



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Identificación de depósitos de Hierro en
Sierra Leona, África con técnicas de
Percepción Remota**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Gerardo Díaz Rodríguez

DIRECCIÓN DE TESIS

Dra. Rosa María Prol Ledesma



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Rosa María Prol Ledesma por su apoyo, motivación y disponibilidad antes y durante de la elaboración de este trabajo.

A la Dra. Claudia Arango Galván, el Ing. José Luis Arcos Hernández, al Dr. Aldo Ramos Rosique y a la M.C. Alejandra Membrillo Abad por su interés para la elaboración de esta tesis y sus observaciones aportadas.

A mi padre Rosendo por mostrarme la diferencia entre lo que es fácil y lo que es correcto.

A mi madre Sonia por apoyarme en los momentos que más lo necesitaba.

A mis colegas de carrera que compartieron conmigo muchas experiencias.

A Dios por darme la oportunidad de estudiar en la Máxima Casa de Estudios.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA
OFICIO/FING/DICT/1135/2017

SR. GERARDO DÍAZ RODRÍGUEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento que la opción de titulación: **POR TESIS**, así como el tema y contenido propuestos por la **Dra. Rosa María Prol Ledesma** en calidad de **Directora de Tesis**, han sido aprobados por el comité de titulación de la carrera de **Ingeniería Geofísica** y se muestran a continuación:

IDENTIFICACIÓN DE DEPÓSITOS DE HIERRO EN SIERRA LEONA, ÁFRICA CON TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA.

	RESUMEN
	ABSTRACT
I	INTRODUCCIÓN
II	DEPÓSITOS DE HIERRO
III	ÁREA DE ESTUDIO
IV	METODOLOGÍA
V	RESULTADOS
	DISCUSIÓN DE RESULTADOS
	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFÍA

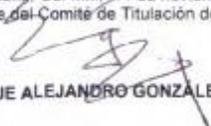
Por otra parte, le comunico que le ha sido asignado el siguiente jurado que tendrá como función básica, avalar su trabajo escrito y autorizar la réplica oral requerida para la obtención del título profesional, de acuerdo al Reglamento de Opciones de Titulación vigente.

PRESIDENTE:	DRA. CLAUDIA ARANGO GALVÁN
VOCAL:	DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA
SECRETARIO:	ING. JOSÉ LUIS ARCOS HERNÁNDEZ
1ER. SUPLENTE:	DR. ALDO RAMOS ROSIQUE
2DO. SUPLENTE:	M.C. ALEJANDRA MEMBRILLO ABAD

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de Administración Escolar, en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar del trabajo escrito, el título de este.

Asimismo, le recuerdo que para optar por el título profesional, es necesario haber acreditado el 100% de los créditos establecidos en el plan de estudios, haber realizado el Servicio Social de acuerdo con la Legislación Universitaria y haber aprobado el examen de comprensión de lectura de un idioma extranjero, en términos de lo dispuesto por el Consejo Técnico.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 14 de noviembre de 2017
El Presidente del Comité de Titulación de Ingeniería Geofísica


DR. ENRIQUE ALEJANDRO GONZÁLEZ TORRES

ccp Coordinador de la Carrera
ccp Interesado



RESUMEN.....	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. ANTECEDENTES.....	8
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	13
1.4. OBJETIVOS.....	15
2. DEPÓSITOS DE HIERRO.....	16
2.1. PROCESOS Y PERIODOS DE FORMACIÓN	18
2.2. MECANISMOS DE OXIDACIÓN Y DEPOSICIÓN DE LAS BIFS	25
2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS BIFS	26
2.4. GEOLOGÍA Y TECTÓNICA DE LAS FORMACIONES DE HIERRO.....	30
3. ÁREA DE ESTUDIO	32
3.1. LOCALIZACIÓN.....	32
3.2. HIDROGEOGRAFÍA	32
3.3. GEOLOGÍA REGIONAL	35
3.4. LITOLOGÍAS PRINCIPALES.....	38
3.5. TECTÓNICA.....	41
3.6. GEOLOGÍA LOCAL DE TONKOLILI	47
3.7. GEOLOGÍA LOCAL DE MARAMPA.....	48

4. METODOLOGÍA	51
4.1. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA.....	51
4.1.2. HISTORIA	51
4.1.3. PRINCIPIO FUNDAMENTAL.....	52
4.2. ASPECTOS FÍSICOS	53
4.3. ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN	57
4.4. TÉCNICAS UTILIZADAS DE PERCEPCIÓN REMOTA	65
4.5. PROCESAMIENTO.....	68
5. RESULTADOS	72
5.1. COMPOSICIÓN A COLOR.....	72
5.2. COCIENTES DE BANDAS.....	75
5.3. COMPOSICIÓN A COLOR CON COCIENTES DE BANDAS.....	81
5.4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	83
5.5. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES CON COCIENTES DE BANDAS	84
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	93
7. CONCLUSIONES	94
REFERENCIAS:.....	96

RESUMEN

En este trabajo se presenta una aplicación de la percepción remota como una técnica de exploración geofísica de reconocimiento bastante rentable y eficaz al brindar información de regiones distantes con interés minero.

