
EL COMPLEJO REDOX. CONSIDERACIONES METODOLOGICAS, EMPÍRICAS Y TEÓRICAS.

COMPLEX REDOX. EMPIRICAL, THEORETICAL AND METHODOLOGICAL CONSIDERATIONS.

Manuel Pardo Echarte¹ & Osvaldo Rodríguez Morán²

1. Dr. Investigador Titular del Instituto de Geología y Paleontología (IGP), la Habana, Cuba

2. Dr. Investigador Titular del Centro de Investigaciones del Petróleo (Ceinpet), la Habana, Cuba

pardo@igp.gms.minbas.cu, ormoran@ceinpet.cupet.cu

Recibido para evaluación: 17 de Agosto de 2011 / Aceptación: 30 de Octubre de 2011 / Recibida versión final: 9 de Noviembre de 2011

RESUMEN

Una creciente necesidad de la prospección geológica y los estudios medio-ambientales y arqueológicos, lo constituye el incremento de la efectividad de las investigaciones convencionales y la reducción de los costos. Con estos propósitos se identifica el objetivo fundamental que es desarrollar las técnicas geoquímicas no convencionales de detección directa, empleadas con carácter complementario, dentro de las cuales se enmarca el **Complejo Redox**. Este procedimiento brinda información sobre las modificaciones del medio que tienen lugar en la parte superior del corte, ofrece las particularidades de composición, grado (ley), rasgos geométricos y de yacencia del mismo. Se da a conocer en este trabajo, una nueva tecnología de exploración geofísico-geoquímica no convencional para la detección directa, caracterización y evaluación de objetivos de naturaleza metálica, cuyo producto final consiste de un mapa con la cartografía de la proyección vertical del objetivo metálico; una sección central con su geometrización, acompañada del comportamiento de los atributos que la caracterizan; los parámetros que definen su naturaleza y calidad metálica y; una estimación de recursos. Esta innovación científico-tecnológica se encuentra en etapa de generalización de su aplicación en las diferentes esferas de aplicación.

PALABRAS CLAVE: Complejo redox, geoquímica, susceptibilidad magnética, reflectancia espectral, exploración.

ABSTRACT

A growing necessity of geologic prospecting and environmental and archaeological studies it constitutes the effectiveness increment of the conventional investigations and the reduction of the costs. With these purposes is identified the main objective, which is to development non-conventional geochemical techniques of direct detection, employees with complementary character, within which is framed the **Redox Complex**. This procedure offers information on the terrain modifications that take place in its superior part, over any metallic objective and gives information about its composition particularities, degree (law), geometric features and lying characteristics. In this paper, It is given to know a new technology of non conventional geophysics-geochemical exploration for the direct detection, characterization and evaluation of objectives of metallic nature whose final product consists of a map with the cartography of the metallic objective vertical projection; a central section with its geometrization, accompanied by the behavior of the attributes that characterize it; the parameters that define their nature and metallic quality and; an estimate of resources. This scientific-technological innovation is in stage of generalization of its application in the different application spheres.

KEY WORDS: Redox complex, geochemistry, magnetic susceptibility, spectral reflectance, exploration.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de elevar la efectividad geólogo-económica de los programas mínimos por métodos convencionales en la prospección geológica conlleva a su complementación con técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales como el **Complejo Redox** (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedogeoquímica), el cual brinda información sobre las modificaciones del medio que tienen lugar en la parte superior del corte, directamente sobre un objetivo metálico, en virtud del **Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos** hacia el suelo. Como regla, estas modificaciones están controladas por las particularidades de composición, grado, rasgos geométricos y de yacencia del objeto metálico, por lo que este complejo resulta particularmente efectivo en su localización, caracterización y evaluación, permitiendo la optimización de la toma de decisiones y la elevación de la tasa de éxito de la perforación y/o la excavación exploratoria.

Como antecede del presente trabajo está la investigación: “*Método de Medición del Potencial Redox en Suelos y su Aplicación Combinada con la Kappametría a los fines de la Prospección Geológica*” la cual fue objeto del Certificado de Autor de Invención No. 22 635, concedido por la Resolución No. 475/2000 de la OCPI y el Certificación de Depósito Legal Facultativo de Obras Protegidas (Registro: No. 1589-2005 de *Derecho de Autor*) para el **Sistema Redox**.

La presente investigación se plantea como propósitos: la ampliación del número de atributos a medir con el fin de mejorar la caracterización multiparamétrica de los objetivos metálicos y poder, de ese modo, ampliar las esferas de aplicación del complejo; establecer la metodología de las diferentes observaciones y su control de calidad; lograr, sobre base empírica, la formulación de las regularidades matemáticas que vinculan la respuesta anómala de los atributos medidos con las características de yacencia, composición y calidad aproximada de las fuentes metálicas, a fin de establecer el proceso de interpretación cuantitativa .

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Principio de la Migración Vertical de Iones Metálicos.

Las técnicas de extracción selectiva de elementos metálicos, vinculadas al *Principio de la Migración Vertical de Iones Metálicos*, han devenido populares en la exploración mineral desde la década de los 80 y 90, pudiendo citar como ejemplos, las técnicas CHIM (en ruso, Extracción Parcial de Metales) (Moon, et al. 1990) y MMI (Iones Metálicos Móviles) (Birell, 1996 y Mann, 1997).

