*. Cuando en estos sectores la potencia es relativamente grande, los contenidos de Fe en la corteza son bajos de manera significativa, lo que expresa que la capa de laterita redepositada que recubre la corteza *in situ* se encuentra empobrecida de forma notable en este elemento. La disminución significativa de los contenidos de Fe en el horizonte superior de lateritas redepositadas, se debe a que el perfil de la corteza mixta se encuentra en un estado de desequilibrio, con condiciones que favorecen la disolución del Fe en los horizontes superiores y su migración en profundidad, fenómeno que no se manifiesta con la misma intensidad en las cortezas con perfiles *in situ* con un mayor estado de equilibrio (Formell y Oro, 1980).

Cuando en estos sectores el perfil de la corteza *in situ* está bien desarrollado, el contenido de Fe aumenta de forma significativa hacia la profundidad, mientras que en sectores con poco desarrollo del perfil *in situ* los contenidos de Fe disminuyen notablemente.

Los parámetros de la distribución de los contenidos de Co en la corteza total y en la capa útil del yacimiento Punta Gorda se pueden observar en la tabla 1. La movilidad del Co es relativamente elevada durante el proceso de formación de la corteza, superior a la del Fe, pero inferior a la del Ni.

En general la distribución del Co se comporta de manera parecida a la distribución del Fe, lo cual está en dependencia del tipo de corteza, de su potencia, de su grado de desarrollo y de la profundidad del corte de erosión. Los contenidos más elevados de Co alcanzan su mayor

distribución hacia el extremo sur-suroeste del depósito, que se caracteriza por la presencia de una corteza de perfil *in situ* bien desarrollada, donde se observan extensos sectores con los mayores valores de la potencia de la corteza y de su capa útil, dentro de sectores en los que el corte de erosión es más profundo y la potencia de la corteza disminuye de manera significativa. En esta zona la potencia de escombro es pequeña. Por lo general en ella los valores más elevados de Co guardan relación con los sectores de potencias relativamente pequeñas y erosionados de forma parcial, con una profundidad del corte de erosión moderada o pequeña. En los sectores donde el corte de erosión es más profundo, los contenidos de Co disminuyen significativamente. Esta relación entre la distribución del Co y la profundidad del corte de erosión, está en correspondencia con el carácter zonal de dicha distribución en la corteza; igual sucede con los restantes elementos, en particular Fe y Ni.

En la medida en que se avanza de sur a norte, los contenidos de Co, tanto en la corteza total como en su capa útil, disminuyen de manera significativa presentando valores inferiores a la media para todo el yacimiento.

Hacia la parte central del yacimiento se observan numerosos sectores pequeños y medianos con contenidos de Co ligeramente superiores a las medias de la corteza y de su capa útil, dentro de un fondo de valores inferiores a la media; mientras la parte norte y la oriental se caracterizan por un marcado predominio de los sectores con contenidos de Co inferiores a las medias de la corteza y su capa útil, rodeando sectores aislados pequeños y medianos con contenidos algo superiores a dichas medias, los cuales no superan el 30 % de la superficie de estas zonas. Esta disminución significativa de los contenidos de Co hacia las partes norte y oriental, está relacionada con las características del perfil de la corteza y la profundidad del corte de erosión. Los sectores con contenidos de Co superiores a la media se corresponden con una corteza mixta de perfil *in situ* bien desarrollado y suficientemente potente, cubierto por espesores significativos de materiales lateríticos redepositados; mientras que aquellos con contenidos inferiores a la media (bajos y muy bajos) coinciden con cortezas *in situ* poco desarrolladas o con un marcado predominio de los horizontes inferiores, así como con sectores profundamente erosionados.