Debido a la Guerra Civil que afectó a Sierra Leona de 1991 al 2002 el resurgimiento minero de Sierra Leona se ha enfocado únicamente en el restablecimiento de minas cerradas y en la explotación de reservas previamente probadas, es por esto que el objetivo principal de este trabajo es localizar depósitos de hierro en los distritos de Marampa y Tonkolili de Sierra Leona en regiones donde no se han llevado a cabo estudios exploratorios con anterioridad (hasta el año 2010), para esto se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 del sensor TM.

Para cumplir con el objetivo propuesto se llevaron a cabo dos metodologías diferentes de realce espectral: la **composición a color** con **cocientes de bandas** y el **análisis de componentes principales** con cocientes de bandas. Se han comparado ambos resultados a fin de obtener un mapa que delimite zonas **con mineralización expuesta de óxidos de hierro** y permita asociarlas con la geología regional de la zona de estudios para finalmente incluir vías de acceso para comprobación de campo y exploración a detalle.

ABSTRACT

In this work, remote sensing is used as a geophysical reconnaissance technique, which is quite profitable and effective in providing information from distant regions for mining interest.

Due the Civil War that has affected Sierra Leone from 1991 to 2002, Sierra Leone's mining resurgence has focused only on restoration of closed mines and the exploitation of previously proven reserves. Thus, the main objective of this work is to locate iron ore deposits in the districts of Marampa and Tonkolili of Sierra Leone in regions where previous exploratory studies have not been carried out (until 2010); to do this, Landsat 5 multispectral satellite images of the TM sensor were used.

To accomplish the proposed objective, two different spectral enhancement methodologies were carried out: **color composition** with **band ratios** and **the Principal Component Analysis** (PCA) applied to band ratios, both results were compared to obtain a map that delimits areas with exposed mineralization of iron oxides and allow us associate them with the regional geology so that access roads are available for field checking and detailed exploration is feasible

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Sierra Leona se convirtió en una república independiente en 1961, después de haber sido un protectorado británico desde 1896 y bajo una administración británica desde 1787. Es un país rico en recursos naturales, con abundantes lluvias y suelos fértiles que aseguran la capacidad de producción de una amplia variedad de productos agrícolas. Su amplia base de recursos minerales fue reconocida rápidamente por el Servicio Geológico de Sierra Leona en la década de 1920 y 1930, el cual ha apoyado un intenso sector minero desde esa época. Después de la independencia en la década de 1960 los diamantes y los depósitos de hierro eran los pilares de la economía y, posteriormente, la bauxita y el rutilo también se añadieron a la lista (Roger, 2003).

Sierra Leona es un país de África Occidental, se caracteriza por tener un ambiente tropical que comprende mesetas, llanuras, sabana, bosques, desiertos y selvas tropicales. Asimismo, este país se caracteriza por tener un alto potencial minero. Los principales minerales que se extraen son diamantes, rutilo y oro, así como rocas de interés económico como bauxitas, limonitas y depósitos de hierro.

Existen tres tipos de depósitos de hierro: hierro de pantano, “*ironstones*” y formaciones de hierro bandeado (comúnmente conocidos como “*BIF*”, por sus siglas en inglés), siendo estos últimos los de mayor importancia para la elaboración de este trabajo. La fuente y los procesos de formación de hierro bandeado del precámbrico han estado a debate por varias décadas; sin embargo, la teoría más aceptada es que el agua profunda de los océanos

podría haber contenido una concentración razonablemente grande de Fe^{2+} en solución, y que la circulación puso en contacto el agua profunda con una atmósfera moderadamente oxigenada dando lugar a la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} seguida por la precipitación de hidróxido férrico (Holland, 1973).

El hierro ferroso en solución es altamente susceptible a la oxidación, principalmente debido a su reacción con rocas, la dilución por aguas meteóricas¹ y el efecto de buffer químico² de los carbonatos y silicatos (Harnmeijer, 2003). Por lo tanto, parece poco probable que en cualquier lugar en la historia de la Tierra el hierro haya podido ser transportado en presencia del oxígeno libre. La movilidad del hierro aumenta enormemente en la ausencia de oxígeno libre. La forma oxidada del hierro, Fe^{3+} es extremadamente insoluble en agua en condiciones naturales; solamente en soluciones muy ácidas, como las descritas por Zelenov (1958) del volcán Ebeko, donde puede alcanzar concentraciones significativas. Con un pH mayor a 4, su concentración verdadera en solución³ puede ignorarse ya que su concentración es muy baja. La literatura sostiene que el hierro de las formaciones bandeadas de hierro es transportado en solución en el estado de hierro (II) como Fe^{2+} o $FeOH^+$ (Ewers, 1983). Bajo esas condiciones, los

¹ Agua meteórica: Agua que se condensa en la atmósfera (lluvia, nieve, granizo) y puede llegar a la zona de saturación por infiltración y percolación o bien formar cuerpos de agua en la superficie de la Tierra (Equipo, 2000).