En la técnica CHIM (Moon, et al. 1990), una serie de electrodos especiales metálico-selectivos se sitúan en la tierra en estaciones con un espaciamiento regular. Se pasa una corriente directa a través de cada electrodo, en paralelo, con la corriente de retorno pasando a través de un electrodo distante (en el infinito). Un electrolito en cada electrodo se muestrea periódicamente y se analiza en el campo para metales específicos de interés. La peculiaridad de este método es que el mismo selecciona y concentra iones metálicos móviles los cuales ocurren en concentraciones (en partes por billón [ppb]) por debajo de los límites analíticos de precisión (parte por millón [ppm]), disponibles para ese entonces. Como mecanismo de transporte de los “iones rápidos” el método considera algún tipo de fuente gaseosa o “geogas”.

En la técnica MMI (Birell, 1996) se mide, esencialmente, las sutiles concentraciones de iones metálicos débilmente adheridos a las superficies de las partículas del suelo, provenientes de una fuente de mineralización profunda o cubierta, utilizando la Espectroscopia de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICPMS). La popularidad de esta técnica deviene del hecho de que la extracción selectiva de elementos metálicos (iones desprendidos en solución por la acción de muy débiles digestores los cuales minimizan el ataque de los materiales de la matriz) provenientes de una fuente mineral significativamente profunda o cubierta por potentes depósitos exóticos, exhibe anomalías estrechas que se localizan sobre la proyección apical de la ocurrencia y presentan superior contraste anomalía/fondo que las

correspondientes a digestiones convencionales (donde digestores ácidos fuertes disuelven la mayor parte de la matriz química del suelo), cuyas anomalías, más amplias, envuelven a las primeras. Las condiciones en que se producen estas anomalías revelan una gran movilidad (rapidez) de los iones metálicos, de ahí, también, su denominación como iones metálicos móviles rápidos. En la técnica MMI (Mann, 2005), las observaciones empíricas sugieren que las anomalías se localizan, preferentemente, en un intervalo entre 10 y 25 cm debajo de la interfase del suelo (debajo de la capa orgánica), sin importar a cual horizonte corresponde esta profundidad, comprendiendo elementos contenidos en la mena que se localizan directamente sobre la fuente de mineralización. Experimentos de laboratorio sugieren que el ascenso capilar y la evaporación juegan un importante papel en la determinación de la posición de emplazamiento de los iones metálicos en el perfil del suelo: la zona de transpiración de raíces participa, también, en la deposición/adsorción del soluto dentro de la zona de evapo-transpiración. Los efectos de percolación de aguas de lluvia, así como las fuerzas ascendentes de naturaleza capilar, son considerados en un modelo el cual explica varios de los rasgos del emplazamiento de los iones metálicos en los suelos. El modelaje de laboratorio sugiere, también, que la convección, probablemente debida al calor producido por la oxidación de la ocurrencia mineral puede, en algunos casos, proporcionar un mecanismo para el ascenso rápido de los iones por debajo del nivel freático. Otra fuente alternativa de ascenso puede ser, iones metálicos transportados hidromórficamente a partir de los procesos de intemperismo. Las investigaciones sobre esta técnica se han enfocado, principalmente, hacia los mecanismos de formación de las anomalías (mecanismos de transporte y deposición de los iones metálicos), y son consideradas un ejercicio de ciencia fundamental.

La principal incertidumbre en las técnicas de Extracción Selectiva (Smee, 2003), es la falta de una sólida comprensión de los procesos de transporte geoquímico que pudiera conducir a patrones de elementos interpretables. Esta comprensión es crítica para producir resultados predictivos a partir de un objetivo mineralizado particular. Adicionalmente, sin este conocimiento no es posible seleccionar el método más apropiado de Extracción Selectiva para cada ambiente geológico y climático, o escoger el método de interpretación más revelador. Así, de acuerdo con Hamilton (2000), los procesos de transporte resultantes a partir del intemperismo químico de la mineralización involucra la dispersión de elementos bajo gradientes de uno u otro tipo, incluyendo, químico, de temperatura, piezométrico (ambos, gaseoso y acuoso) y electroquímicos. Estos mecanismos han sido invocados como componentes de los numerosos conceptos de transporte y dispersión que han sido utilizados por los investigadores para explicar las anomalías geoquímicas en suelos sobre la mineralización.

Los modelos usados pueden ser agrupados en aquellos que descansan en: 1) la difusión; 2) el transporte advectivo de aguas subterráneas; 3) el transporte gaseoso y; 4) el transporte electroquímico. Combinaciones de estos son, también, posibles. Según Kelley (2004), se incorpora a los tipos citados, además, el transporte facilitado por procesos biológicos. De los referidos mecanismos, uno de los más relevantes y concurridos, en especial, para explicar la dispersión en ambientes con una potente cubierta joven exótica (transportada), es el transporte electroquímico, del cual se considera su mecanismo primario. Éste se piensa que puede operar, también, en otros ambientes, pero su predominio como mecanismo de transporte es menos cierto. Aunque los modelos de transporte electroquímico presentados en la literatura entran algunas veces en conflicto, la mayoría están basados en el mismo principio: La conducción de electrones hacia arriba, a lo largo de la mineralización, a partir de áreas profundas químicamente más reducidas resulta en gradientes electroquímicos anómalos en la roca huésped circundante y en la cubierta sobreyacente; el movimiento de masa y carga en la forma de iones resulta en el desarrollo de anomalías geoquímicas en el recubrimiento. Por sus semejanzas con las posiciones empírico-teóricas del desarrollo del **Complejo Redox**, se describe brevemente, a continuación, la esencia del modelo electroquímico desarrollado por Hamilton (2000, 2004) En el momento de la deposición del recubrimiento (cubierta exótica), se establece un fuerte gradiente redox vertical justo encima del conductor (cuerpo mineral) reducido en la roca madre y la superficie oxidante, a lo largo del cual los iones tienen una tendencia a moverse.