Los contenidos de Ni en la corteza total y en la capa útil del yacimiento Punta Gorda se reflejan en la tabla 1. La relación Contenido de Ni en capa útil / Contenido de Ni en corteza total, expresa una mayor movilidad de este elemento respecto al Co y al Fe durante el proceso de formación de la corteza. En general, en las cortezas de meteorización lateríticas desarrolladas a partir de rocas ultrabásicas, la distribución del Ni guarda relación con la distribución del Fe y el Co; la misma es directa en unas ocasiones e inversa en otras. En el yacimiento Punta Gorda la distribución del Ni depende del tipo de corteza, de la potencia y grado de desarrollo de ésta y de la profundidad del corte de erosión. Los contenidos más altos de Ni

alcanzan su mayor distribución hacia el extremo sur – suroeste del depósito, donde los valores inferiores a los medios para la corteza y la capa útil ocupan pequeños y aislados sectores diseminados de forma homogénea. En esta zona los contenidos altos de Ni se asocian a los sectores de mayores potencias, y en ocasiones a sectores de potencias relativamente pequeñas erosionados de manera parcial o profunda. La relación entre el contenido de Ni y la profundidad del corte de erosión está en correspondencia con el carácter zonal de la corteza.

En la medida en que se avanza de sur a norte, los contenidos de Ni disminuyen significativamente en la corteza total, mientras que en la capa útil se observa una marcada tendencia a su aumento. Hacia la parte central y norte del depósito, el incremento de la potencia de los materiales lateríticos redepositados y en consecuencia el aumento de la potencia de la capa de escombro, provoca el empobrecimiento significativo de Ni en la corteza total, sin embargo el contenido de Ni en la capa útil no sufre variaciones notables.

Los más menores contenidos de Ni en el yacimiento se localizan en zonas situadas en los extremos noroeste, noreste y este del depósito, coincidiendo con los más bajos contenidos de Fe y Co. Es característico de las zonas con pobre contenido de Ni la existencia de grandes potencias de la capa de escombro, muy bajas potencias de la capa útil y una rugosidad elevada de manera relativa. En las zonas donde el corte de erosión es profundo de forma significativa, los contenidos de Ni alcanzan sus mínimos valores coincidiendo prácticamente con los valores de la rocas madres. En general en estas zonas se desarrolla una corteza mixta con un perfil *in situ* muy poco o nada desarrollado cubierto por una potencia grande de material laterítico redepositado.

Hacia el extremo suroeste del yacimiento se observa una alineación de sectores con orientación SE – NW donde concurren contenidos de Ni notablemente bajos, acompañados por valores bajos de los de Fe y Co, así como pequeños valores de potencia total de la corteza y de la capa útil, que no se asocian a cauces fluviales que hagan suponer la existencia de una falla reciente.

La interconexión de los factores geomorfológicos y geoquímicos se expresa en el hecho de que en los sectores que ocupan los niveles hipsométricos más bajos y presentan bajas pendientes y altas rugosidades, los contenidos medios de Fe y Co son ligeramente inferiores a los valores medios de la corteza y su capa útil para todo el depósito; en el caso del Ni ocurre algo similar, excepto para la capa útil donde su contenido es algo superior al valor medio de esta capa para todo el depósito. En estos sectores la potencia media de escombro supera a la media para todo el depósito en más de medio metro.

En los sectores en los que el nivel de erosión es poco profundo, los contenidos medios de Fe para la corteza y la capa útil toman valores ligeramente inferiores a sus análogos para todo el depósito; los contenidos medios de Co para la corteza y la capa útil son idénticos a los del depósito, mientras que los de Ni para toda la corteza y su

**TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO I
(ÁREA: 1,96 km²)**

Parámetros Características	Mín.	Máx.	Media	Desv. stand.	C.V. %
Potencia total	0,65	44,40	16,49	9,08	55,0
Potencia útil	0,13	34,7	12,19	5,24	42,0
Potencia de escombros	0,0	14,97	2,88	2,49	86,0
Contenido de Ni en la corteza total	0,36	2,17	1,19	0,2	17,0
Contenido de Ni en la capa útil	0,2	1,69	1,34	0,21	15,0
Contenido de Fe en la corteza total	8,04	49,98	40,11	5,85	14,0
Contenido de Fe en la capa útil	5,0	51,7	41,25	6,19	15,0
Contenido de Co en la corteza total	0,01	0,32	0,09	0,03	34,0
Contenido de Co en la capa útil	0,01	0,50	0,11	0,037	33,0
Hipsometría	12,77	183,5	117,5	31,8	27,0
Rugosidad superficial (c. var. del relieve)	0,17	48	2,81	2,41	85,0
Pendiente	0,03	54	10,2	5,11	50,0

capa útil son de manera significativa superiores a las medias para todo el depósito. Cuando el nivel de erosión se hace muy profundo, los contenidos medios de Ni, Fe y Co tienden a disminuir marcadamente con respecto a las medias para todo el depósito.