² Buffer químico: Resistencia a cambios en el pH a pesar de pequeñas añadiduras de ácidos o bases, es decir, mantiene los valores específicos de pH ácidos o básicos (Clugston, 2000).

³ Solución verdadera: Cuando dos sustancias se combinan, pero no reaccionan químicamente, pueden formar una suspensión, una solución verdadera o una dispersión coloidal (Cooper, 2014). Una solución verdadera es, por definición, una mezcla homogénea de dos o más componentes que no pueden separarse en sus componentes iónicos o moleculares individuales (Boyd, 2015).

cambios en parámetros tales como pCO_2 , presión, pH y Eh (potencial redox) determinarán si el hierro se precipita como un carbonato, óxido, silicato u otra sal (Harnmeijer, 2003).

Los minerales más abundantes que se encuentran en las formaciones de hierro bandeado son la magnetita (Fe_3O_4) y la hematita. (Fe_2O_3).

Según Bekker et al., (2014) Los minerales de hierro de hematita y martita⁴-goethita (≥ 56 % Fe) son la principal fuente de hierro para la industria mundial del acero.

El acero es una aleación de hierro y carbón que es vital en la economía global, ya que funge de manera muy efectiva en la industria de la construcción, construcción naval, industria pesada, manufactura de motores de vehículos, construcción de vías férreas, construcción de puentes y aplicaciones ingenieriles.

En 2010, China era el principal importador de hierro en el mundo. Además, continuará invirtiendo activamente en empresas relacionadas con el hierro y el acero en África, Australia y América del Sur con el objeto de proporcionar materia prima para su creciente urbanización e industrialización (USGS, 2010.)

El uso de **percepción remota** para la identificación de depósitos de hierro en Sierra Leona es de gran ayuda debido a que, al tratarse de una región tan distante, es factible, práctico y barato obtener información íntegra y fiable de esta región de África. Asimismo,

⁴ Martita: Este mineral es una variedad de la hematita. La martita es el nombre dado para los pseudomorfos de la hematita, formado en condiciones donde aumenta la fugacidad del oxígeno. Su fórmula química es: Fe_2O_3 . (Hudson Institute of Mineralogy, 2017).

otros autores, tales como Alasta (2011) y Abulghasem (2012) han demostrado la eficacia que tiene esta herramienta con esos objetivos en varias regiones.

La **percepción remota** desempeña un papel importante en la exploración de minerales. Utilizando percepción remota es posible cubrir grandes áreas de la superficie terrestre para elegir un sitio que requiera de estudios más detallados (Karigi, 2007). Las técnicas de percepción remota son utilizadas debido a su rentabilidad, su habilidad para estudiar áreas de difícil acceso y porque la información puede ser recolectada frecuente y rápidamente a gran escala (Bruker, 2006.). Por esta razón, el objetivo de este trabajo es la identificación de zonas con características superficiales adecuadas para la presencia de depósitos de hierro en Sierra Leona, lo cual será de utilidad para definir nuevos objetivos de exploración.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La minería organizada en Sierra Leona comenzó en 1927 después de que el Acta Minera fuera escrita y adoptada. Durante la década de 1930 y 1940 se realizaron descubrimientos mineros significativos por el Servicio Geológico de Sierra Leona (Jalloh, 2013.)

Sierra Leona fue devastada por una brutal Guerra Civil que duró de 1991 al 2002, y que resultó en impactos catastróficos en las vidas humanas, propiedades y la economía (Jalloh, 2013.)

Previo a la Guerra Civil, la producción o extracción minera de recursos tales como diamantes, rutilo, oro, bauxita, depósitos de hierro, contribuían con el 20 % del PIB, hasta un 15 % de ingresos fiscales y representaban más del 90 % de las exportaciones. La

minería y la extracción proporcionaban un medio de subsistencia para más de 250,000 personas, y empleaban alrededor de 14 % de la mano de obra directa e indirecta. A pesar de que este sector operaba a solo una fracción de su potencial, su contribución era suficiente para considerar a Sierra Leona como un país rico en recursos (Jalloh, 2013.)

El retorno de la estabilidad política en 2002 acompañada con desarrollos globales positivos en el sector minero han generado el rejuvenecimiento del sector minero doméstico y se espera que este sector rejuvenecido sustente nuevamente la economía y apoye los objetivos de desarrollo gubernamentales (Jalloh, 2013.)

Si bien, el resurgimiento del sector minero de Sierra Leona ha sido impresionante desde la Guerra Civil, éste se ha enfocado hasta ahora en el restablecimiento de minas cerradas y la explotación de reservas previamente probadas. Sin embargo, el mayor desafío en la situación inmediata al conflicto aún se basa en cómo mantener las inversiones extranjeras en el sector mineral y minero (Jalloh, 2013.)

