

Tecnología Espacial con Sensores Remotos (STeP®) Aplicada a la Búsqueda de Recursos Minerales.

Space Technology with remote sensing STEP® applied to the search of mineral resources.

Javier de J. Salazar, *CEO, Inversiones Petrocum CA*, Germán J. Márquez, *Profesional II Ministerio del Poder Popular de Petróleo*.

Resumen— La exploración minera en Venezuela ha tomado un auge significativo debido a las recientes inversiones del Proyecto Arco Minero, el cual tiene una extensión aproximada de unos 114.000 km², sin contar otras áreas asociadas a minerales estratégicos alrededor del país para el incremento de reservas a nivel nacional. Los planes de exploración y explotación de minerales estratégicos como el carbón, oro, bauxita, coltán y diamante se realizan con la finalidad de aumentar significativamente las reservas a nivel nacional. Los sensores remotos pasivos, son una herramienta usada por décadas para minimizar costos, tiempos y el impacto ambiental durante la fase exploratoria en lo que respecta a la flora y la fauna de nuestro planeta, esto es debido a que es un método No convencional el cual es amigable con el medio ambiente y no causa ningún desequilibrio ecológico y deforestación durante el proceso de exploración y explotación. Las tecnologías espaciales con sensores remotos se han convertido en una herramienta estratégica confiable en donde se puede priorizar, caracterizar y jerarquizar muchas de las alteraciones asociadas a depósitos o yacimientos de minerales. STeP es un método de exploración patentado basado en el análisis de imágenes espaciales con sensores remotos, utilizando algoritmos para el procesamiento, análisis, interpretación y aplicación en la identificación de patrones geológicos y anomalías espectrales con características circulares que se pueden utilizar para detectar diferentes tipos de minerales en zonas prospectivas del subsuelo.

Palabras clave— Exploración, minería, STEP, tecnología espacial.

Abstract. - Mining exploration in Venezuela has taken a significant boom due to the recent investments of the Arco Minero Project, which has an approximate area of about 114,000 km², not counting other areas associated with strategic minerals around the country for the increase of national reserves . Plans for the exploration and exploitation of strategic minerals such as coal, gold, bauxite, coltan and diamond are carried out in order to significantly increase reserves at the national level. Passive remote sensors are a tool used for decades to minimize costs, time and environmental impact during the exploratory phase in regards to the flora and fauna of our planet, this is because it is a non-conventional method which is environmentally friendly and does not cause any ecological imbalance and deforestation during the exploration and exploitation process. Spatial technologies with remote sensing have become a reliable strategic tool where one can prioritize, characterize and hierarchize many of the alterations associated with deposits or mineral deposits. STeP is a

patented exploration method based on the analysis of spatial images with remote sensors, using algorithms for the processing, analysis, interpretation and application in the identification of geological patterns and spectral anomalies with circular characteristics that can be used to detect different types of minerals in prospective subsurface areas.

Index Terms – exploration, mining, STeP, space technologies

I. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de recursos energéticos hoy en día se ha hecho cada vez más difícil, debido a la complejidad de yacimientos convencionales y no convencionales en materia de minería.

La exploración y explotación minera en el mundo ha tenido resultados devastadores en toda la flora y la fauna ocasionando así, un gran impacto en el medio ambiente, esto es debido a los métodos convencionales que se han venido aplicando por años, como el uso de calicatas, explosivos, tecnología con diamantinas y sísmica.

Los satélites conocidos como sensores remotos, (SR) son una herramienta alternativa que se ha venido aplicando en la búsqueda de recursos de minería e hidrocarburos por más de treinta años en los países euroasiáticos, y del medio oriente.

La incorporación de nuevos métodos de exploración no invasivos se hace necesario ya que no poseen limitaciones en las restricciones del terreno, además son amigables con el medio ambiente y no causa ningún desequilibrio ecológico y deforestación durante el proceso de exploración. Los sensores remotos han ayudado grandemente a descubrimientos donde la tecnología convencional no ha podido delinear estructuras complejas, durante su aplicación.

Este trabajo fue enviado al II Congreso Venezolano de Tecnología Espacial en el mes de septiembre del año 2017.

J.J. Salazar, CEO, Inversiones Petrocum CA. Av. Intercomunal, C.C. Carmen, local 5-6. Cabimas, Zulia. (e-mail: ingjaviersalazar@gmail.com).

G.J. Márquez, Profesional II. Ministerio del Poder Popular de Petróleo. Dirección Regional Maracaibo. Av. 5 de Julio. Edificio Ministerial. Maracaibo. Zulia (e-mail: gemarquez@menpet.gob.ve).

El uso de SR se ha convertido en una tecnología estratégica confiable, debido a la información adicional proporcionada por las imágenes y las características propias que poseen sus bandas hiperespectrales, multiespectrales, las cuales son analizadas e interpretadas para priorizar, caracterizar y jerarquizar muchas de las alteraciones asociadas a depósitos o yacimientos de minerales.

Los SR poseen imágenes que contienen una gran cantidad de información previamente oculta concerniente a los indicadores estructurales de presencia de minerales, en donde solo se ha podido extraer, menos de un 15% de todos los datos disponibles de las imágenes espectrales. [1]

El Método analítico Subterranean exploration Prospecting, (STeP®) es una herramienta patentada única en el mundo de las tecnologías en materia de exploración de minerales e hidrocarburos, esto es debido al desarrollo algorítmico en reconocimiento a alteraciones denominadas GIA (geo-informatics anomalies) estas anomalías o características propias se manifiestan a través de cambios espectrales que poseen formas circulares únicas, dejando así una huella imborrable que ha quedado, y que pueden ser identificadas a través de las imágenes captadas por los SR y el método analítico STeP® maximizando así el uso y su aplicación.

La identificación de estas GIA de formas de estructuras circulares, se debe a la emanación de energía natural (radiaciones microsísmicas) que provienen del núcleo de la tierra atravesando los estratos y cuerpos geológicos del subsuelo (acumulaciones de rocas mineralizadas) que son excitadas por esta energía, debido a oscilaciones acústicas extremadamente bajas, dejando así patrones únicos o huellas por diferencias de densidad mecánica distinguibles en formas circulares, que se manifiestan en superficie como una estructura geomorfológica conocida, dejando ahí una información muy valiosa referente a yacimientos de minerales. [2]

El desarrollo de STeP® en la búsqueda de recursos energéticos ha llevado a la utilización de nuevos algoritmos y software que poseen redes neuronales artificiales y que han podido identificar y extraer esa información adicional oculta (GIA) proporcionada por las imágenes de los SR para la aplicación de zonas prospectivas de minerales y así aumentar la tasa de éxito, minimizar el impacto ambiental en relación con nuevos yacimientos.

Con relación a lo descrito anteriormente, en la presente investigación se analizará el uso de la tecnología espacial con sensores remotos (STeP®) aplicada a la búsqueda de recursos minerales como herramienta alternativa en la búsqueda de reservas y/o prospectos potenciales estratégicos.

II. OBJETIVO

La presente investigación tiene como objetivo analizar el uso de la tecnología espacial con sensores remotos (STeP®) aplicada a la búsqueda de recursos minerales.

III. MARCO TEÓRICO

1. Teledetección o percepción remota.

Es el proceso de adquirir información de un objeto o un fenómeno por medio de un instrumento de medición o de recolección de datos en tiempo real, el cual no está en contacto físico o cercano con el objeto que está siendo estudiado. Las vías de recolección de datos pueden ser aerotransportadas, satélite, boyas o embarcaciones.

2. Componentes de un sistema de teledetección.

Los elementos básicos que influyen en la Teledetección son:

- Fuente de energía: Representa de donde proviene la radiación electromagnética que es captada por el sensor; provenientes desde un foco exterior al sensor (sol), o emitida por el mismo.
- Superficie terrestre: Corresponde a todas las coberturas que se encuentran en la superficie terrestre, vegetación, agua, construcciones humanas, etc. Que absorben y reflejan la señal energética según sus propias características físicas.
- Sistema sensor: Compuesto por el sensor y la plataforma satelital en que se encuentra; es el que recibe la información de las cubiertas, las codifica, las almacena y posteriormente las envía al sistema de recepción.
- Sistema de recepción: Recibe y graba la información emitida por el satélite, realizándoles algunas correcciones y las distribuye.
- Interpretación: Convierte la información según las necesidades propias, realizando tratamiento visual y digital, para el estudio que esté realizando.

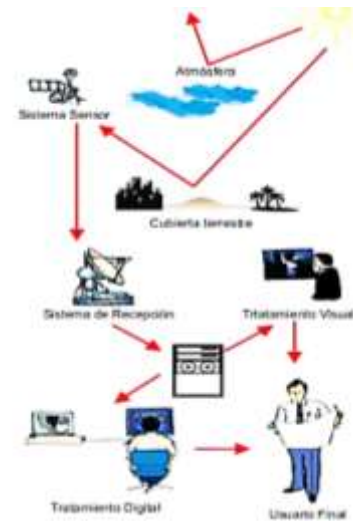


Fig. 1. Sistema de teledetección. [3]

3. Fundamento físico de la teledetección.

La teledetección es la técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material, en nuestro caso se trata de objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación sea posible es necesario que, aunque sin contacto material, exista algún tipo de interacción entre los objetos y el sensor. En este caso la interacción va a ser un flujo de radiación que parte de los

objetos y se dirige hacia el sensor. Este flujo puede ser, en cuanto a su origen, de tres tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado).
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico).
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar).

Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva y la última como teledetección activa.

4. Radiación electromagnética

En la naturaleza la luz visible es una de las muchas formas de radiación electromagnética. Las ondas de radio, las microondas, rayos ultravioletas y rayos-x, son diferentes formas de ondas electromagnéticas. Son energía pura en formas de campos de fuerza eléctricos y magnéticos unidos que se transmiten en longitud de onda.

La radiación eléctrica es transportada por una onda en un campo electromagnético o como un flujo de partículas, llamado fotones y que no tiene masa. Los fotones con la energía más alta corresponden a las longitudes de ondas más cortas.

Todas estas formas de energías son intrínsecamente similares y se irradian de acuerdo con la teoría básica de ondas, la cual describe la propagación de la energía electromagnética en forma armónica y sinusoidal a la velocidad de la luz. La distancia de un máximo de ondas al siguiente es la longitud de onda y el número de picos que pasan por un punto fijo en el espacio por unidad de tiempo es la frecuencia. De acuerdo a la física básica, las ondas cumplen con la siguiente ecuación:

$$C = v \cdot \lambda, \quad v = C/\lambda \quad (1)$$

Donde C es la velocidad de la luz con un valor constante (3×10^8 m/seg), v es la frecuencia de la luz en hercios (Hz) o ciclos por segundo, y λ (lambda) es la longitud de onda de la luz en metros.

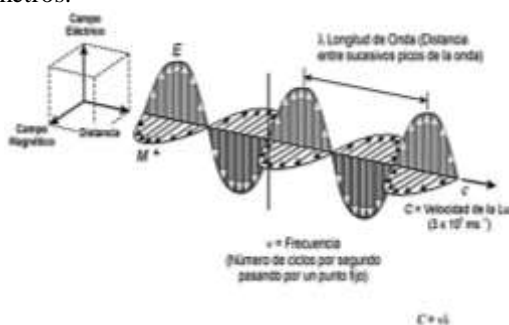


Fig. 2. Radiación electromagnética. [4]

5. El espectro electromagnético.

El espectro electromagnético es la distribución de la radiación electromagnética según la energía. Las regiones del espectro electromagnético se definen según, longitud de onda, frecuencia y energía. Por ejemplo, el sol, la tierra, y otros cuerpos irradian energía electromagnética de varias longitudes

de onda. La energía electromagnética atraviesa el espacio a la velocidad de la luz en forma de ondas del sinusoidal. En sensores remotos es muy común caracterizar las ondas electromagnéticas en función de su posición, dentro del espectro electromagnético. La unidad más usada para medir las longitudes de ondas a lo largo del espectro electromagnético es el micrón ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m). El rango de longitudes de ondas del espectro electromagnético se extiende desde la radiación cósmica hasta las ondas de radio.

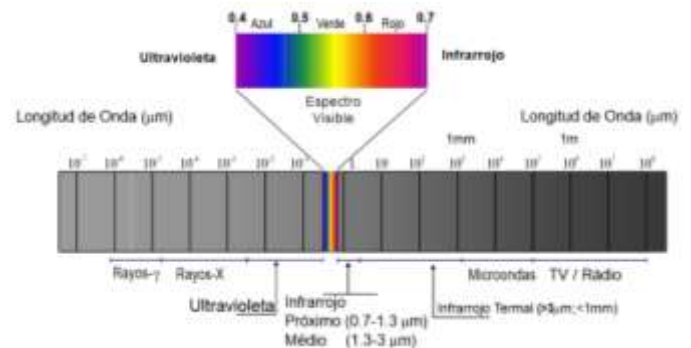


Fig. 3. Espectro electromagnético. [5]

Si bien se asignan nombres como ultravioleta, visible o microondas a algunas regiones del espectro, no hay un corte neto entre una región y la siguiente. Las divisiones en el espectro surgen a partir de los distintos métodos para detectar cada tipo de radiación más que de las diferencias intrínsecas en las características de la energía en las distintas longitudes de onda.

La región del espectro visible es muy pequeña, debido a que la sensibilidad espectral del ojo humano se extiende sólo desde los $0,4 \mu\text{m}$ hasta aproximadamente $0,7 \mu\text{m}$. El color azul corresponde de $0,4$ a $0,5 \mu\text{m}$, el verde de $0,5$ a $0,6 \mu\text{m}$ y el rojo de $0,6$ a $0,7 \mu\text{m}$. Estas radiaciones son una porción muy pequeña del espectro electromagnético, son registradas por emulsiones fotográficas y por radiómetros que operan en estas bandas. En esta región del visible se produce el máximo de energía solar que llega a la tierra.

La energía ultravioleta (UV) se encuentra junto al azul en la parte visible del espectro. Del otro lado del espectro visible y a continuación del extremo rojo hay tres categorías diferentes de ondas infrarrojas, el infrarrojo cercano ($0,7$ a $1,3 \mu\text{m}$), el infrarrojo medio ($1,3$ a $3 \mu\text{m}$) y el infrarrojo térmico (más allá de $3 \mu\text{m}$ y hasta menos de 1mm).

Las regiones localizadas entre 1 y $2,5 \mu\text{m}$ corresponde al infrarrojo próximo de reflexión, y es donde la intensidad radiación solar reflejada es aún dominante. Las radiaciones de estas longitudes de onda se registran por medio de radiómetros. Esta región es de gran interés en la ciencia de la tierra, ya que dentro de ella se origina gran parte de las absorciones que caracterizan el espectro de ciertos minerales y rocas.

El infrarrojo medio es la región de transición solar entre la radiación solar (reflexión) y la radiación terrestre (emisión), aunque la emisión es dominante. El poder de reflectividad de la energía solar que llega a la tierra decrece a medida que aumenta la longitud de onda, hasta alcanzar un punto en el que la radiación emitida por la superficie terrestre es dominante.

La región entre 4 a 22 μm corresponde al infrarrojo termal, ya que en ella se localizan el espectro emisor de la superficie terrestre. El máximo de la emisividad espectral se sitúa alrededor de 10 μm , por lo que la ventana más utilizada por los sensores remotos es la de 8 a 12 μm . Las longitudes de ondas más largas, de 1 mm a 1 m, corresponde a la porción del espectro de las microondas y suele hablarse de frecuencia de 1 y 10 Hz. Estas radiaciones se propagan muy bien en la atmósfera, independientemente de las condiciones atmosféricas.

6. Firma espectral.

Una vez que la energía electromagnética llega a la superficie terrestre, interactúa con cada tipo de material ya sea por reflexión, absorción o transmisión, de acuerdo a un patrón de respuesta espectral particular. Este comportamiento distintivo de cada tipo de material es aprovechado en procesos de clasificación de imágenes, siendo común referirse a él como "firma espectral".

Su determinación en forma consistente presenta algunas dificultades asociadas a las siguientes razones: La vegetación tiene un comportamiento dinámico debido a los cambios fenológicos que ocurren estacionalmente. Esto significa que su firma espectral cambia durante el año. Las condiciones de iluminación asociadas a la topografía (pendiente y orientación), la posición del sol durante el año, y las condiciones de humedad del suelo y la vegetación pueden significar variaciones importantes en el patrón de respuesta espectral.

Debido a la resolución espacial de la mayoría de los sensores, la información contenida en un píxel es el resultado de una mezcla espectral de varios tipos de materiales. Por ejemplo, en el caso del satélite LANDSAT 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) el área asociada a un único píxel (30 x 30 m) puede estar compuesta por vegetación herbácea, vegetación arbórea, suelo desnudo y pavimento, todo lo cual queda registrado en un único nivel digital.

La firma espectral se define como el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada (reflectancia) o emitida (emitancia) desde algún tipo de superficie u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético. Una forma gráfica de estudiar este comportamiento es disponer los datos de reflectancia (%) en el eje Y, la longitud de onda λ en el eje X.

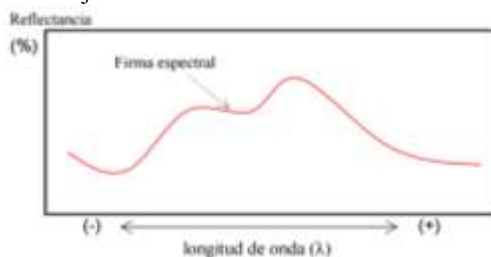


Fig. 4. Representación gráfica de una firma espectral una de cobertura de suelo cualquiera (% indica reflectividad). [6]

Todos los materiales presentan respuestas espectrales características que se pueden detectar usando sensores ópticos electrónicos capaces de detectar energía en la región infrarroja

reflejada y térmica. Estos instrumentos pueden ser usados a nivel terrestre, en campo o en laboratorio, o montados en plataformas aéreas o satelitales. La figura 5 muestra como reflejan la energía en el espectro visible e infrarrojo, los tres elementos dominantes en la superficie terrestre: suelo, vegetación y agua. Cada una de estas curvas es característica del elemento indicado y representa su firma espectral.