CARACTERIZACIÓN DE LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS

Dominio I

Ocupa los niveles hipsométricos más altos (Fig. 1) y es el mayor dominio del yacimiento (Fig. 13; tabla 2). Presenta un perfil *in situ* y agrupa los sectores más extensos y de mayores potencias de corteza total y de capa útil, los cuales muestran pendientes y rugosidades bajas que dan lugar al menor grado de desmembramiento para todo el depósito. Estos sectores están rodeados por otros también extensos, pero menos potentes, en los que el corte de erosión es más profundo, asociados a las pendientes más elevadas (superiores a 10 grados) y a las mayores rugosidades. Otras de las características distintivas de este dominio es presentar los más altos valores de Fe, Ni y Co del yacimiento, tanto para toda la corteza como para su capa útil. Los mayores contenidos de Co en este dominio se asocian a los sectores de baja potencia, al tiempo que tienden a disminuir hacia los sectores donde la corteza y su capa útil son más potentes. El Ni presenta

un comportamiento parecido al del Co, excepto cuando el nivel del corte de erosión es muy profundo, caso en el cual los contenidos de Ni se mantienen altos, mientras que los de Co disminuyen; lo mismo sucede con el Fe. Los contenidos más elevados de Fe se localizan en los sectores donde la corteza es potente y el nivel de erosión más bajo, y disminuyen de forma significativa en aquellos donde el nivel de erosión es muy profundo.

Otra característica distintiva de este dominio es su potencia de escombros marcadamente baja en relación con el resto del yacimiento, lo que está determinado por el carácter muy erosivo del relieve en este dominio.

Dominio II

Es el segundo dominio por su extensión (Fig. 13; tabla 3). Dentro de sus características distintivas se destacan la presencia de sectores con grandes y medianas potencias de la corteza y su capa útil, rodeados por pequeños sectores de bajas potencias de la corteza y su capa útil, resultado de un proceso erosivo más intenso, lo que contribuye a que en general posea un grado de desmembramiento de la corteza más elevado que el dominio I, determinando en gran medida el menor espesor de la corteza y su capa útil en este dominio en relación con el primero.

La distribución de las concentraciones de Fe, Ni y Co es mucho más heterogénea que en el dominio I. En este dominio predominan los sectores de baja pendiente, ubicados en niveles hipsométricos más bajos, lo que da lugar a un relieve con un carácter más acumulativo que erosivo, con una potencia de escombros significativamente alta. La rugosidad es algo más elevada que en el dominio antes descrito.

En este dominio la corteza es mixta, con un perfil *in situ* cubierto por una potencia no significativa de materiales lateríticos redepositados.

Dominio III

Es un dominio pequeño (Fig. 13; tabla 4) que ocupa los niveles hipsométricos más bajos del depósito, caracterizado por la presencia de sectores con altas potencias de la corteza de manera relativa, algo superiores a la potencia media del depósito, dentro de sectores de bajas potencias, con potencias bajas de la capa útil. En algunos sectores de este dominio la potencia de escombros es elevada de forma marcada. Toda la superficie del dominio se caracteriza por una pendiente baja y una rugosidad relativamente alta. Predomina el carácter acumulativo del relieve, determinando el desarrollo de una corteza mixta con un perfil *in situ* poco desarrollado.

En general los contenidos de Fe para toda la corteza y la capa útil se mantienen próximos a la media para el yacimiento, mientras que los de Ni en ambas capas son muy inferiores a la media del yacimiento, aunque los valores en la capa útil superan a los de la corteza total. Como regla, los contenidos de Co son muy inferiores a la media del depósito, tanto en la capa útil como en toda la corteza.

**TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO II
(ÁREA: 1,41 km²)**

Parámetros Características	Parámetros				
	Mín.	Máx.	Media	Desv. stand.	C.V. %
Potencia total	1,29	45,44	18,11	5,56	0,30
Potencia útil	0,0	32,82	10,31	3,58	0,35
Potencia de escombros	0,0	26,18	5,70	3,22	0,56
Contenido de Ni en la corteza total	0,53	2,05	1,05	0,15	0,14
Contenido de Ni en la capa útil	0,038	2,44	1,36	0,17	0,13
Contenido de Fe en la corteza total	9,99	49,35	38,02	4,49	0,12
Contenido de Fe en la capa útil	0,98	50,64	37,91	5,23	0,14
Contenido de Co en la corteza total	0,02	0,23	0,08	0,019	0,25
Contenido de Co en la capa útil	0,002	0,33	0,10	0,03	0,28
Hipsometría	5,54	124,46	67,38	21,65	0,32
Rugosidad superficial (coef. var. del relieve)	0,17	67,09	3,52	3,73	1,05
Pendiente	0,05	58,55	7,20	4,87	0,67

Dominio IV

Este dominio (Fig. 13; tabla 5) en general se caracteriza por un marcado predominio de los sectores con valores de las potencias de la corteza y su capa útil muy inferiores a las respectivas potencias medias en el depósito, aunque en pequeños sectores las potencias de la corteza y su capa útil son algo superiores a sus análogas para todo el yacimiento. En este dominio los sectores con potencias relativamente altas de la capa útil también presentan potencias de escombros altas y moderadamente altas. Las pendientes en el dominio son bajas de forma predominante, coincidiendo con sectores de baja rugosidad. Los contenidos de Fe Ni y Co presentan una distribución bastante heterogénea. Una de las principales características del dominio es la presencia de sectores extensos con contenidos de Ni altos, que en ocasiones llegan a muy altos, tanto en toda la corteza como en su capa útil. Estos sectores coinciden con potencias de la corteza y su capa útil superiores respecto a los valores medios del depósito.

Dentro del dominio, los contenidos de Fe en la corteza y su capa útil están ligeramente por debajo de la media. No se observa una correlación definida entre los valores de este elemento y los de Ni, toda vez que en ocasiones altos contenidos de níquel se asocian de forma indistinta a bajos o a altos contenidos de Fe y en otras bajos contenidos de Ni coinciden con bajos de Fe.

Este dominio se caracteriza, además, por la presencia de sectores más o menos extensos en los que los contenidos de Co son ligeramente superiores a sus valo-

**TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO III
(ÁREA: 0,438 km²)**

Parámetros Características	Parámetros				
	Mín.	Máx.	Media	Desv. stand.	C.V. %
Potencia total	2,44	31,81	15,91	4,27	0,27
Potencia útil	0,06	17,72	6,31	2,60	0,41
Potencia de escombros	0,03	18,53	6,19	3,18	0,51
Contenido de Ni en la corteza total	0,54	1,54	0,91	0,137	0,15
Contenido de Ni en la capa útil	0,01	2,35	1,28	0,25	0,19
Contenido de Fe en la corteza total	20,12	48,04	37,10	4,31	0,12
Contenido de Fe en la capa útil	0,26	50,48	33,41	7,14	0,21
Contenido de Co en la corteza total	0,02	0,17	0,06	0,02	0,30
Contenido de Co en la capa útil	0,00	0,25	0,08	0,03	0,40
Hipsometría	3,96	42,25	18,94	8,58	0,45
Rugosidad superficial (c. v. del relieve)	0,88	22,35	7,55	3,959	0,48
Pendiente	0,06	23,89	4,94	2,78	0,56

res medios para la corteza y su capa útil en el yacimiento, rodeados por sectores con contenidos algo inferiores a las medias, existiendo una estrecha y clara relación directa entre los contenidos de Co y los de Fe en todos los sectores.