Al ser una región vasta en minerales de alto interés comercial, aunado a la escasez de información disponible que se tiene en Sierra Leona concerniente a los depósitos de hierro, las técnicas de percepción remota permitirán localizar e identificar sitios donde haya abundancia de estos depósitos.

Se seleccionaron las regiones de Tonkolili y Marampa debido a que son zonas confirmadas donde se tienen las mayores cantidades de formaciones de hierro bandeado y existencia de este recurso.

1.3. JUSTIFICACIÓN

En 1933, la Compañía de Desarrollo de Sierra Leona (DELCO por sus siglas en inglés) comenzó a explotar el hierro de Marampa hasta 1975, finalizando labores como consecuencia de la liquidación. En 2005, London Mining Company (LMC) se hizo cargo de la concesión de Marampa y ha desarrollado un proyecto minero. Los jales abandonados por DELCO fueron reportados desde los 40 millones hasta los 45 millones de toneladas con una ley promedio de 27.7 % de Fe y los depósitos de hierro primarios fueron reportados desde los 92 millones hasta mil millones de toneladas, con una ley promedio de 37.7 % de Fe (Jalloh, 2013.)

El otro depósito de interés es el de Tonkolili. El depósito de hierro Tonkolili se produce en el cinturón de rocas verdes⁵ de las Montañas Sula-Kangari, cerca de Ferengbeya en la parte norte del país. El hierro se produce como formaciones de hierro bandeado pertenecientes al Precámbrico. Los cálculos que se tienen los depósitos de hierro son al menos de 720 millones de toneladas con una ley promedio de 56.3 % de Fe. (Jalloh, 2013.)

Marampa y Tonkolili se caracterizan por tener abundantes lluvias durante el año y alta densidad de vegetación, lo que imposibilita el acceso para la búsqueda y exploración de depósitos de hierro, es por eso que el uso de Percepción Remota es ideal y conveniente debido a que mediante imágenes satelitales proporcionadas por el Servicio Geológico Estadounidense (USGS, por sus siglas en inglés) y el software de tratamiento de

⁵ Los cinturones de rocas verdes son estructuras generalmente alargadas compuestas predominantemente de rocas volcánicas y sedimentarias metamorfoseadas que, junto con granitoides y gneises, son los cuerpos constituyentes de los cratones del Arqueano y del Proterozoico (Gargaud, 2011). Son verdes debido a la presencia de clorita y anfíboles verdes (Walther, 2013).

imágenes de IDRISI SELVA versión 17.0 de la Universidad Clark es posible obtener información íntegra y fiable de una manera bastante asequible, y sin la necesidad de trasladarse hasta la zona de estudio o requerir de permisos gubernamentales para acceder a los yacimientos. Los resultados obtenidos fungirán como apoyo para la realización de estudios posteriores de comprobación de campo y exploración a detalle.

Asimismo, hay noticias⁶ que proclaman haber encontrado grandes depósitos de hierro en Marampa, es por eso que este trabajo tiene como objetivo la utilización de técnicas de percepción remota para identificar si verdaderamente existe en abundancia este mineral en esa zona, el cual beneficiaría económicamente a Sierra Leona y a los países que importan este producto.

El sensor utilizado fue el TM del satélite Landsat 5 debido principalmente a su resolución espectral y espacial. Asimismo, las imágenes procesadas son del año 2010 dado que la información minera de estas regiones no es de uso público para el año en curso.

⁶ africafundacion.org (2010). Se inicia la explotación del mayor depósito de mineral de hierro de África. 20/11/2017, URL: <http://www.africafundacion.org/?article5856#>

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Identificar óxidos de hierro en zonas de Tonkolili y Marampa y alrededores mediante el procesamiento de imágenes satélites Landsat TM.

1.4.1.1. Objetivos Particulares

- Comparar mapas generados con dos técnicas de Percepción Remota donde predomine la presencia de óxidos de hierro.
- Elaborar un mapa que delimite zonas con mineralización expuesta de óxidos de hierro e incluir vías de acceso para su posible exploración.

2. DEPÓSITOS DE HIERRO

El hierro es uno de los elementos de mayor abundancia en el mundo, formando aproximadamente 5 % de la corteza terrestre (bajo la forma de varios minerales). Este se presenta en la naturaleza en forma de óxido, carbonato, sulfuro o silicato. Los principales minerales de hierro son la *hematita* (mineral de óxido de hierro), *magnetita* (mineral óxido ferroso-diférrico), *taconita* (roca ferrífera de baja calidad rica en sílice, la cual forma parte de las formaciones de hierro bandeado.) y la *limonita* (mineral de óxido de hierro hidratado) (Kalpakjan, 2002). Asimismo, el hierro se puede presentar en coexistencia con: azufre, fósforo, silicio y manganeso. Estos materiales se llaman acompañantes del hierro. Por otro lado, los minerales contienen constituyentes tales como la cal, la sílice, la arcilla y la periclasa, son conocidos como ganga. (Falk, 1986).