El movimiento hacia el exterior de los iones reducidos tales como HS^- , Fe^{2+} , o S^{2-} , a costa del consumo de las especies iónicas oxidantes que van a su encuentro, las cuales están muy limitadas debajo de la zona freática, resulta en la migración hacia arriba de un frente de reducción a partir de la mineralización. Una vez que el frente alcanza el manto freático este proceso se interrumpe debido al predominio de los oxidantes y una columna reductora se habrá desarrollado en el recubrimiento saturado de aguas subterráneas sobre la mineralización. El referido gradiente en el Potencial Redox se postula como el

mecanismo conductor para la redistribución de los elementos en el recubrimiento, explicando el origen de las diversas anomalías geoquímicas observadas sobre la mineralización, así como una alternativa a la explicación de las "chimeneas reductoras" observadas sobre las ocurrencias de hidrocarburos. En opinión de Hamilton (2000, 2004), el estudio de los procesos electroquímicos que resultan en anomalías geoquímicas superficiales está aún en su infancia. Varios procesos y fenómenos geoquímicos aparentemente no relacionados que tienen lugar sobre los rasgos geológicos químicamente-reducidos se puede probar que están directa o indirectamente vinculados a los procesos electroquímicos. Aunque las técnicas electro-geoquímicas tienen un enorme potencial, aún tiene que hacerse una gran faena de trabajo adicional para lograr convertirlos en confiables y portadoras de datos fácilmente interpretables. Es por eso que, aunque cientos de trabajos se han publicado sobre la aplicación del Potencial Espontáneo para la exploración de diversos objetivos metálicos, solo muy pocos se han dedicado a estudiar las variaciones del Potencial Redox, entre otras cosas, además, por los problemas inherentes a la medición en condiciones superficiales, la cual, además de ser complicada, confronta problemas de irrepetibilidad.

El **Complejo Redox** no es, por cierto, una excepción de las conclusiones señaladas para las técnicas electro-geoquímicas de exploración. No obstante, cualesquiera que sean los mecanismos de transporte que operen, la regularidad en la relación funcional del Potencial Redox y de la concentración superficial de elementos químicos provenientes de la fuente, con la profundidad y características de la misma, parece corresponder, según observaciones empíricas de Pardo (2004), a un modelo exponencial, en lugar de a un modelo logarítmico, tal y como debería esperarse si el proceso estuviese gobernado solo bajo los principios de la difusión.

2.2. Posibilidades y limitaciones del **Complejo Redox** en las diferentes esferas de aplicación.

Aunque las aplicaciones disponibles son aún, estadísticamente, insuficientes como basamento experimental de las regularidades empíricas formuladas matemáticamente, no obstante, ellas permiten, *a priori*, el establecimiento de un conjunto de posibilidades y limitaciones del **Complejo Redox** para cada esfera de aplicación. Esto puede apreciarse en el resumen de la Tabla I.

Tabla I. Resumen del establecimiento, *a priori*, de un conjunto de posibilidades y limitaciones del **Complejo Redox** para cada esfera de aplicación.

Esferas de aplicación	Posibilidades	Limitaciones
Exploración de Hidrocarburos	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Reconocimiento y cartografía detallada de la proyección vertical de la ocurrencia y estimación, de manera indirecta y aproximada, de la calidad del hidrocarburo. <input type="checkbox"/> Determinación aproximada de la profundidad de la ocurrencia y del posible tipo de trampa estructural. <input type="checkbox"/> Estimación volumétrica aproximada de la ocurrencia a partir de los resultados del reconocimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Existencia de varios niveles de hidrocarburos superpuestos (incluye casquetes de gas). <input type="checkbox"/> Falta de sello o el mismo está muy fracturado. <input type="checkbox"/> Presencia de zonas reductoras superficiales de diversa naturaleza. <input type="checkbox"/> Predominio de la respuesta litológica de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral. <input type="checkbox"/> Existencia de una cobertura transportada reciente (menor de 10 años).
Exploración de minerales metálicos	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Reconocimiento y cartografía detallada de la proyección vertical de la ocurrencia. Estimación, de forma aproximada, de su composición y calidad de la misma. <input type="checkbox"/> Determinación aproximada de la profundidad, buzamiento y extensión vertical del cuerpo mineral principal. <input type="checkbox"/> Estimación aproximada de recursos. <input type="checkbox"/> Evaluación de la presencia de mineralización primaria debajo de una zona de oxidación o una escombrera. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Existencia de cuerpos minerales primarios superpuestos. <input type="checkbox"/> Presencia de zonas reductoras superficiales de diversa naturaleza. <input type="checkbox"/> Predominio de la respuesta litológica de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral. <input type="checkbox"/> Existencia de una cobertura transportada reciente (menor de 10 años).
Estudios medio-ambientales	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Reconocimiento y cartografía detallada de la zona contaminada, permitiendo establecer su naturaleza (superficial o subsuperficial) y grado. <input type="checkbox"/> Determinación aproximada de la profundidad de la fuente contaminante subsuperficial. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Presencia de zonas reductoras u oxidantes superficiales de diversa naturaleza. <input type="checkbox"/> Predominio de la respuesta litológica de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral. <input type="checkbox"/> Presencia de una cobertura transportada reciente (menor de 10 años).