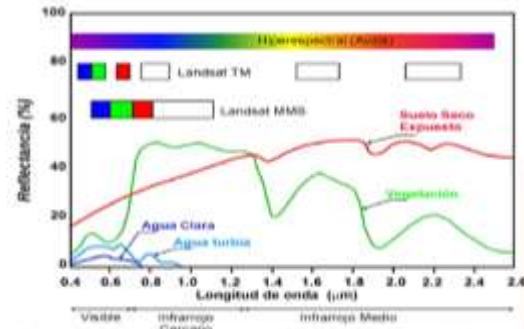


Fig. 5. Curvas espectrales características de diferentes materiales. [7]

7. Comportamiento espectral de la vegetación.

La curva de reflectancia espectral típica de la vegetación verde y sana muestra picos y valles. En la vegetación el nivel de reflectancia se ve modificado principalmente por factores como: los tipos de pigmentos, estructura de las hojas y el contenido de humedad.

Las plantas usan la energía solar para convertir agua y dióxido de carbono a carbohidratos y oxígeno a través del proceso de fotosíntesis. El catalizador para la fotosíntesis es la clorofila del pigmento, un compuesto orgánico complejo que contiene hierro. La función de la clorofila es absorber la radiación solar. La clorofila tiene una fuerte absorción entre los 0,45 y 0,67 μm , por esto, nuestros ojos perciben la vegetación saludable de color verde, debido a la absorción muy alta de la energía de las longitudes de onda del azul y rojo por las hojas de las plantas y la reflexión alta de energía verde.

Cuando una planta sufre cualquier tipo de estrés, disminuye la producción de clorofila; causando una disminución en la absorción en las bandas del azul y rojo. Así, aumenta la reflectancia en el rojo dando una apariencia amarillenta a la planta (combinación de rojo y verde). La reflectancia de la vegetación aumenta hacia el infrarrojo cercano, con un fuerte aumento de los rangos 0,7 a 1,3 μm , donde la hoja de una planta refleja del 40 al 50% de la energía incidente. Luego muestra incrementos a 1,6 y 2,2 μm . La curva muestra mínimo a 1,4; 1,9 y 2,7 μm debido a la absorción del agua en la hoja e esas longitudes de onda.

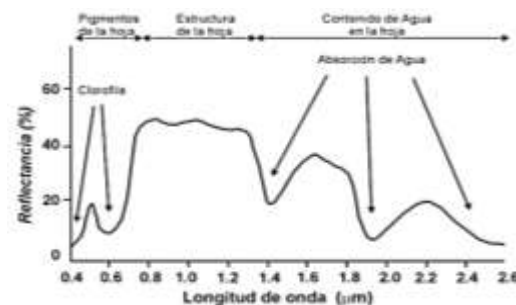


Fig. 6. Curva espectral de una hoja. [8]

8. Comportamiento espectral de tipos de suelo.

Algunos de los factores que afectan la curva de reflectancia del suelo son: El volumen de humedad, textura superficial y granulometría, presencia óxido férrico y contenido de materia orgánica. El contenido de agua produce una disminución general en la reflectividad, produciendo bandas de absorción a 1,4; 1,9 2,7 μm (suelos con arcillas y arenosos, producen bandas de absorción a 1,4; 1,9 y 2,7 μm).

El volumen de humedad está relacionado con la textura superficial. Suelos ásperos tienen buen drenaje, resultando un bajo contenido de humedad y alta reflectancia. En cambio, suelos con sedimentos finos tendrán bajo drenajes y relativamente alto contenido de humedad dando una baja reflectancia.

En resumen, a mayor contenido de humedad del suelo, más bajo es el valor de reflectividad. Por otro lado, en ausencia de agua, las toscas parecerán más oscuras que las tierras de textura fina. Otros dos factores que reducen la reflectancia de los suelos son, la textura superficial y el volumen de materia orgánica. La presencia de óxido de hierro en los suelos produce una disminución en la reflectividad en la longitud de onda visible.

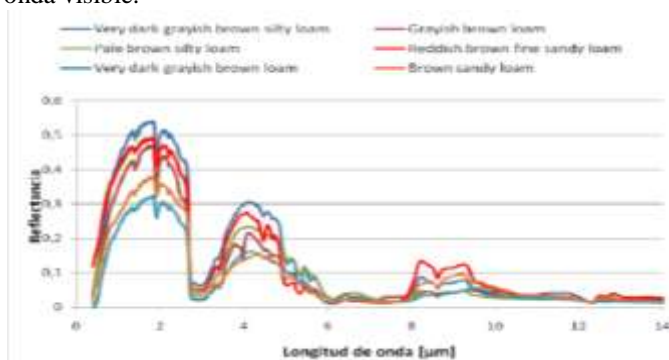


Fig. 7. Comportamiento espectral de algunos tipos de suelos. [9]

9. Comportamiento espectral de las rocas y minerales.

Los rasgos que caracterizan las respuestas espectrales de los minerales y rocas dependen de los procesos electrónicos y transiciones vibracionales, que ocurren en la estructura atómica y molecular de los mismos. Las diferencias en las longitudes de ondas, entre estos pueden servir para discriminar materiales con distinta composición mineralógica. Se consideran los efectos de las rocas y minerales en los tres mayores rangos de las longitudes de onda de la radiación electromagnética, 0,4-2,5 μm [visible, 0,4-0,7 μm ; very near-infrared (VNIR) o infrarrojo cercano, 0,7-1300 μm ; short-wave infrared (SWIR) o infrarrojo medio, 1,3-3,0 μm]; 8-14 μm termal MIR; y las microondas (1 mm-30 cm). [10]

Los procesos electrónicos dentro de un átomo están asociados a intercambios de energía; por lo que pueden ocupar órbitas específicas con determinados niveles de energía. Los componentes más comunes de las rocas y minerales son oxígeno, silicio y aluminio; con variables proporcionales de hierro, magnesio, calcio, sodio y potasio; y una pequeña cantidad de otros elementos. El oxígeno, silicio y aluminio tienen poco o nada de efecto en los espectros del visible al

infrarrojo cercano. Sin embargo, ellos existen como iones con diferentes valencias, pudiendo tener un proceso de transferencia de carga con los metales de transición del hierro como, cobre, níquel, cromo, cobalto, magnesio, vanadio, titanio y escandio.

El fenómeno más común de carga de transferencia en la migración de electrones desde el hierro al oxígeno, y el resultado es una banda de absorción ancha de longitud de onda más corto que 0,55 μm . El Fe^{2+} a Fe^{3+} produce absorciones a 0,48 y 0,92 μm .

En la región del visible (0,4 a 0,7 μm) al infrarrojo próximo SWIR (0,7 a 2,5 μm), aparecen minerales con espectro de absorción característicos. En este caso las transiciones de vibración están asociadas a la presencia de ión hidroxilo OH y/o moléculas de agua. Esta última produce una fuerte absorción a los 1,4 y 1,9 μm . El ión hidroxilo OH muy frecuente en los silicatos absorbe a los 2,77 μm .

En el infrarrojo termal, región del espectro de 8 - 14 μm , los procesos vibracionales actúan en las estructuras moleculares de los silicatos, dando la configuración del espectro y permitiendo diferenciar las rocas silicatadas. El cuarzo presenta un mínimo de emisividad a 8,5 μm , mientras que la olivina a 10 μm . En esta banda es máximo el flujo térmico que emite la superficie terrestre, lo que permite diferenciar ciertos materiales. El estudio espectral de los minerales permite mediante técnicas Geomática la detección de minerales de alteración que son de alto interés a la hora de ubicar algunos yacimientos, acumulaciones de minerales y/o zonas de alteración hidrotermal. [11]

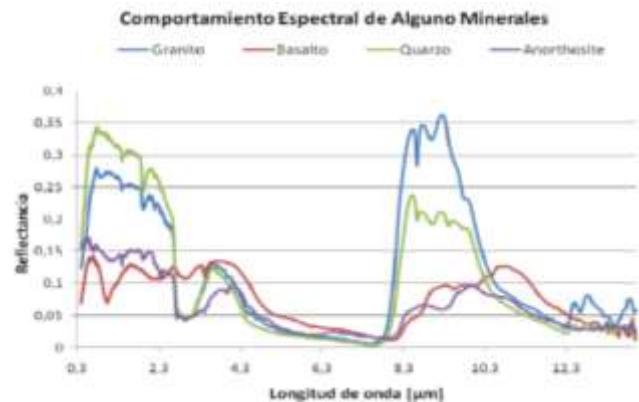


Fig. 8. Comportamiento espectral de algunos minerales. [12]

10. Comportamiento espectral del agua.

Las características más distintivas de la curva de reflectancia del agua, es que absorbe la energía incidente en la longitud de onda del infrarrojo próximo (0,7 a 1,3 μm) y medio (1,3 a 3,0). La reflectancia del agua es compleja y depende de diferentes factores interrelacionados entre sí. Por ejemplo, el espesor del cuerpo de agua (profundidad), contenido de materiales en suspensión y rugosidad de la superficie. [13]

La mayor reflectividad del agua se produce en el espectro del azul (0,4 a 0,5 μm) reduciéndose hacia el infrarrojo próximo (0,7 a 1,3 μm). Las variaciones del espectro de agua se detectan en las longitudes de onda más cortas del visible

(azul, 0,4 a 0,5 μm y verde, 0,5 a 0,6 μm). Aguas con grandes cantidades de sedimentos en suspensión y plancton, produce un aumento de la reflectancia en el visible. Además, la reflectancia del agua cambia con el contenido de clorofila. El aumento en el contenido de clorofila, producen una disminución de reflectancia en el azul, y un incremento en el verde. La nieve presenta un comportamiento espectral diferente del agua, con una reflectividad muy elevada en las bandas del visible reduciéndose hacia el infrarrojo próximo.