Tres cuartas partes de la producción mundial y seis séptimas partes de las reservas mundiales de minerales de hierro proceden o se hallan en yacimientos de los ciclos sedimentarios y de meteorización (Walther, 1965).

Desde un punto de vista geológico, los óxidos de hierro se originan a través de la cristalización de un fundido, precipitación a partir de una solución, alteración de una fase mineral preexistente, o transporte como un componente detrítico. Los tres procesos anteriores que conducen a la formación de óxidos de hierro se rigen por procesos termodinámicos y biogeoquímicos. La relevancia geológica que tienen estos óxidos de hierro yace en revelar las condiciones “locales” de su génesis (Faivre, 2016).

Debido a la abundancia de este mineral, no existe casi ninguna nación en el mundo que no tenga en su territorio minerales de hierro. Sin embargo, solamente 4 minerales se pueden utilizar industrialmente en la actualidad: tres óxidos que se conocen generalmente con los nombres de magnetita, hematita, limonita, y siderita (Tabla 1).

Tabla 1. Características de los principales minerales férricos (obtenido de Carvalho, 2014).

MINERALES	FÓRMULA QUÍMICA	PORCENTAJE FÉRRICO (%)
MAGNETITA	$Fe^{2+}(Fe^{3+})_2O_4$	72.4
HEMATITA	Fe_2O_3	69.9
LIMONITA	$FeO(OH) \cdot nH_2O$	59.8
SIDERITA	$FeCO_3$	48.2

Los minerales que se consideran ricos en hierro son los que contienen más del 55 % de Fe; de riqueza media los que tienen de 30 % a 55 % y pobres lo que tienen menor a 30 %.

Los depósitos de hierro son la principal fuente de mineral para las industrias de hierro y acero del mundo. Por tanto, el hierro es esencial para la producción de acero, que a su vez es esencial para mantener una sólida base industrial. Casi todos los depósitos de hierro (98 %) se utilizan en la fabricación de acero. Éstos se explotan en alrededor de 50 países.

Más del 90 % del hierro extraído en la actualidad se encuentra en rocas sedimentarias. Asimismo, la mayor parte proviene de formaciones que corresponden a la era precámbrica.

Aunque son escasos y rara vez se encuentran, los depósitos con más del 60 % de hierro son comúnmente conocidos como “minerales de hierro directo” o “depósitos naturales” (Subramani, 2017).

2.1. PROCESOS Y PERIODOS DE FORMACIÓN

Antes de incluir los procesos y periodos de formación, es importante indicar los tipos de depósitos de hierro de **origen sedimentario** que existen, los cuales son, en orden de importancia, los siguientes: los **depósitos de hierro de los pantanos** (bog iron ores, por sus siglas en inglés), **depósitos “ironstone”** y las **formaciones de hierro bandeado (BIF)**.

2.1.1. DEPÓSITOS DE HIERRO DE LOS PANTANOS

Estos depósitos se forman principalmente en los lagos y pantanos de tundra glaciar en el norte de Canadá y regiones Escandinavas (Robb, 2005), así como en sedimentos de planicies costeras durante periodos de bajo nivel del mar. Según Walther et al., (2013) estos depósitos son demasiado pequeños para ser aprovechados económicamente.

Stanton et al., (1972) menciona que algunos lugares aún se están formando estos depósitos. Los principales minerales que se encuentran en este tipo de depósitos son goethita, limonita y siderita (Craig, 1994).

2.1.2. IRONSTONES

Estos depósitos corresponden, en su mayoría, al eón Fanerozoico. Se forman principalmente en ambientes deltaicos y marinos someros asociados con rocas

sedimentarias como calizas, limolitas, lutitas y areniscas (Craig, 1994). Son denominados como “*ironstones*” las areniscas y calizas ricas en hematita, goethita, siderita, chamosita u otros minerales de hierro, por lo general, estos minerales se encuentran rellenando huecos o reemplazando minerales preexistentes de la roca (Price, 2005).

Los “*ironstones*” son depósitos más grandes y más importantes que los de los pantanos. Sin embargo, comparados con los depósitos BIF, son de menor importancia (Craig, 1994).

2.1.3. FORMACIONES DE HIERRO BANDEADO (BIF)

Este tipo de depósitos representan globalmente la fuente más importante de depósitos de hierro en el mundo y, en términos de reservas y producción total, superan ampliamente a los depósitos de hierro antes mencionados (Robb, 2005)

Los depósitos tipo BIF se formaron esencialmente en los eones Arqueano, Proterozoico y parte del Fanerozoico

Los minerales más comunes presentes en estos depósitos son la hematita y magnetita y, en algunos casos, carbonatos de hierro y silicatos (Craig, 1994).