Estudios arqueológicos	<input type="checkbox"/> Localización planimétrica de los enterramientos metálicos y estimación de su composición. <input type="checkbox"/> Determinación aproximada de la profundidad de los objetos.	<input type="checkbox"/> Presencia de zonas reductoras u oxidantes superficiales de diversa naturaleza. <input type="checkbox"/> Predominio de la respuesta litológica de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral. <input type="checkbox"/> Presencia de una cobertura transportada reciente (menor de 10 años).
---------------------------	---	---

2.3. Metodología del *Complejo Redox*

Para la medición in situ del Potencial Redox en suelos (Uredox) se utilizan dos electrodos conectados a un milivoltímetro digital de alta impedancia de entrada (sensibilidad 0.1 mV): uno inerte de platino, y otro de referencia de cobre (electrodo no polarizable-comercial), ubicados inmediatamente próximos, en posición vertical relativa, dentro de un hoyo de 10 - 30 cm de profundidad. La comunicación iónica que cierra el circuito se garantiza a través de la cerámica porosa del electrodo de referencia. Las mediciones con el dispositivo descrito tienen un comportamiento transiente, determinándose el potencial mediante un algoritmo a partir de cinco lecturas con una diferencia de tiempo entre ellas de un minuto. Las mediciones se pueden realizar, también, en el laboratorio, empleando un equipo comercial de celda Platino- Calomel, en muestras de suelos, roca o cualquier otro material sólido pulverizado. Si las mediciones se realizan en más de una línea, solo una parte (30-50%) de las muestras tomadas de los puntos de observación se someten, además, al estudio de la Reflectancia Espectral y al Análisis Químico de elementos metálicos, en el cual, para este último, se utilizan digestiones convencionales y la Espectroscopia con ICP. La calidad de las observaciones de Potencial Redox se evalúa a partir del error absoluto en la determinación del potencial, considerando un 10% de las mediciones de repetición efectuadas en los mismos hoyos (o muestras) utilizados para las mediciones ordinarias. La precisión aceptada para las aplicaciones descritas no debe superar los 10-15 mV. La falta de repetibilidad de las mediciones en días diferentes se resuelve con la reducción por el nivel de fondo, además, de la repetición de no menos de cinco puntos del día anterior si las observaciones del perfil no fueron concluidas.

La medición de la Susceptibilidad Magnética (Kappa) se realiza con un kappámetro KT-5 (sensibilidad 1×10^{-5} SI), efectuando siete lecturas en el piso y paredes del hoyo (o en muestras tomadas de él, con un peso aproximado de 150-200 gramos) las cuales se promedian. La calidad de las observaciones de campo se evalúa a partir del error relativo en la determinación del valor medio de Kappa, considerando un 10% de mediciones de repetición en los mismos hoyos (o muestras). La precisión aceptada no debe superar el 10-15%.

La medición de la Reflectancia Espectral se realiza con el Radiómetro Multiespectral CROPSCAN Modelo MSR5, de cinco bandas (485, 560, 660, 830 y 1650) con lecturas en la primera banda sobre muestras con un peso mínimo de 150 g, empleando un diseño especialmente preparado para esos efectos (luz solar, muestra distribuida según un círculo de 15-20 cm de diámetro sobre una superficie negra y sensor ubicado verticalmente a 30-40 cm sobre la muestra). La calidad de las observaciones se evalúa a partir del error absoluto en la determinación de la Reflectancia Espectral para la primera banda, considerando un 10% de mediciones repetidas al término del trabajo en el día. La precisión aceptada no debe superar el 0.5%.

Los datos de campo del *Complejo Redox* son captados, almacenados, procesados, interpretados y representados de manera automatizada por el *SISTEMA REDOX*, elaborado especialmente para este complejo de técnicas, donde se modela la experiencia del autor principal en la aplicación del mismo. El *SISTEMA REDOX* se vincula con otros sistemas profesionales como Microsoft Access, Microsoft Excel, Surfer e ILWIS, para las salidas en forma de gráficos por perfil, planos de isolíneas y el acceso a imágenes (Escenarios Landsat y Aerogeofísicos). Las bases de datos creadas en la plataforma de Microsoft Access se convierten al formato XYZ.

2.4. Interpretación de los datos del *Complejo Redox*.

La interpretación cualitativa de los datos del *Complejo Redox* involucra la identificación del incremento en el suelo de los elementos metálicos *constituyentes básicos* (del reservorio, de la mena, de la contaminación o del objeto metálico)

que migran desde la fuente, con respecto al fondo local de los elementos químicos característicos de los suelos residuales (cortezas de intemperismo), los cuales pueden, además, estar afectados por diversos tipos de alteraciones vinculadas con la propia fuente. Esto, también, es válido para los atributos medidos (Uredox, Kappa y RE), donde el problema de la interpretación cualitativa considera la identificación, en términos de gradientes (incrementos o decrementos respecto al fondo local), del comportamiento de cada atributo ante la contribución anómala de los elementos metálicos *constituyentes básicos* provenientes de la fuente. De ahí, que resulte pertinente tratar con atributos reducidos o normalizados con respecto al fondo local (en dependencia de que la distribución característica para el atributo medido sea normal o lognormal). Un aspecto importantísimo resulta, entonces, la objetiva y correcta determinación de los diferentes niveles de fondo, los cuales determinan, en última instancia, la precisión de las estimaciones cuantitativas; es por ese motivo, que los autores han diseñado un único y sofisticado algoritmo que permite la determinación del nivel de fondo de todos los atributos considerados. Por otra parte, el nivel de fondo varía espacialmente dentro de los límites de la ocurrencia y su periferia, siendo mayor sobre la parte central (más próxima a la superficie, potente o enriquecida) de la misma y disminuyendo, paulatinamente, hacia el exterior. De ese modo, un criterio cualitativo para valorar la proximidad a una ocurrencia (o a sus partes más próximas a la superficie, con mayor espesor o enriquecidas) es el gradual incremento de los niveles de fondo de los elementos metálicos *constituyentes básicos*, o la disminución progresiva del nivel de fondo del Potencial Redox (aumento del ambiente reductor).