En resumen, hay muchas interrelaciones complejas en el espectro del agua y el monitoreo de la misma, puede ser muy bien utilizado en la determinación de diferentes elementos para diferentes disciplinas (biología, geología, mineralogía, ambiental entre otros).

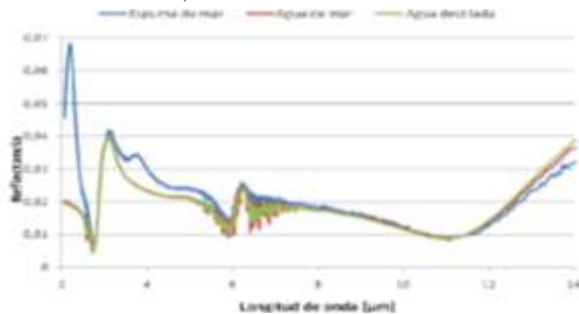


Fig. 9. Comportamiento espectral del agua. [14]

11. Sensores remotos

Los sensores son elementos idóneos para tomar, percibir o “sentar” una señal física proveniente del medio ambiente y convertirla en una señal de naturaleza “transducible”. De este modo un sensor o captador convierte las variaciones de una magnitud física en variaciones de una magnitud eléctrica o magnética. Los sensores proporcionan la información al control en forma de variables individuales del proceso. Las variables de estado del proceso son, por ejemplo, variables físicas como temperatura, presión, fuerza, longitud, ángulo de giro, nivel, caudal, entre otros. Hay sensores para la mayoría de estas variables físicas, que reaccionan con cada una de ellas y transfieren las correspondientes señales. [15]

12. Tipos de sensores remotos.

Existen dos clases de sensores remotos, los pasivos y los activos.

- **Sensores pasivos:** Están limitados a recopilar y almacenar la energía electromagnética emitida por las cubiertas terrestres, que son reflejadas por los rayos solares o provenientes de su propia temperatura. Estos sensores se clasifican en: sensores fotográficos (cámaras fotográficas), sensores óptico-electrónicos (exploradores de barrido y empuje, y las cámaras de vidicon), y los sensores de antena (radiómetros de microondas).

- **Sensores activos:** Tienen la capacidad de emitir su propio haz de energía, que luego de la reflexión sobre la superficie terrestre es recibido por el satélite. El sensor más conocido es el radar (radiómetro activo de microondas), el que puede trabajar en cualquier condición atmosférica. El otro sensor conocido es el Lidar.

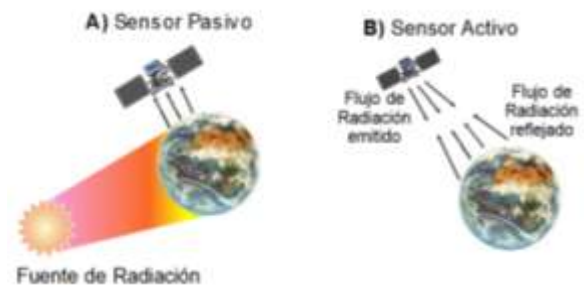


Fig. 10. Tipos de sensores remotos. [16]

13. Resolución de un sistema sensor.

La resolución de un sistema sensor como su habilidad para discriminar información de detalle; depende del efecto combinado de todos sus componentes físicos del sistema. En las imágenes satelitales se consideran los siguientes tipos de resolución:

- **Resolución espacial:** Es la capacidad que tiene el sensor de distinguir el objeto más pequeño sobre la imagen. Este objeto se visualiza en la unidad mínima de información representada en la imagen, al que se le denomina píxel (píxel: es un elemento de una imagen de dos dimensiones, el cual es el más pequeño e indivisible de una imagen digital).

- **Resolución espectral:** Es el poder que tiene un sensor para discriminar diferentes objetos (albedos) sobre la superficie terrestre. Está directamente relacionada con dos parámetros: 1) el valor del intervalo de longitudes de onda, y 2) la cantidad de bandas que el sensor puede registrar en el espectro electromagnético.

Cuando un sensor posee detectores operando en más de una banda del espectro electromagnético, el sistema se llama multispectral, porque registra la radiación electromagnética, en varias longitudes de onda o fajas espectrales. Cuando el sensor posee más de 100 bandas, el sensor es hiperespectral. Si los intervalos de bandas que se registran son anchos, la resolución espectral será grosera (mala), mientras que, si los intervalos son estrechos, la resolución espectral será fina (buena). Es decir, cuanto mayor es el número de bandas y menor el ancho del intervalo, mayor será la resolución espectral.

- **Resolución radiométrica:** Esta dada por el número de niveles digitales, representando niveles de grises captados por el sensor, es decir, la resolución radiométrica es la capacidad que tiene un sensor de poder discriminar albedos con diferencias de radiación reflejada o emitida (cantidad de niveles de grises). Cuando mayor es el número de niveles de grises, mayor es la resolución. Una imagen con dos niveles (blanco y negro) tendrá menos resolución que otra imagen con 3 niveles de grises entre el blanco y el negro. El número de niveles de grises que el sensor puede detectar depende de su sistema de grabación y se expresa en función de números binarios “bits”.

- **Resolución temporal:** Es la frecuencia o periodicidad con que el sensor adquiere imágenes de la misma área de superficie terrestre, siempre en función de las características orbitales del satélite (altura, velocidad e inclinación) y de las características del sensor.

14. Imagen digital.

Las imágenes obtenidas a partir de los sensores remotos son una representación digital de los objetos terrestres. Los datos de la imagen se almacenan en archivos de datos llamados “archivos de imagen”. Son sólo números y forman una imagen cuando se les ve sobre una pantalla, debido al carácter digital se le ve como una fotografía de tonos continuos de grises.

De forma generalizada, se define a una imagen digital como un arreglo de números que representa una distribución espacial de ciertos parámetros de campos, como la reflexión de energía electromagnética, emisión, temperatura, o alguna variable de elevación topográfica o geofísica. Una imagen digital está conformada por elementos pictóricos discretos denominados píxeles organizados en filas y columnas. Cada píxel tiene asociado un número denominado como Nivel Digital (ND), el cual representa la intensidad o brillo promedio de un área mínima relativa dentro de la escena, generalmente, el rango de niveles digitales va de 0 a 255. El tamaño de esta área mínima afecta considerablemente la captura de detalles terrestres dentro de la escena, si se reduce el tamaño de píxel se preservará mejor estos detalles terrestres en la imagen.



Fig. 11. Carácter digital de la imagen. [17]

15. Análisis visual de imágenes de satélite (composición color).

La técnica más utilizada para formar una composición en falso color, consiste en mezclar tres imágenes del mismo sitio y fecha correspondientes a distintas bandas, representando a cada una de ellas con alguno de los colores rojo, verde o azul. Los niveles digitales de cada banda, representables como una imagen monocromática, se combinan para formar otra imagen en colores.

Estos colores y tonos se emplean para la interpretación visual de las imágenes, combinando las bandas de manera que dar un primer acercamiento al contenido de la imagen. La combinación de colores permite discriminar aspectos geológicos, de vegetación, uso del suelo y morfología de zonas urbanas.

La mezcla de tres bandas espectrales para lograr el color puede realizarse por dos procesos aditivo y sustractivo. En el proceso aditivo el color se obtiene por la suma de los colores azul, verde y rojo. El proceso sustractivo se basa en la absorción de la luz que ejercen los colores complementarios.

El magenta absorbe la luz del verde, el amarillo el azul, y el cian el rojo. La suma del cian, amarillo y magenta forma el negro, mientras que la superposición de los colores primarios azul, verde y rojo forma el blanco. Utilizando los colores

primarios y secundarios, es posible obtener todas las tonalidades de los colores y representar cuantitativamente cualquier color como un grupo de tres números o coeficientes.



Fig. 12. Composición de colores. [18]

16. Redes neuronales artificiales.

Las Redes Neuronales Artificiales (ANN, Artificial Neural Networks), son definidas como un conjunto de redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples (usualmente adaptativos) y con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con los objetos del mundo real de mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico. [19]

Los sistemas y otros tipos de métodos de clasificación supervisada (por ejemplo, el enfoque Bayesiano no paramétrico, que está basado en la distribución de datos por el modelo composicional), son sistemas matemáticos adaptativos que cambia su estructura en función de la información externa o interna que fluye a través de la red durante la fase de aprendizaje. Las redes neuronales son generalmente utilizadas para modelar las relaciones complejas entre entradas y salidas o para encontrar patrones en los datos. La ventaja de los métodos que implican redes neuronales es que son de carácter general, es decir, pueden manejar los problemas que consisten en un gran número de parámetros, y pueden clasificar objetos, incluso si la distribución de los objetos en el espacio paramétrico N-dimensional es muy complejo. [20]

En la exploración de minerales, las clasificaciones de las redes neuronales artificiales implican la creación de conjuntos de entrenamiento basados en los datos geológicos, geofísicos y satelitales conocidos, con el fin de identificar las áreas prospectivas de minerales. Una de las mejores formas de caracterizar un territorio es utilizar algoritmos de aprendizaje supervisados con conjuntos de entrenamiento que consisten en mapas de contornos estructurales, mapas de contorno de formaciones geológicas de minerales. Estos conjuntos de entrenamiento forman un espacio de características Multi-dimensionales que incorpora toda la información antes mencionada. Las redes neuronales artificiales son entrenadas mediante algoritmos especiales para separar todo el volumen de datos del satélite (píxeles) dentro del espacio de características en un número finito de clases representativas del conjunto de entrenamiento.