James (1954) definió un tipo de depósitos de hierro (“*iron formations*”) como una roca sedimentaria de origen químico, normalmente con finas capas y/o finamente laminada, conteniendo al menos 15 % de hierro de origen sedimentario y comúnmente pero no necesariamente con presencia de capas de pedernal. Trendall (1983) define estos depósitos de hierro como un término litológico general y estratigráfico para rocas sedimentarias ricas en hierro.

A pesar de que ambos términos son aceptados, el término de “formación de hierro bandeado” (“*banded iron formations*”) está reservado para aquellos sedimentos ricos en hierro que se caracterizan por bandas regulares de hierro y pedernal.

Las formaciones de hierro bandeado están confinadas a áreas de escudos Precámbricos (Figura 1), y los cratones de los hemisferios norte y sur contienen depósitos de importancia económica. Los principales cinturones y distritos con depósitos de BIF son realmente gigantescos en tamaño, conteniendo alrededor de 30 % de Fe y 45 % de SiO₂, en un rango de 10⁹-10¹⁴ toneladas (James, 1983). Los más importantes en términos de tonelaje según Misra et al., (2000) son: la Cuenca Hamersley, Australia occidental (≈2500 Ma); el Supergrupo Transvaal, Sudáfrica (≈2500-2300 Ma); la fosa de Labrador, Québec-Terranova, Canadá (≈2100 Ma); la región del Lago Superior, EE.UU. (≈2700-1900 Ma); el Cuadrilátero Ferrífero, Minas Gerais y el distrito de Serra dos Carajás, Brasil (≈2300 Ma); Krivóy Rog-KMA, Escudo Ucraniano (≈2200 Ma); región de Singhbhum-Bonai-Keonjhar-Mayurbhanj, Orissa-Bihar, India (≈3000 Ma); el Complejo Imataca, Venezuela (≈3400 Ma); **el Escudo Liberiano, Liberia-Sierra Leona (≈3000 Ma)**; y la cuenca Nabberu, Australia (≈2100 Ma).