La interpretación cualitativa de los diferentes atributos (reducidos o normalizados) del *Complejo Redox* exhibe sus propias particularidades, las cuales se resumen a continuación:

- La Susceptibilidad Magnética Normalizada por el fondo local (K_n) exhibe máximos asociados a la columna de ambiente reductor sobre reservorios de hidrocarburos, ocurrencias minerales y contaminaciones al nivel del manto freático, fundamentalmente, debido a que este ambiente reductor favorece la conversión de los minerales de hierro no magnéticos (hematita, pirita) en variedades magnéticas diagenéticas más estables (magnetita, maghemita, pirrotina y griegita). Frecuentemente, se observan máximos o mínimos de naturaleza litológica (zonas con alteraciones magnetíticas y suelos ferralíticos, suelos carbonatados, caolinizados y silíceos, entre otros). La amplitud y morfología de los máximos de interés es función de las características de la ocurrencia.
- El Potencial Redox Reducido por el fondo local (U_r) exhibe mínimos (columnas reductoras) asociados a reservorios de hidrocarburos, ocurrencias minerales y contaminaciones al nivel del manto freático, además, de zonas de ambiente reductor superficial. Sobre reservorios con hidrocarburos ligeros, el potencial presenta un carácter de mínimo desarticulado, con máximos locales asociados a los microescapes gaseosos. Sobre escombreras, zonas de oxidación de ocurrencias minerales, contaminaciones metálicas superficiales y objetos arqueológicos muy próximos a la superficie, se observan máximos de potencial. La amplitud y morfología de las anomalías de interés es función de las características de la ocurrencia. El Potencial Redox Reducido resulta insensible a las variaciones del relieve y la tectónica, siendo el nivel de fondo del potencial característico del tipo de ambiente geológico (volcánico, oceánico, sedimentario y/o metamórfico). Aunque en Cuba, por lo general, los suelos estudiados son del tipo residual, se dispone de una experiencia exitosa sobre una cobertura transportada reciente (exótica), en el caso del yacimiento de petróleo Varadero. Las fuentes de ruido más importantes conocidas hasta el presente son las zonas cenagosas secas, las acumulaciones de material orgánico, los aluviones con alto contenido de elementos metálicos, los cuales producen anomalías muy intensas (≥ 100 mV) de gradientes pronunciados (> 1.5 mV/m) y simétricos; algunas variaciones litológicas (de suelos) pueden producir anomalías, pero de orden menor.
- La Reflectancia Espectral Reducida por el fondo local (RE_r) exhibe, como regla, mínimos asociados al incremento del contenido de los elementos metálicos en el suelo, como consecuencia de su oscurecimiento. Frecuentemente, minerales como el cuarzo, la calcita, el caolín, el grafito, la hematita y otros, de naturaleza litológica, son los responsables de que se observen máximos o mínimos que no son de interés. La amplitud y morfología de las anomalías de interés es función de las características de la ocurrencia.

- El contenido normalizado por el fondo local de los elementos metálicos *constituyentes básicos* en el suelo (C_n) exhibe incrementos sobre la proyección vertical de las ocurrencias de hidrocarburos y minerales (incluyendo zonas de oxidación), así como también, sobre contaminaciones metálicas y de hidrocarburos y objetos arqueológicos de naturaleza metálica. La relación entre los distintos *elementos mayoritarios o constituyentes básicos* es función de la composición de la ocurrencia, contaminación u objeto metálico. La amplitud y morfología de los incrementos depende de las características de la ocurrencia. Para las contaminaciones superficiales el grado es determinable directamente a partir del dato químico.

La interpretación cuantitativa parte de los conceptos más generales de Intervalo de Respuesta Anómala del Atributo (IRAA) y del Complejo (IRA), de Puntos Singulares (PS) y de Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA). A continuación se definen los mismos:

- Intervalo de Respuesta Anómala del Atributo (IRAA): Es el intervalo de puntos de observación donde tiene lugar la respuesta anómala del atributo.
- Intervalo de Respuesta Anómala (IRA): Es el intervalo de puntos de observación donde tiene lugar la respuesta anómala correlacionable en la mayoría los atributos.
- Puntos de Singularidad (PS): Son aquellos puntos de observación dentro del IRA los cuales satisfacen el comportamiento anómalo esperado para los atributos. Estos puntos son utilizados para las estimaciones cuantitativas.
- Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA): Son aquellos puntos de observación fuera del IRA donde no existe correlación en la respuesta anómala esperada o sencillamente falta la respuesta anómala (por discontinuidad en la fuente). Algunos de estos puntos sirven para establecer los límites de las construcciones geométricas de la fuente y, también, para la estimación del nivel de fondo.