17. SubTerrain exploration Prospecting (STeP®).

La tecnología de STeP®, está basada en el procesamiento temático de datos provenientes de sensores remotos combinados con sofisticadas técnicas matemáticas y analíticas,

y el procesamiento de mapas y datos geológicos y geofísicos.

Para ello se usan algoritmos y software propios, especializados en la cuantificación de los datos resultantes y generación de información importante acerca de la geología de un área determinada, las características y la composición mineral del subsuelo.

El método analítico STeP® posee una cantidad de análisis y procesos que se encuentran integrados en el análisis para el estudio de los minerales tales como: análisis geológicos, geomorfológicos, fotogeológico, geotermiales, litodinámico, espectrométrico y una red neuronal kohonen. [21]

Los análisis antes mencionados proporcionan información y datos generados como: geología de la zona de interés, diagénesis paleo ambiental, delineación de zonas con alteraciones de minerales, prognosis, diagnósticos del área, identificando las zonas con mayor prospectividad, profundidad exacta del yacimiento, delineación de los buzamientos y espesores, a través de informes analíticos y mapas cartográficos regionales 1:500.000 y locales 1:5000. [22]

IV. METODOLOGÍA

Son muchas las opciones que la ciencia ofrece al investigador, por una parte para orientar el conjunto de acciones que representa el esfuerzo del investigador en el afanoso compromiso de apropiarse de la teoría y declarar el tipo de investigación en el cual está trabajando, y por la otra parte, para orientar el plan de trabajo, o estrategia mediante la cual el investigador se relaciona con el contexto, entorno, ámbito o realidad, dentro de la cual analiza el fundamento teórico de la investigación. [23]

Tipo de Investigación

La investigación corresponde al tipo descriptiva, de acuerdo con el problema planteado y al objetivo establecido. Esta investigación consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. [24]

Diseño de la investigación

Establecido el punto anterior y considerando el mismo autor, el estudio es abordado por un diseño de investigación documental, definida como un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítico e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. En este sentido, la revisión de diferentes informes, proyectos, investigaciones y trabajo técnicos asociados a la tecnología STeP® permitió el análisis, la identificación y reconocimiento de la tecnología espacial a zonas de estudios para la exploración de minerales preciosos y estratégicos en sus diferentes ambientes sedimentarios.

V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En esta parte se presentaran los diferentes estudios realizados por la empresa Inversiones PETROCUM, CA y su empresa socia Terra Energy & Resource Technologies, Inc

(TERT) mediante la cual se puntualizan en el uso de la tecnología espacial con sensores remotos para la toma de información, selección de imágenes, análisis y procesamientos de data mining recolectada mediante selección y (técnicas de procesamiento de datos utilizada para la búsqueda de información oculta y patrones ocultos en un conjunto de datos) que incluyen redes artificiales neuronales Kohonen, (también conocida como mapas de auto-organización), además de técnicas de reconocimiento de patrones y lógica difusa para lograr resultados relacionados a la identificación de yacimientos de minerales preciosos y estratégicos.

El uso de los sensores remotos en especial el método analítico STeP® es elemental para determinar la utilización de la tecnología espacial y que permita mediante captación remota mediante los diferentes sensores disponibles el poder recolectar información en diferentes momentos y durante el tiempo requerido, para posteriormente mediante técnicas y algoritmos matemáticos realizar los diferentes modelamientos para la determinación de yacimientos de minerales con características homogéneas o heterogéneas.

No obstante, la tecnología STeP® la cual es desarrollada a nivel mundial, es novedosa por el hecho de permitir la cuantificación de reservas minerales preciosos, según estudios realizados por la empresa TERT, en diferentes partes del mundo en donde se han podido localizar minerales como (Oro, diamante, rubí) y estratégicos (Coltán, Uranio, Carbón, Cobre) permitiendo así una precisión que supera 90% su tasa de éxito. [25]

Análisis geológico con sensores remotos

Los mapas geológicos están basados en la diferencia en las características físicas y químicas de las rocas las cuales indican la diferenciación de la intensidad de la radiación solar reflejada, capturada usando sistemas satelitales que registran datos en el rango óptico (VNIR), bandas infrarrojas de corta longitud de onda (SWIR) y larga longitud de onda (TIR). Los espectroradiómetros más ampliamente usados para la adquisición de datos para la realización de mapas geológicos a mediana escala es recibida a través de los satélites Terra y LANDSAT.

Las imágenes compuestas RGB (rojo, verde y azul) son usadas para identificar las características de la estructura tectónica del territorio estudiado. Para ilustrar lo mencionado se considerará el estudio realizado en Djezkasgan [26], donde las imágenes compuestas de color seleccionadas permiten identificar rocas de diferente composición litológica.

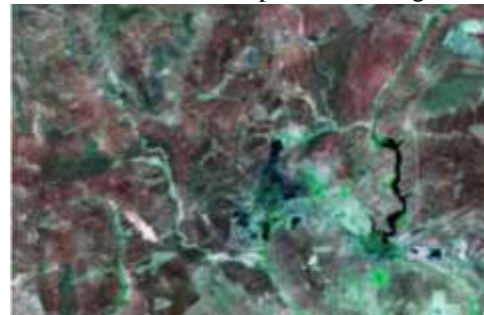


Fig. 13. Imagen satelital de un depósito de polimetales [26]

Las características técnicas de los datos satelitales de alta resolución y las capacidades de un software y hardware moderno ofrecen oportunidades únicas en el mapeo geológico en incluso amplias áreas a escalas mayores de 1:5.000. En combinación con la alta precisión de un modelo de elevación digital, el análisis de fotones, y las características cuantitativas y espectrales de litologías individuales ayudan a describir diversos afloramientos. Se consideran algunos factores visuales, estructurales, texturas, resistencia al desgaste o erosión, morfología de la superficie, espesores, y el carácter de aparición.

Estudios geomorfológicos con sensores remotos

La realización de mapas geomorfológicos permite la determinación de la estructura geológica. Imágenes multispectrales satelitales obtenidas en las sub-bandas infrarrojas óptica y cercana (VNIR) son analizadas en combinación con el modelo digital de elevación (DEM, Digital Elevation Model) desde el punto de vista geológico. Una reconstrucción tridimensional y una visualización de la superficie de la tierra a partir de data 3D como se muestra en la figura 14, el cual permite la interpretación de diversos elementos geomorfológicos y la determinación de sus características cuantitativas. El método es usado para identificar estratos horizontales, monoclinales y subverticales de las rocas, así como pliegues anticlinales y sinclinales.

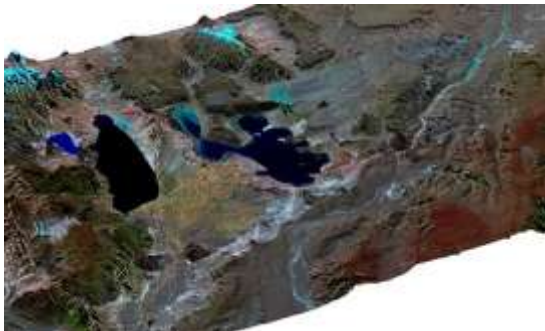


Fig. 14. Flanco norte de la cuenca del Golfo de San Jorge en 3D. [27]

Los verdaderos valores de elevación de la superficie son registrados en archivos de datos asociados al modelo digital de terreno (DTM, Digital Terrain Model) los cuales trazan líneas estructurales de relieve (corrientes, líneas de cuencas de agua, bordes de acantilados, puntos vértice y apoyo, líneas de pendientes de pliegue, líneas de marca de agua, y otros, es decir, los elementos del relieve directamente indicativos de la estructura geológica del área) y son preferibles especialmente en las aplicaciones geológicas.

Influencia en la reducción de vegetación

En adición a la utilidad de la información geológica provista por rocas expuestas proporcionan información geológica, la estructura geológica puede también ser inferida por los patrones de vegetación, estos indicadores geobotánicos dependen de la especie de planta. Las características espectrales de la vegetación son afectadas por la composición litológica de las rocas y el ambiente geoquímico.

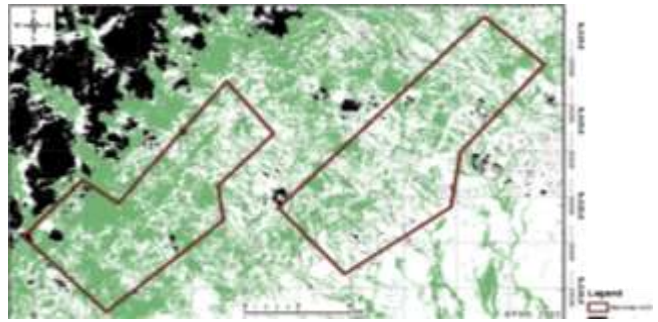


Fig. 15. Cobertura de nubes y vegetación. [28]

Esto afecta también el potencial de reducción-oxidación y el pH del suelo. Estos cambios se manifiestan como alteraciones de la mineralogía del suelo, tales como la formación de nuevos minerales (calcita, pirita y uranio), mediante el descoloramiento de los afloramientos de capas rojas mediante cambios electroquímicos.