La corteza es mixta. Sobre los horizontes inferiores enriquecidos en Ni de un perfil *in situ* bien desarrollado, se encuentra una capa potente de material laterítico redepositado que conforma una capa potente de escombros. Esto último constituye una de las principales características distintivas de este dominio.

Dominio V

Éste (Fig. 13; tabla 6) está constituido por grandes sectores con valores de potencia de corteza total próximos a la media del depósito o algo más elevados, donde la potencia de la capa útil suele ser pequeña mientras que la de escombros es grande. Estos sectores se encuentran rodeados por otros más pequeños de potencias bajas de corteza total y de capa útil. En este dominio concurren pendientes predominantemente bajas, alta rugosidad del relieve y bajos niveles hipsométricos. Los contenidos de Fe, Ni y Co son bajos tanto en la corteza como en su capa útil, sólo en pequeños sectores los contenidos de estos tres elementos suelen incrementarse hasta alcanzar valores próximos a las medias de la capa útil y de la corteza de todo el yacimiento.

Se trata de una corteza mixta con un perfil *in situ* muy poco desarrollado y de escasa potencia, cubierto por una capa relativamente potente de material laterítico redepositado, por consiguiente exhibe una capa útil muy

**TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO IV
(ÁREA: 0,69 km²)**

Parámetros Características	Mín.	Máx.	Media	Desv. stand.	C.V. %
Potencia total	5,26	36,07	15,86	3,36	0,21
Potencia útil	0,55	19,88	8,44	2,55	0,30
Potencia de escombros	0,00	15,76	5,62	2,65	0,47
Contenido de Ni en la corteza total	0,48	1,73	1,05	0,17	0,16
Contenido de Ni en la capa útil	0,06	2,44	1,46	0,18	0,12
Contenido de Fe en la corteza total	13,61	48,26	36,55	4,88	0,13
Contenido de Fe en la capa útil	1,81	48,40	36,82	4,94	0,13
Contenido de Co en la corteza total	0,01	0,29	0,07	0,02	0,26
Contenido de Co en la capa útil	0,003	0,45	0,09	0,03	0,31
Hipsometría	1,36	77,59	44,13	19,60	0,44
Rugosidad superficial (c. v. del relieve)	0,00	38,69	4,36	4,14	0,95
Pendiente	0,02	35,29	5,31	3,62	0,68

poco potente y una potencia de escombros grande de forma significativa, así como más bajos contenidos de Fe y Co que de Ni.

Dominio VI

Ocupa la tercera posición en cuanto a extensión (Fig. 13; tabla 7). En él se localizan las mayores pendientes del yacimiento. Hacia la mitad oriental del dominio, el relieve tiene un carácter erosivo más intenso producto de la combinación de valores de pendientes y rugosidades altos. Es característico de este dominio el marcado contraste de los niveles hipsométricos, éstos son muy elevados hacia el extremo suroccidental y alcanzan valores mínimos hacia el noreste y el este.

La mitad oriental del dominio está ocupada casi totalmente por sectores con potencias muy bajas de la corteza, mientras que hacia la mitad occidental, en particular hacia el extremo suroccidental, aparecen sectores extensos con potencias elevadas de forma moderada, por encima de la media del depósito. Otra de sus principales características distintivas de este dominio es el predominio casi absoluto de potencias bajas de la capa útil, pues sólo aparecen hacia su parte sur central algunos pequeños sectores donde la capa útil alcanza potencias algo más elevadas a la media del yacimiento. En general este dominio presenta una corteza muy desmembrada, por lo que se observa una alternancia de sectores de bajas y altas potencias de escombros; sin embargo, es en él donde se localizan los mayores espesores de escombros de todo el yacimiento.