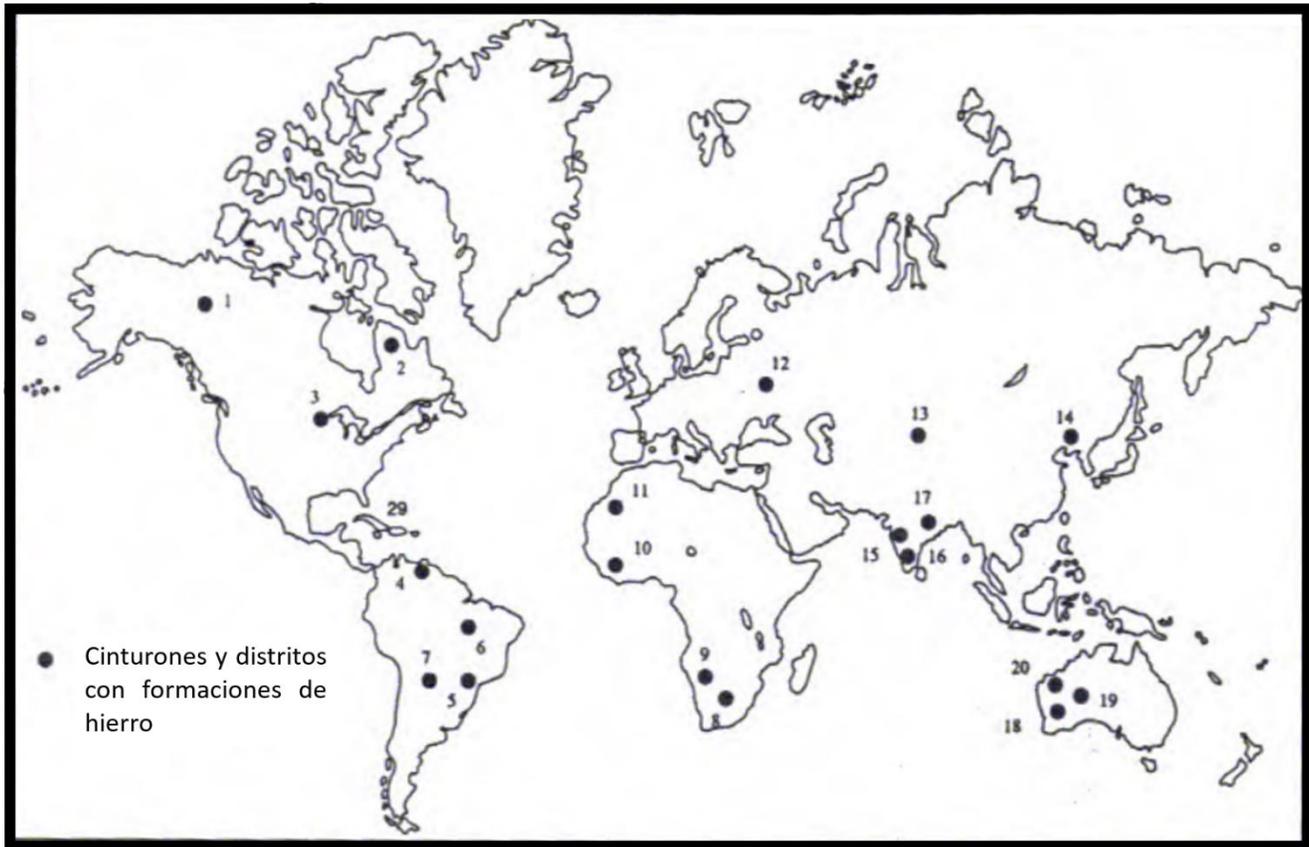


Figura 1. Distribución mundial de los principales cinturones y distritos con formaciones de hierro. Canadá: Grupo Rapitiano (1), Fosa de Labrador (2); EE.UU.: región de Lago Superior (3); Venezuela: Complejo de Itacama (4); Brasil: Cuadrilátero Ferrífero (5), Serra dos Carajás (6), Macizo de Urucum (7); Sudáfrica: Cinturón Transvaal-Griquatown; Namibia: Cinturón Damara (9); **África occidental: Escudo Liberiano (10)**; Mauritania: Grupo Ijil (11); Ucrania: Krivói Rog y anomalía magnética de Kursk (12); Rusia: región de Baikal (13); China: Anshan (14); India: Goa (15), Karnataka (16), cinturón Bihar-Orissa (17); Australia: cinturón de rocas verdes Yilgarn Block (18), cuenca Nabberu (19), cuenca Hamersley (20). (Tomado y modificado de Misra, 2000).

La acumulación de grandes masas de hierro requiere el transporte del ión ferroso (Fe^{2+}) o del ión hidróxido de hierro (FeOH^+) en solución, ya que el ión férrico (Fe^{3+}) es insoluble en valores cercanos a un pH neutro, en presencia de oxígeno disuelto y en soluciones alcalinas (Bekker, 2014). La solubilidad de distintos iones y componentes del hierro en un medio acuoso está controlada por el pH y el Eh del medio (Misra, 2000). Eventos como la ruptura de la pluma del manto, enjambres de diques, rocas máficas submarinas emplazadas (Isley and Abbot, 1999), no solo proporcionaron hierro ferroso disuelto para

la formación de depósitos de hierro, sino que además moderaron el estado redox oceánico, así como su química al incrementar el flujo hidrotermal de agentes reductores tales como H_2 y H_2S del suelo marino (Bekker, 2014).

Desde un punto de vista cronológico casi todas las formaciones de hierro del **Arqueano** (4,000-2,500 Ma) consisten principalmente de capas interestratificadas de hierro y sílice y, en general, se depositaron en ambientes de aguas relativamente profundas, ya que normalmente carecen de evidencia de olas o tormentas (Bekker, 2014).

En el **Proterozoico inferior** James (1983) sugiere que la máxima deposición de formación de hierro es el resultado de la combinación de factores estructurales, geoquímicos y biológicos. La llegada de este eón estuvo marcada por un cambio desde el punto de vista estructural que pasó de la orogénesis y la cratonización en el **Arqueano tardío** a un periodo de estabilidad estructural caracterizado por el desarrollo de depresiones someras intracontinentales y cuencas marginales. Esto proporcionó numerosos sitios favorables para el depósito de formaciones de hierro. Según Bekker et al., (2014) el transporte y deposición de los depósitos de hierro de ≈ 2450 Ma se produjo poco antes del primer aumento significativo en el oxígeno atmosférico, es decir, antes del Gran Evento Oxidante (GOE⁷, por sus siglas en inglés), debido al emplazamiento de la primer Gran Provincia Ígnea (LIP⁸, por sus siglas en inglés), glaciaciones

⁷ Gran Evento Oxidante: Corresponde con el tiempo en el que el oxígeno libre empezó a acumularse en concentraciones apreciables en la atmósfera. El aumento de oxígeno en la atmósfera fue el resultado de la actividad fotosintética por parte de las cianobacterias (Gargaud, 2011). este evento sucedió hace 2330 Ma. (Luo, 2016).

⁸ Bryan et al., (2008) define las Grandes Provincias Ígneas como provincias magmáticas con extensiones superficiales mayores a 0.1 Mkm^2 , volúmenes mayores a 0.1 Mkm^3 con una duración de ≈ 50 Ma, que tienen ambientes tectónicos intraplaca o afinidades geoquímicas y se caracterizan por periodos de corta duración ($\approx 1-5$ Ma), durante los cuales se emplaza una gran proporción ($>75\%$) del volumen ígneo total.

paleoproterozoicas y oxidación atmosférica (Bekker, 2014). La siguiente deposición importante (≈ 1880 Ma) se produjo durante la ruptura de la pluma del manto y el ensamblaje supercontinental (Bekker et al., 2010; Ernst and Bell, 2010; Hamilton et al., 2009).