A su vez, estas permutaciones se reflejan en la salud o el tipo de vegetación que rodea a una filtración de gas. No solo se agota el oxígeno presente en el suelo, sino que los cambios concomitantes producidos en la solubilidad de los nutrientes del suelo se traducen en una deficiencia o exceso de los nutrientes absorbidos por las plantas. Estos efectos se pueden registrar en la respuesta espectral de la planta, detectada por los sensores ópticos del satélite.

Fotogeología

La fotogeología puede ser definida como el uso de fotografías aéreas y de satélite en las ciencias geológicas del subsuelo y sus características estructurales. El reconocimiento de características específicas en las fotografías se define como lectura y la comprensión de su significado individual o colectivo cómo interpretación. [29]

La interpretación fotogeológica (o interpretación visual) es el análisis y comprensión avanzada de la geología de un área, basada principalmente en la información derivada de un estudio de fotografías aéreas y de satélite. [30]

Los objetivos principales de los estudios de fotogeología es la construcción de un esquema estructural de la tectónica de la región. A través de información obtenida con imágenes satelitales Landsat 7 ETM +, Landsat 5 TM, Terra Áster y radar SRTM v4.0 también se han utilizan como fuentes auxiliares. En el caso de los estudios de CBM (Coal Bed Methane) en el subsuelo, se necesita conocer los criterios estructurales del área, esto es debido a que se puede conocer los ángulos de buzamiento, y los paquetes de mantos de carbón contenidos en el subsuelo. Como lo muestra la figura 16 en el proyecto denominado sinclinal Manuelote, bloque guasare en Venezuela.

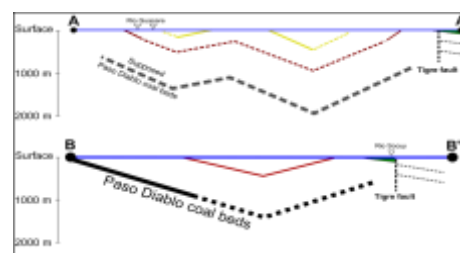


Fig. 16. Deposición de una sección cruzada de CBM. [31]

Mapeo geotermal con sensores remotos.

Los mapas geotermales son una herramienta única utilizada para localizar anomalías de (relativo al ambiente que la encierra) flujos de calor. El resultado depende generalmente de la radiación térmica intrínseca y reflejada de la Tierra, la atmósfera, la temperatura de diferentes ambientes físicos, y su emisividad espectral. Los sensores térmicos graban una señal, de un componente en particular el cual sólo depende de la longitud de onda, por tanto, no depende de las coordenadas espaciales, ya que está asociada con la radiación atmosférica, lo que es una combinación de las contribuciones de diferentes niveles, diferentes alturas y variadas temperaturas.

El resultado de la delineación de las zonas con anomalías geotermales (flujo de calor) mediante el uso de sensores remotos se puede llegar a conclusiones importantes relacionadas con el régimen geodinámico del territorio. Las regiones con anomalías de temperaturas positivas indican la presencia de canales de alta conductividad térmica. En la mayoría de los casos, estos canales son zonas de desprendimiento de la corteza terrestre, los cuales son áreas de fracturamiento intenso (característico de los sitios de intersecciones de los lineamientos, unidos en bloques de corteza, estructuras locales y anomalías tectónicas). Por lo general, estas zonas se consideran "controladoras" con respecto a eventos de deposición mineral en un área dada. Las áreas de bajas temperaturas a menudo corresponden a la descarga de los acuíferos subterráneos con apariciones de rocas con baja conductividad térmica.

El análisis se basa en el algoritmo original que calcula las características de temperatura diferencial para el área de interés, y se realiza en cuatro etapas:

Etapa 1: El pre-procesamiento estándar de datos infrarrojos satelitales incluyendo correcciones geométricas (registro y ortorrectificación) y radiométrica (datos de conversión de radiación, aproximación y remoción de los aportes atmosféricos a partir de radiancia termal e infrarroja).

Etapa 2: Conversión de emisividad y temperatura (separación de la información de emisividad y temperatura a partir de los datos de radiancia medidos por sensores de infrarrojo termal) y el ajuste de la imagen.

Etapa 3: Análisis de series de temperatura a largo plazo. La empresa utiliza una metodología para determinar la intensidad del flujo de calor endógeno de la Tierra. El modelo implica:

- (i) Mapeo de flujo de calor y temperatura utilizando una serie de datos satelitales obtenidos durante las diferentes épocas del año;
- (ii) Sustracción del flujo de calor total de los componentes constantes, causados por la radiación promedio solar anual;
- (iii) Separación del campo de temperatura residual en los componentes cíclicos y constantes. El componente cíclico es causado por las variaciones estacionales de temperaturas, y el componente no periódico es debido al flujo de calor endógeno profundo. El resultado del estudio se presenta como un mapa de la distribución del flujo de calor causado por las características de la estructura tectónica del área de interés. El coeficiente de correlación entre el componente cíclico del flujo de calor y la función armónica (que se estima por el

método de los mínimos cuadrados) es una medida de la fiabilidad de los valores de flujo de calor resultante.

- (iv) Separación de los componentes no periódicos del flujo de calor en los componentes regionales y locales.

Etapa 4: La interpretación geológica del mapa de distribución de flujo de calor de obtenido en la Etapa 3 junto con los otros tipos de análisis, tales como los mapas de lineamientos y estructuras circulares. Las zonas donde el flujo de calor anómalo se correlaciona con las ubicaciones de las estructuras circulares, áreas de alta concentración de lineamiento (o sus características espaciales), así como otras características geológicas y anomalías que están asociadas a una elevada actividad tectónica.

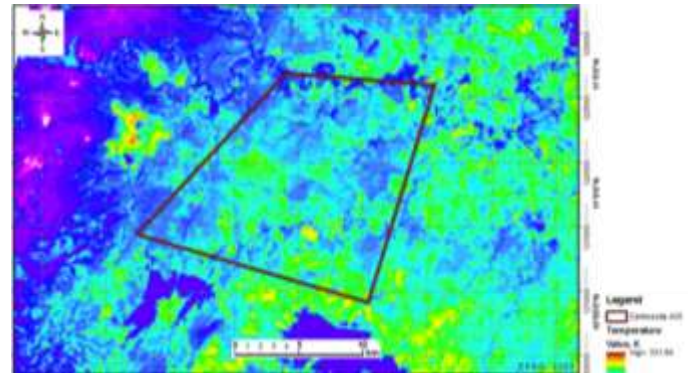


Fig. 17. Mapeo geotermal. [32]

Análisis Litodinámico

Los mapas de litodinámicos son mapas de flujos que muestran el desplazamiento del geo-medio en el espacio, en planos horizontales (cortes). A través de sus patrones, los mapas reflejan la historia geológica del territorio en términos de la sucesión de los estratos geológicos. La transición de estratos pasa a través de los puntos de bifurcación. Por lo tanto, los patrones del relieve plástico representan el sistema de referencia físico-geométrico para la distribución de los cuerpos geológicos. Las características de este método sirven como un principio fundamental en la localización de las concentraciones de oro, rubí y granito en el área, tal como se visualiza en la figura 18.

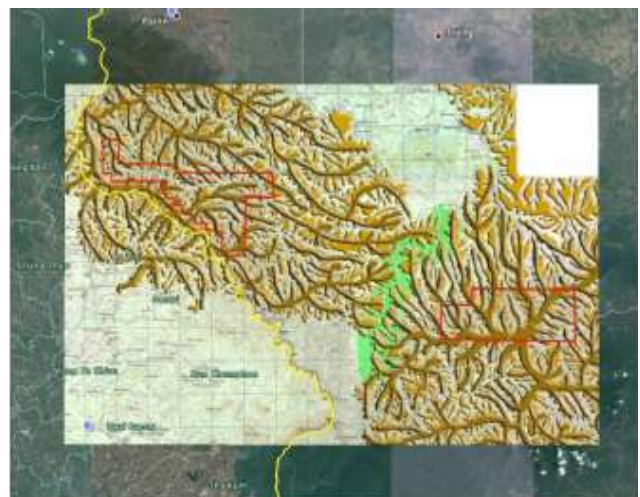


Fig. 18. Mapa regional litodinámico con patrones de flujo. [33]

Identificación de estructuras circulares.

Las estructuras circulares reflejan zonas profundas tectónicamente activas, las cuales constituyen los límites de los depósitos minerales. Los mapas de litodinámicos revelan estructuras prospectivas en superficies virtualmente planas. A través del estudio de geomorfología y el análisis geológico se correlacionan las estructuras circulares con el método litodinámico utilizando tanto imágenes satelitales como mapas de redes hidrográficas. [34] En el análisis litodinámico estas estructuras se pueden clasificar básicamente en ocho tipos. Ver. Figura 19.

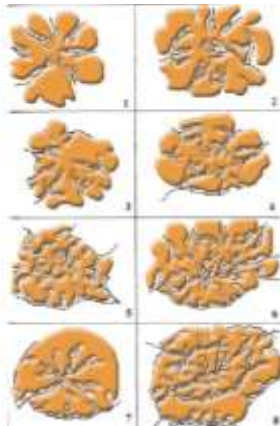


Fig. 19. Clasificación de estructuras litodinámicas. [35]

La identificación de zonas prospectivas a través de estructuras circulares en la búsqueda de minerales preciosos o estratégicos es de vital importancia ya que esas se encuentran asociados a grandes depósitos de minerales. Ver figura 20.