El proceso de interpretación cuantitativa consta de los siguientes cuatro pasos:

Paso 1. Examen minucioso de los gráficos y los datos, con el propósito de identificar los IRAA, el IRA, los PS, y los PARA. Debe prestarse especial atención dentro de las aplicaciones de minerales y medio-ambiente / arqueología a la identificación del ambiente de oxidación, reconocido por la existencia de al menos 3 puntos continuos con valores de $U_r \geq \text{Fondo} + 15 \text{ mV}$.

Paso 2. En la Base de Datos se seleccionan todos los PS de los IRA, los cuales se utilizan para el establecimiento de las relaciones lineales entre atributos, cuya salida son los valores de a_i y b_i , a ser utilizadas en las estimaciones cuantitativas.

Paso 3. Las estimaciones cuantitativas de la profundidad o del espesor se realizan para cada PS vinculado a las dependencias lineales para los atributos, determinando por ponderación, el valor más probable. Una vez realizadas todas las estimaciones ponderadas se procede a la construcción geométrica de la superficie resultante para la cual se emplean, también, los PARA.

Paso 4. Se procede a la estimación de la calidad de la fuente y, finalmente, a una sencilla estimación de recursos.

Aparato matemático para la interpretación cuantitativa

Potencial Redox Reducido. Expresiones matemáticas:

1.- Expresión general de la Respuesta Transiente de la Medición *in situ* del Potencial Redox en suelos:

$$U_r(t) = L - A_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

donde A_0 y τ son función lineal (inversamente proporcional) de la Conductividad Reducida (C_r) del suelo, resultando indicativos de mineralizaciones metálicas muy próximas a la superficie (valores mínimos de A_0 y τ , similares y repetidos en estaciones contiguas). La dependencia lineal entre A_0 y C_r (para valores de C_r entre 25 y 105 mhos) es la siguiente:

$$C_r = -2.9261A_0 + 103.01$$

2.- Expresión general de la Dependencia del Potencial Redox Reducido con la Profundidad (H), el Espesor (P) y la Concentración de Metal de la fuente(C):

$$U_r(H, P, C) = (212e^{-\frac{80}{H}})H^{-0.15} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{C \frac{\Delta C}{\Delta H}} \quad [1]$$

donde $A = (212e^{-\frac{80}{H}})$

El uso de esta expresión general varía en dependencia de la esfera de aplicación (petróleo, minerales y medio-ambiente/arqueología), para lo cual se consideran tres niveles medios de profundidad: 1000 m, 100 m y 10 m, que al ser evaluados en la expresión, se obtienen los valores del coeficiente A ya conocidos previamente por vía empírica: 196, 95 y 0.07. También el tipo de aplicación (profundidad media de la fuente) permite asumir consideraciones que simplifican la expresión. Así, para petróleo, se puede asumir que la concentración metálica en la fuente es constante ($\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{\Delta c}{\Delta y} = \frac{\Delta c}{\Delta z} = 0$) y el espesor del reservorio es muy pequeño en comparación con su profundidad, de ahí que la expresión quede como: $U_r = 196H^{-0.15} e^{-0.0005H}$, válida para hidrocarburos pesados, donde son características las anomalías negativas de intensidad mayor de 30 mV. Para los hidrocarburos pesados-ligeros y ligeros, donde son características las anomalías negativas de amplitud menor a 30 mV se cumple la expresión:

$$U_r = (5e^{-\frac{80}{H}})H^{0.25} e^{0.0005H} \quad [2]$$

Para H=1000 m, el Coeficiente A es 4.6.

En los casos de las aplicaciones de minerales y medio-ambiente/arqueología, las simplificaciones anteriores ya no resultan válidas por lo que es necesario disponer de información complementaria sobre el espesor y la concentración metálica del objeto a fin de poder reducir la ambigüedad en la interpretación.

2.5. Contenido de elementos químicos. Expresiones matemáticas:

La expresión general de la dependencia del contenido normalizado de elementos químicos en el suelo con la profundidad, el espesor y la concentración de metal de la fuente es:

$$C_n = (1039e^{-\frac{80}{H}})H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{C \frac{\Delta C}{\Delta H}} \quad [3]$$

donde F es el nivel de fondo local.

El uso de esta expresión al igual que la correspondiente al Potencial Redox [1], depende de la esfera de aplicación y, como en el caso anterior, considerando los mismos tres niveles medios de profundidad: 1000m, 100m y 10m, se obtienen al evaluar los valores del Coeficiente A: 958, 467, y 0.35. También resultan válidas las simplificaciones de la expresión [3] en las aplicaciones de petróleo donde, al hacerse la unidad los dos últimos términos, la misma queda como $C_n = 958 \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H}$, de de igual manera, para las aplicaciones de minerales y medio-ambiente/arqueología las simplificaciones anteriores no son válidas, resultando necesario disponer de información complementaria para reducir la ambigüedad en la interpretación.

En las aplicaciones de petróleo se definió un parámetro indicador de la calidad metálica del hidrocarburo, el cual, por su magnitud, resulta semejante al grado API de madurez del hidrocarburo, denominándosele Grado Redox o Equivalente Inorgánico del Grado API:

$${}^{\circ}REDOX = 2.69F^{-0.25} e^{-0.0005F} \quad [4]$$

Donde

$$F = F_{Ni} F_V F_{Fe} F_{Zn} \cdot 10^{-8} \quad [5]$$

estando expresados los valores de fondo de los distintos elementos en ppm.