La distribución de los contenidos de Fe, Ni y Co se

**TABLA 6. CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO V
(ÁREA: 0,38 km²)**

Parámetros Características	Mín.	Máx.	Media	Desv. stand.	C.V. %
Potencia total	6,13	29,06	16,39	3,28	0,20
Potencia útil	0,02	14,21	4,45	2,35	0,52
Potencia de escombros	0,00	20,64	7,47	3,29	0,44
Contenido de Ni en la corteza total	0,33	1,65	0,73	0,18	0,25
Contenido de Ni en la capa útil	0,03	2,09	1,14	0,33	0,29
Contenido de Fe en la corteza total	14,50	42,36	30,13	4,70	0,16
Contenido de Fe en la capa útil	0,35	45,38	25,79	8,35	0,32
Contenido de Co en la corteza total	0,03	0,14	0,06	0,01	0,26
Contenido de Co en la capa útil	0,00	0,21	0,06	0,03	0,41
Hipsometría	0,56	68,22	30,48	15,36	0,50
Rugosidad superficial (c. v. del relieve)	0,00	52,66	6,46	5,96	0,92
Pendiente	0,00	27,78	5,89	3,56	0,60

comporta muy irregular, pues oscila entre los valores medios, bajos y muy bajos. En él se reportan los menores contenidos de Fe dentro del yacimiento. Existe una correlación directa muy estrecha entre los contenidos de Fe y de Co.

En este dominio el Ni se distribuye irregularmente en la corteza total, pues hay sectores con contenidos muy bajos alrededor de sectores pequeños y medianos con contenidos próximos a la media del depósito. Sin embargo, en la capa útil el área de los sectores con altos valores de contenido medio se incrementa de forma significativa, aunque los sectores con contenidos muy bajos e inferiores a la media del yacimiento ocupan algo más de la mitad del área total del dominio. Se caracteriza por presentar una corteza mixta en la que predominan los sectores con un perfil *in situ* poco potente y desarrollado, cubierto por una capa algo gruesa de materiales lateríticos redepositados, con pequeños sectores de un perfil *in situ* relativamente potente y bien desarrollado.

Dominio VII

Es un dominio pequeño (Fig. 13; tabla 8). Se caracteriza, al igual que el dominio I, por grandes potencias de corteza y presenta unas de las mayores de todo el yacimiento. La potencia de la capa útil es también elevada hacia su parte centro-sur, rodeada por sectores de potencias más bajas. En general en este dominio predominan los sectores de corteza con contenidos de Fe inferiores o próximos a la media del depósito que encierran sectores muy pequeños con contenidos bajos. Este patrón se repite para la distribución del Fe en la capa útil. En correspondencia

**TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO VI
(ÁREA: 1,15 km²)**

Parámetros Características	Mín	Máx	Media	Desv. stand.	C.V. %
Potencia total	0,86	32,61	14,35	5,39	0,38
Potencia útil	0,0	18,15	3,4	3,01	0,75
Potencia de escombros	0,0	29,42	7,05	4,49	0,63
Contenido de Ni en la corteza total	0,05	1,69	0,64	0,20	0,32
Contenido de Ni en la capa útil	0,0	3,30	0,98	0,42	0,43
Contenido de Fe en la corteza total	1,70	50,42	33,84	8,09	0,23
Contenido de Fe en la capa útil	0,0	50,43	28,50	12,46	0,43
Contenido de Co en la corteza total	0,10	0,30	0,07	0,03	0,35
Contenido de Co en la capa útil	0,0	0,46	0,08	0,04	0,55
Hipsometría	15,75	159,24	90,14	32,61	0,36
Rugosidad superficial (c. v. del relieve)	0,08	36,56	9,14	4,3	0,47
Pendiente	0,86	32,61	14,35	5,39	0,38

con el Fe, en el dominio predominan los sectores con contenidos de Co bajos, que rodean a pequeños sectores con contenidos de Co superiores a la media de la corteza para todo el yacimiento, lo mismo sucede en la capa útil. Los sectores con contenidos elevados de Ni ocupan la mayor parte del dominio, rodean a sectores de contenidos medios, tanto de la corteza como de su capa útil. La potencia de escombros es en general baja, al igual que la pendiente y la rugosidad del relieve, asociado a niveles hipsométricos no muy elevados (90-140 m). Este dominio está constituido por una corteza potente de perfil *in situ*, con un desarrollo muy significativo de los horizontes inferiores más enriquecidos en Ni.