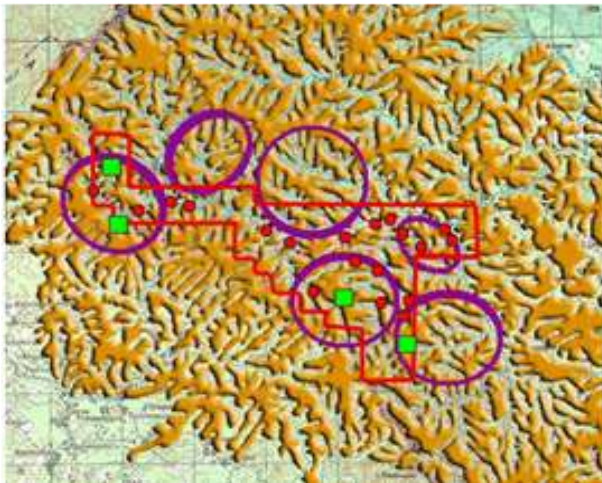


Fig. 20. Mapa regional litodinámico. Identificación de estructuras circulares. [36]

Es importantes mencionar que las zonas de mayor probabilidad de acumulación de minerales se correlacionan con el análisis Espectrométrico para confirmar dichas estructuras.

Análisis Espectrométrico.

El principio de fundamental del análisis Espectrométrico, podría ser descrito de la siguiente manera: la estructura

geológica del subsuelo se manifiesta en patrones de imágenes espectrales discernibles en superficie. las características geológicas de los patrones superficiales y de subsuelo existe debido a las oscilaciones acústicas extremadamente bajas (microsisimos) de acumulaciones de sustancias ubicadas a profundidad las cuales son excitadas por la energía que emana del núcleo de la Tierra. Figura 21. [37]

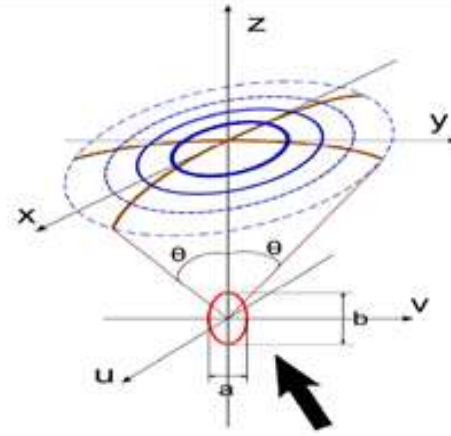


Figura 21. Emisión sísmica primaria (flecha negra), esparcida por inconfirmdad geológica (elipse roja) en medio geológico que se caracteriza por anisotropía "a", b. [38]

Cada partícula en el subsuelo vibra (amplitud de varias micras) bajo la influencia de la energía procedente de núcleo de la Tierra (incluyendo la radiación microsísmica que es bien conocido en geología general) y a su vez emite la energía de baja potencia secundaria, aparentemente acústica, propagándose hasta la superficie en forma de un cono de 72 °. identificando así los depósitos de minerales, como lo muestra la figura 16. [39]

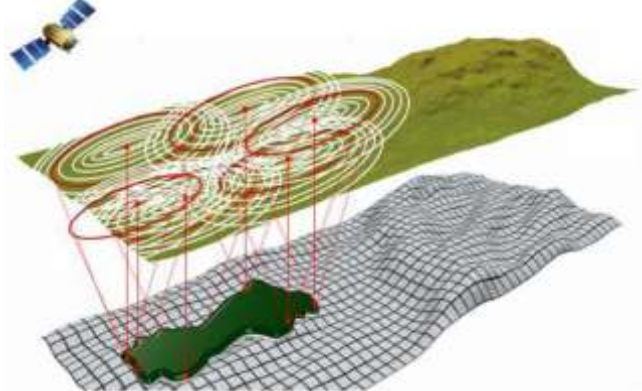


Fig. 22. Ilustración de Anomalías identificadas por propiedades espectrométricas. [40]

Aunque la propagación de estas estructuras juega un papel importante, estas se correlacionan e integran con redes neuronales matemáticas denominados Geo informatics anomalies, (GIA), las cuales se han desarrollado para descubrir acumulaciones de depósitos de minerales. Las GIA se calculan utilizando una base algorítmica propia, [41] que procesan las diferentes imágenes que se producen en diferentes canales espectrales de las zonas prospectivas.

Cada espectro es un canal, lo cual se combina de múltiples maneras, mediante una base algorítmica. Esa información algorítmica generada se denomina GIA. Cada GIA está

representado por cada pixel de una imagen de manera particular. El resultado de las múltiples combinaciones espectrales a través de los canales va generando estructuras con características circulares, así como se ilustra en la figura 23.

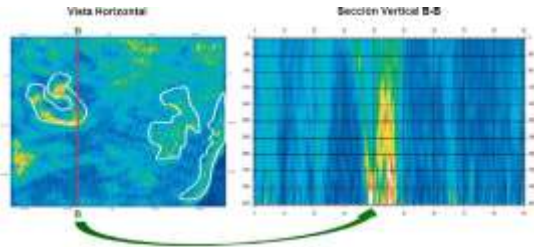


Fig. 23. GIA y su sección transversal vertical. [42]

En muchas áreas de estudios las estructuras circulares no son círculos con formas ideales, sino que son formas distorsionadas con radios de diferentes tamaños que van desde metros a kilómetros. Los depósitos minerales con caídas y cambios importantes en la profundidad de los cuerpos mineralizados y reservorios saturados son especialmente difíciles de diagnosticar. A través de algoritmos basados en redes neuronales se puede corregir dicha dificultad y así conocer la profundidad exacta del depósito.

Los depósitos de minerales se pueden localizar a través del estudio de espectrometría visualizada en las imágenes de sensores remotos, este estudio puede ejemplificarse mediante el proyecto exploratorio realizado en el reino de Camboya en el año 2010. Tal como se muestra en la figura 24.

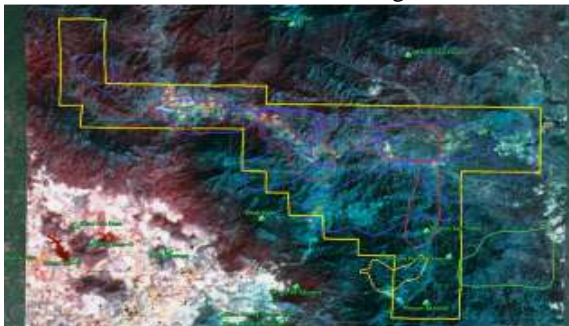


Fig. 24. Delineación de estructuras circulares para minerales (Oro y Rubí) a través de espectrometría. [43]

Estos estudios confirman los resultados obtenidos a través de los métodos geológicos, fotogeológico y litodinámico tal como puede observarse al integrar toda la información en una imagen, que muestra el ejemplo citado, y visualizado en la figura 25.



Fig. 25. Confirmación por espectrometría, zonas con depósitos de Oro, Rubí y otros minerales. [44]

El procesamiento de las imágenes da paso a la delineación de la anomalía de depósitos de minerales preciosos, coloreando así todo el yacimiento o el reservorio, (figura 25) separando cada depósito por mineral e identificando la profundidad exacta y su concentración. (figura 26).



Fig. 26. Sector 2. Concentraciones de minerales preciosos (gemas) gr/ton. [45]

VI. CONCLUSIONES

La explotación minera es uno de los mercados de mayor importancia a nivel mundial, en el caso de la República Bolivariana de Venezuela el aumento y cuantificación de reservas de minerales preciosos (Oro, Diamante) y estratégicos como Coltán, Carbón, Cobre, son de vital importancia para apalancar el desarrollo del proyecto arco minero, y así minimizar costos de inversión, desarrollo, impacto ambiental y aumentar la tasa de éxito para proyectos futuros.

Por tal motivo, el desarrollo de la tecnología espacial permite el avance de estudios multidisciplinarios los cuales dan respuestas científicas, técnicas y operativas en la identificación y cuantificación de recursos de minerales preciosos y estratégicos. Desde la década de 1950, comienza la era espacial, miles de vehículos espaciales han sido lanzados al espacio equipados con instrumentos y equipos para realizar innumerables misiones, cada uno con propósitos específicos que proveerá datos globales de suma importancia para el progreso de la humanidad. Hoy en día, su aplicación en la obtención de información que permita el análisis de los recursos naturales, minerales e hidrocarbúricos, le suma auge al desarrollo espacial.

La tecnología STeP® tiene la capacidad exclusiva de predecir la ubicación exacta, profundidad, espesor y estimación de los volúmenes (gr/ton) de depósitos de minerales acumulados en el subsuelo, al integrar varios métodos y técnicas analíticas computacionales y de interpretación de información proveniente de sensores remotos.

STeP® identifica objetivos precisos con una tasa de éxito superior al 90%, minimizando el impacto ambiental en el momento de la explotación, lo que añade satisfacción y aceptación por las empresas de la minería y a los estados que se encuentran comprometidos con el medio ambiente implementando así, el uso de técnicas y análisis del subsuelo, partiendo de información proveniente con tecnologías no invasivas como los sensores remotos para su desarrollo.