En las aplicaciones de minerales y medio-ambiente/arqueología como indicador de la calidad metálica de la fuente superficial se utiliza la expresión:

$$Ley_{med} = 10C_{max} \quad [6]$$

donde C_{max} es el valor máximo del contenido en el suelo del elemento *constituyente básico* en cuestión. En el caso del Oro (Au), el factor multiplicativo es 3.2, lo cual se explica por su baja insolubilidad.

2.6. Relaciones entre atributos reducidos o normalizados. Expresiones matemáticas:

Se ha comprobado la existencia de una dependencia lineal entre la Reflectancia Espectral Reducida (RE_r) y la Susceptibilidad Magnética Normalizada (K_n) con el Contenido Normalizado de elementos químicos en el suelo (C_n) resultante del proceso de *Migración Vertical de Iones Metálicos* a partir de la fuente.

La relación de la RE_r , tiene un vínculo genético directo con la presencia del metal, no así la K_n , la cual tiene un vínculo indirecto a través de la formación de minerales magnéticos diagenéticos originados como resultado de la existencia de la “Columna Reductora”. En el caso particular de objetivos con yacencia horizontal (cortezas de intemperismo, reservorios de petróleo, lentes de contaminación a nivel del manto freático y rocas asfálticas con yacencia horizontal) tiene lugar también una dependencia lineal entre el Potencial Redox Reducido (U_r) y el Contenido Normalizado de elementos químicos en el suelo. La mencionada dependencia lineal entre atributos se expresa, generalmente, en forma de hasta tres rectas, las cuales caracterizan el comportamiento del atributo. Las expresiones de estas relaciones lineales son las siguientes:

$$C_n = \frac{b_i K_n - (b_i - a_i)}{a_i} \quad [7], \quad C_n = \frac{b_i RE_r + a_i}{a_i} \quad [8], \quad C_n = \frac{b_i U_r + a_i}{a_i} \quad [9]$$

Esta última expresión es válida solo para objetivos horizontales, donde:

$$a_i = \frac{1}{C_n - 1} \quad \text{y} \quad b_i = \frac{1}{K_n - 1}, \quad b_i = \frac{1}{RE_r - 1}, \quad b_i = \frac{1}{U_r - 1}$$

Siendo i un punto cualquiera de las rectas que definen la dependencia lineal.

Teniendo en cuenta las relaciones anteriores, las expresiones más generales que describen la dependencia de la K_n , la RE_r y el U_r (objetos horizontales) con los parámetros de yacencia, geométricos y de calidad metálica de las fuentes son las siguientes:

$$Kn = \frac{b_i - a_i}{b_i} + \frac{a_i}{b_i} \left[\left((1039 e^{-\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{\frac{C \Delta C}{\Delta H}} \right) \right] \quad [10]$$

$$REr = \frac{a_i}{b_i} \left[\left((1039 e^{-\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{\frac{C \Delta C}{\Delta H}} \right) - 1 \right] \quad [11]$$

$$Ur = \frac{a_i}{b_i} \left[\left((1039 e^{-\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{\frac{C \Delta C}{\Delta H}} \right) - 1 \right] \quad [12]$$

Esta última expresión es válida solo para objetos horizontales.

De las expresiones anteriores se derivan las correspondientes para las aplicaciones de petróleo, a partir de las cuales se determina la profundidad del objetivo:

$$Kn = \frac{b_i - a_i}{b_i} + \frac{a_i}{b_i} \left(958 \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} \right) \quad [13]$$

$$REr = \frac{a_i}{b_i} \left[\left(958 \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} \right) - 1 \right] \quad [14]$$

$$Ur = \frac{a_i}{b_i} \left[\left(958 \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} \right) - 1 \right] \quad [15]$$

Para las aplicaciones de minerales, objetivos horizontales, profundos (100 m) y superficiales (10 m); estos últimos válidos también para las aplicaciones medio-ambientales:

$$Kn = \frac{b_i - a_i}{b_i} + \frac{a_i}{b_i} \left(\left[\frac{467}{0.35} \right] \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} \right) \quad [16]$$

$$REr = \frac{a_i}{b_i} \left[\left(\left[\frac{467}{0.35} \right] \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} \right) - 1 \right] \quad [17]$$

$$Ur = \frac{a_i}{b_i} \left[\left(\left[\frac{467}{0.35} \right] \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} \right) - 1 \right] \quad [18]$$

Estas expresiones permiten la estimación del espesor del objetivo (su variabilidad) bajo las condiciones de una composición metálica homogénea y una profundidad constante del tope de la fuente.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Sustentación empírica del *Complejo Redox*,

El *Complejo Redox* ha sido empleado, en Cuba (Pardo, 1997, 1999, 2000a, 2000b, 2001a, 2001b, 2003a, 2003b), en diferentes áreas de control (con elevado grado de conocimiento de los objetos de estudio) relacionadas con distintos tipos de yacimientos de petróleo (Cantel, Pina, Varadero-Varadero Sur, Jatibonico y Cristales) y de minerales metálicos (Mella, La Unión, Antonio, Little Golden Hill, Florencia- Cuerpos Norte y Sur, Jacinto- Vetas Beatriz y El Limón, Camagüey II, Cuba Libre- Río Negro, Yagrumaje Norte, Camarioca Este, Unión 1, Descanso, Meloneras, Stock Güaimaro y Sigua), los cuales son representantes de una amplia variedad de ambientes geológicos, tipos genéticos, componentes útiles, rasgos estructuro- texturales del reservorio o de la mena, condiciones geométricas y de yacencia, así como de relieve. Las aplicaciones para medio-ambiente y arqueología consideran, respectivamente, las zonas perimetrales de las industrias: Fábrica de Baterías Secas Pilas Yara, Siderúrgica Antillana de Acero, Refinería Níco López, Electroquímica de Sagua, Fabrica de Sulfometales y Fabrica de Pinturas Capdevilla, así como la Presa de Colas de Mina Delita; y los sitios arqueológicos Jardín Exterior del Castillo de la Fuerza, Caimito y el Valle de los Ingenios. Todas estas investigaciones han servido como base experimental para el desarrollo del aparato matemático expuesto anteriormente.