Cada dominio, además de las características aquí expuestas, posee condiciones industriales propias. El dominio con mejores condiciones desde el punto de vista industrial es el I, teniendo en cuenta su área, su alta relación potencia de la capa útil / potencia de escombros ($\gg 1$) y los altos contenidos de Ni y Co para toda la corteza y para su capa útil. Luego le siguen los dominios II, IV y VII, con una relación elevada (> 1) entre capa útil y escombros, los más altos contenidos de Ni y contenidos algo altos de Co; mientras que los dominios III, V y VI son los de más baja calidad industrial, muestran las anteriores relaciones próximas a 1 y mucho menor que 1, con bajos contenidos de Co y contenidos de Ni significativamente por debajo de la media del depósito.

CONCLUSIONES

1. Sobre la base del comportamiento de los parámetros geomorfológicos, geológicos y geoquímicos, el ya-

**TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO VII
(ÁREA: 0,32 km²)**

Parámetros Características	Mín.	Máx.	Media	Desv. stand.	C.V. %
Potencia total	7,69	56,66	26,41	7,58	0,28
Potencia útil	2,16	31,36	13,96	4,9	0,25
Potencia de escombros	0,12	20,19	7,77	3,25	0,41
Contenido de Ni en la corteza total	0,52	1,62	1,05	0,16	0,15
Contenido de Ni en la capa útil	0,98	2,19	1,44	0,16	0,11
Contenido de Fe en la corteza total	20,56	48,08	38,94	4,8	0,12
Contenido de Fe en la capa útil	21,56	50,37	39,18	4,5	0,12
Contenido de Co en la corteza total	0,02	0,157	0,08	0,02	0,20
Contenido de Co en la capa útil	0,04	0,24	0,1	0,02	0,24
Hipsometría	87,75	136,57	113,67	11,19	0,1
Rugosidad superficial (c. v. del relieve)	0,18	3,98	1,41	0,63	0,45
Pendiente	0,06	20,27	5,84	2,88	0,49

cimiento laterítico de Ni y Co Punta Gorda puede ser dividido en 7 dominios geológicos.

2. El dominio I presenta las mejores condiciones (alta relación capa útil/escombros, altos contenidos de Ni y Co) para su asimilación industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- ARDERÍ, G. A.: "Características de los Perfiles Típicos del Sector Central del Yacimiento Punta Gorda". Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín, 1985.
- BATES AND JACKSON: *Glossary of Geology*, Third Edition, American Geological Institute, Alexandria, Virginia, 1987.
- DELGADO, A. A. Y L. E. BOZÁN: "Características mineralógicas de perfiles de alteración laterítica en la mina Ernesto Che Guevara". Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín, 1999.
- FONSECA, E. J.: "Relación de los Espesores de los Horizontes Litológicos con los Factores de Intemperismo en las Cortezas Ferroniquelíferas en el Yacimiento Punta Gorda". Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín, 1986.
- FORMELL, F. Y A. ORO: "Sobre los procesos de redeposición del yacimiento Punta Gorda", *Ciencia de la Tierra y el Espacio*, 2 :42 – 51, 1980.
- LEGRÁ, A. A.: "Metodología para el pronóstico, planificación y control de la minería en yacimientos lateríticos". Tesis de Doctorado. Departamento de matemática, ISMM, Moa, 1999.
- MARTÍNEZ, A. Y Y. PÉREZ: "Metodología para la modelación de yacimientos residuales de Ni". Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, Holguín, 2000.
- QUINTAS, F.: Informe del Proyecto de Cartografiado Geológico de Pinares de Mayarí Oeste, 1999.
- RODRÍGUEZ INFANTE, A.: "Estudio Morfotectónico de Moa y Áreas Adyacentes para la evaluación de riesgos de Génesis tectónica". Tesis de Doctorado. ISMM, Moa, Holguín, 1998.
- SMIRNOV, V. I.: "Yacimientos de meteorización", en *Geología de yacimientos minerales*, pp. 385-433, Ed. Mir, Moscú, 1982.
- Surfer® Version 7, User Manual: Copyright © 1999. Golden Software, Inc.