STeP® mediante de los resultados obtenidos proporciona información a través de mapas cartográficos con escalas regionales 1:250.000 a locales 1:5.000 con información detallada de los minerales a explotar.

REFERENCIAS

- [1] Institute of New Technologies of Russian INT (2002)
- [2] Fivensky Y, (2002). Small circular structures (SCS) of unconsolidated sediments of the earth's crust.
- [3] Manual de Sensores remotos. Inversiones PETROCUM.CA (2012).
- [4] Pérez J Daniel. Introducción a los sensores remotos – aplicaciones en geología 2007. Pag. 3.
- [5] Pérez J Daniel. Introducción a los sensores remotos – aplicaciones en geología 2007. Pag. 4.
- [6] Hernández (2011)
- [7] Pérez J Daniel. Introducción a los sensores remotos – aplicaciones en geología 2007. Pag. 15.
- [8] Fuente: Pérez J Daniel. Introducción a los sensores remotos – aplicaciones en geología 2007. Pag. 16.
- [9] Fuente: Hernández (2011)
- [10] Riaza, A., Mediavilla, R., and Santisteban, J.I., “Mapping geological stages of climate-dependent iron and clay weathering alteration and lithologically uniform sedimentary units using Thematic Mapper imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, 21-5, 937-950. 2000.
- [11] Riaza, A., Mediavilla, R., and Santisteban, J.I., “Mapping geological stages of climate-dependent iron and clay weathering alteration and lithologically uniform sedimentary units using Thematic Mapper imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, 21-5, 937-950. 2000.
- [12] Hernández (2011)
- [13] Riaza, A., Mediavilla, R., and Santisteban, J.I., “Mapping geological stages of climate-dependent iron and clay weathering alteration and lithologically uniform sedimentary units using Thematic Mapper imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, 21-5, 937-950. 2000.
- [14] Hernández (2011)
- [15] Peguero C. (2016). Teledetección y sistemas de información geográfica. Geo-conservación, protección ambiental y del medio físico frente a riesgos y catástrofes naturales. Onu-ge@ 21 recursos naturales. España.
- [16] Pérez J Daniel. Introducción a los sensores remotos – aplicaciones en geología 2007. Pag. 19.
- [17] Pérez J Daniel. Introducción a los sensores remotos – aplicaciones en geología 2007. Pag. 17
- [18] Pérez J Daniel. Introducción a los sensores remotos – aplicaciones en geología 2007. Pag. 15.
- [19] Kohonen T. (1988). An introduction to neural computing, *Neural Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 3–16.
- [20] Geoinformática – redes neuronales artificiales. Manual de Inversiones PETROCUM.CA (2012). Pag. 16.
- [21] Descripción de la tecnología STeP. Manual de Inversiones PETROCUM.CA (2012). Pag. 3
- [22] Entrega de análisis y productos cartográficos. Manual de Inversiones PETROCUM.CA (2012). Pag. 55.
- [23] De Berríos O.; y Briceño de Gómez, M. (2009) Enfoques epistemológicos que orientan la investigación de 4to. Nivel. *Revista Visión Gerencial. Edición Especial. Venezuela.*
- [24] Arias F. (2012). *El Proyecto de Investigación, introducción a la metodología científica*. Sexta Edición. Editorial. Episteme C.A, Caracas.
- [25] Proyecto Cambodia (2010). Estudio Prospectivo para la identificación de minerales preciosos (Oro y Rubí) en el Bloque Millenium en el Reino de Cambodia.
- [26] Bloque de Djezkasgan. Análisis geológico (2012). Pag. 24.
- [27] Bloque Golfo San Jorge. Argentina 2011. Estudio geomorfológico. (2012). Pag. 26.
- [28] Proyecto Barinitas las lomas Uzcategui. Compuesto RGB (bandas Red, Green, Blue) Landsat TM y ETM+. Inversiones PETROCUM.CA (2016). Pag. 102.
- [29] Smith, Manual de Fotogeología. 1953.
- [30] Miller, Manual de Fotogeología. 1961.
- [31] Proyecto Sinclinal Manuelote, Guasare. Estudio Prospectivo para la identificación de CBM (Coal Bed Methane) en el Bloque Guasare en Venezuela. Inversiones PETROCUM.CA. 2016. pag. 132.
- [32] Proyecto Sinclinal Manuelote, Guasare. Datos TIR landsat para el estudio geotermal. Inversiones PETROCUM.CA (2016). Pag. 211.
- [33] Proyecto Cambodia (2010). Estudio Prospectivo para la identificación de minerales preciosos (Oro y Rubí) en el Bloque Millenium en el Reino de Cambodia. Terra Energy & Resource Technologies, Inc Pag. 42.
- [34] I.N. Stepanov en el manual de estructuras litodinámicas (2006). Pag. 39.
- [35] I.N. Stepanov en el manual de estructuras litodinámicas (2006). 1. domo simple; 2. domo con centro diferenciado; 3. domo con la parte inferior plana; 4. domo con superficie diferenciada; 5. domo-círculo con centro bruscamente levantado; 6. círculo, complicado por una falla secante y formas de domo asociadas; 7. círculo simple; 8. círculo complejo. Pag. 39.
- [36] Proyecto Cambodia (2010). Estudio Prospectivo para la identificación de minerales preciosos (Oro y Rubí) en el Bloque Millenium en el Reino de Cambodia. Terra Energy & Resource Technologies, Inc Pag. 45.
- [37] Manual de análisis de anomalías espectrométricas. Inversiones PETROCUM CA. Pag. 50.
- [38] Manual de análisis de anomalías espectrométricas. Inversiones PETROCUM CA. Pag. 115.
- [39] Manual de análisis de anomalías espectrométricas. Inversiones PETROCUM CA. Pag. 114.
- [40] Manual de análisis de anomalías espectrométricas. Inversiones PETROCUM CA. Pag. 114.
- [41] Patente. Numero 02-D / 02, 2002. Russian geologist.
- [42] Manual de análisis de anomalías espectrométricas. Inversiones PETROCUM CA. Pag. 122.
- [43] Proyecto Cambodia (2010). Estudio Prospectivo para la identificación de minerales preciosos (Oro y Rubí) en el Bloque Millenium en el Reino de Cambodia. Terra Energy & Resource Technologies, Inc Pag. 52.
- [44] Proyecto Cambodia (2010). Estudio Prospectivo para la identificación de minerales preciosos (Oro y Rubí) en el Bloque Millenium en el Reino de Cambodia. Terra Energy & Resource Technologies, Inc Pag. 71.
- [45] Proyecto Cambodia (2010). Estudio Prospectivo para la identificación de minerales preciosos (Oro y Rubí) en el Bloque Millenium en el Reino de Cambodia. Terra Energy & Resource Technologies, Inc Pag. 87.



Javier de J. Salazar. Nacido en Cabimas, Estado Zulia, en la República Bolivariana de Venezuela. En 2005 recibió el título de Técnico Superior en Hidrocarburos, Mención Petróleo, en el Instituto Universitario Tecnológico de Cabimas. En el año 2014 recibió el título de Ingeniero en Petróleo, en la Universidad del Zulia.

En el 2016 realizó su especialización de Geomática y cartografía aplicada a la Geociencia en el Instituto de Ingeniería para la investigación y Desarrollo Tecnológico en Caracas. Actualmente está realizando una Maestría en Gerencia de Innovación aplicado a nuevas tecnologías en la Universidad del Zulia.

El Ing. Javier Salazar en el año 2010 inicia su carrera en la investigación aeroespacial aplicado a las imágenes de sensores remotos para la búsqueda de hidrocarburos y minerales en el laboratorio GIS de la empresa (TIS). En el año 2012 Ocupó el cargo de Integrador GIS en el departamento de integración de resultados cartográficos en la empresa IPC (Inversiones Petrocum ca). Desde el año 2015 ocupa el cargo de CEO de exploración y producción en IPC hasta la actualidad. Del mismo modo es asesor y consultor, conferencista internacional, desempeña actividades de investigaciones con participación constante en eventos académicos-técnicos con presentaciones y publicaciones de trabajos de investigación y técnicos en material de hidrocarburos y minería.



Germán J. Márquez nacido en Caracas Distrito Capital de la República Bolivariana de Venezuela. Recibe en el año 2007 el título de Ingeniero de Petróleo en la Universidad del Zulia. Así mismo realiza una Maestría en Geología Petrolera en la misma casa de estudio, titulándose en marzo del 2010. Realizo

Doctorado en Ciencias Gerenciales en la Universidad Rafael Belloso Chacín, alcanzando sus méritos en noviembre del 2011, continúa su formación académica y para enero del 2013 recibe el certificado del post doctorado en Gerencia Pública y Gobierno en la misma Universidad. En la actualidad realiza un postdoctorado en ciencias Humanas en la Universidad del Zulia.

El Dr. Márquez, labora desde mayo del 2008 para el Ministerio del Poder Popular de Petróleo, desempeñándose como profesional II, con cargo de ingeniero de petróleo adscrito a la Dirección General Maracaibo. Del mismo modo es docente asociado tiempo convencional en la Universidad del Zulia, Núcleo Costa Oriental del Lago, en el programa de ingeniería desde agosto del 2008, desempeñando actividades de docencia e investigación con participación constante en eventos académicos-técnicos con presentaciones y publicaciones de trabajos de investigación y técnicos.