Las novísimas técnicas no convencionales de exploración geoquímica basadas en el Principio de la Migración Vertical de Iones Metálicos dentro de las que se encuentran el MMI (Canadá, década de los 90) y el CHIM (Rusia, década de los 80), se emplean como herramientas complementarias de exploración con el propósito de elevar la efectividad geológica de la prospección mineral. En esta misma corriente de exploración se inserta el *Complejo Redox*.

El *Complejo Redox* representa una alternativa más económica que las citadas técnicas geoquímicas, dado que no exige del empleo de extracciones selectivas y del ICP de masa para las determinaciones analíticas, utilizando digestiones convencionales y el uso del ICP Espectral. Por demás, este complejo cuenta con un aparato matemático para las estimaciones cuantitativas acerca de las fuentes metálicas y ha demostrado su efectividad en otras esferas de aplicación como la prospección petrolera y los estudios medioambientales y arqueológicos.

El *Complejo Redox* empleado, con carácter complementario, dentro de los complejos mínimos de prospección/investigación, eleva la efectividad geológica de las investigaciones y reduce los costos generales, permitiendo la optimización de la toma de decisiones y la elevación de la tasa de éxito de la perforación y/o excavación exploratoria.

REFERENCIAS

- Birell, R., 1996. MMI geochemistry: mapping the depths. *Mining Magazine* 174 (5): pp. 306-307.
- Hamilton, S. M., 1998. Electrochemical mass-transport in overburden: a new model to account for the formation of selective leaches anomalies in glacial terrain. *Journal of Geochemical Exploration*, 63: pp. 155-172.
- Hamilton, S. M., 1998. *New Electrochemical Studies by Ontario Geological Survey, Explore No.101.*
- Hamilton, S. M., 2000. Spontaneous potentials and electrochemical cells. In; *Geochemical Remote Sensing of the Subsurface. Handbook of Exploration Geochemistry*, 7. Elsevier, Amsterdam, pp. 81-119.
- Hamilton, S. M., E. M. Cameron, et al., 2004. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden (I): methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property. *Geochemistry* 4 (1): pp. 33-44.
- Kelley, D.L., et al., 2004. Secondary geochemical dispersion through transported overburden, SEG, Perth, p. 4.
- Mann, A. W., R. D. Birrell, et al., 2005. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies and sampling depth for Mineral Exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment Analysis*, Vol. 5, 3: pp. 201-210. Geological Society

Publishing House.

- Mann, A. W., 1997. The use of MMI in Mineral Exploration. 10th International Gold Symposium. Rio de Janeiro, Brazil.
- Moon, C. J., A. Khan, 1990. Mineral Exploration. Mining Annual Review 1990, p. 203.
- Pardo, M., J. Álvarez, G. Echevarria, 1997. Técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales para la prospección de hidrocarburos; progresos de su aplicación en Cuba. Memorias del III Congreso Cubano de Geología, vol. I, pp 547-550.
- Pardo, M., R. Stout, 1999. El método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la kappametría a los fines de la prospección geológica. Memorias del I Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
- Pardo, M., R. Scout, et al., 2000. Informe del TTP Aplicación de la medición in situ del Potencial Redox en suelos sobre objetivos de prospección de minerales metálicos e hidrocarburos (inédito). ONRM, La Habana.
- Pardo, M., R. Scout, et al., 2000. El método de Potencial Redox en la prospección de minerales; dos ejemplos: el yacimiento Mella y el stockwork La Unión. Memorias del IV Congreso Cubano de Geología, La Habana.
- Pardo, M., R. Stout, 2001. El método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la kappametría a los fines de la prospección petrolífera. Memorias del II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
- Pardo, M., 2001. Proyecto de Investigación–Desarrollo (227): Análisis teórico y diseño de los parámetros cuantitativos del Método Redox en áreas de control (inédito). IGP, La Habana.
- Pardo, M., R. Scout, et al., 2001. La nueva técnica geoquímica de Potencial Redox en suelos: Principios y Aplicaciones. Memorias del II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
- Pardo, M. 2003. Proyecto de Investigación–Desarrollo (244): Estimaciones cuantitativas por el **Complejo Redox** en su aplicación a la prospección geológica, los estudios medio–ambientales y arqueológicos (inédito). IGP, La Habana.
- Pardo, M., R. Scout, et al. 2003. El **Complejo Redox**: Estado del Arte en el 2002. Memorias del V Congreso Cubano de Geología, La Habana.
- Pardo, M. E., 2004. Informe Final del Proyecto I+D 244 “Estimaciones Cuantitativas por el **Complejo Redox** en su aplicación a la Prospección Geológica, los Estudios Medio-Ambientales y Arqueológicos”, (inédito). Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, 27p.
- Smee, B. W., 2003. Theory behind the use of soil pH measurements as an inexpensive guide to buried mineralization, with examples. Explore No. 118.