Posterior a esto le sigue un periodo de ausencia de formaciones de hierro entre ≈ 1800 Ma y ≈ 700 Ma, el cual ha sido esclarecido por Holland et al., (1984), quien atribuye este suceso a la oxidación completa del océano y por Canfield, et al., (1998), quien indica que este suceso fue el producto del desarrollo de condiciones sulfúricas en el océano profundo.

Después de este intervalo de tiempo, reaparecieron grandes formaciones al final del **Neoproterozoico**, las cuales están aparentemente relacionadas al periodo de glaciación global (Kirschvink, 1992). Estas formaciones son las denominadas como “*ironstones*”, las cuales comprenden parte del periodo **Neoproterozoico** y del eón **Fanerozoico**, no son tan voluminosos en comparación con los depósitos **Arqueanos** y **Paleoproterozoicos**. A diferencia de los depósitos **Precámbricos**, éstos carecen de enriquecimiento en sílice (Bekker, 2014).

La Figura 2 muestra los periodos de mayor abundancia de formaciones de hierro y es evidente que el Proterozoico temprano (2500-1900 Ma) representa el intervalo de tiempo más importante

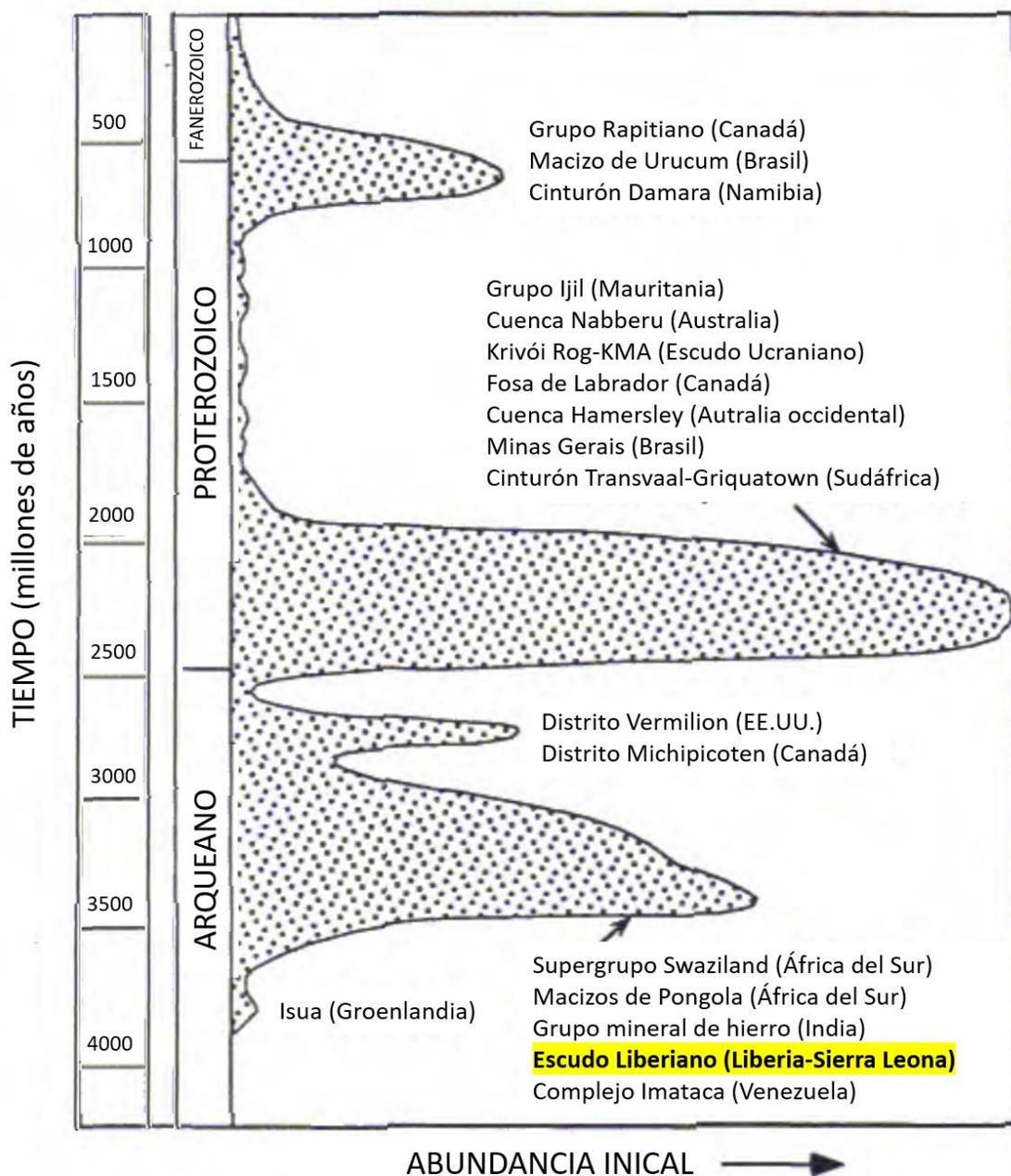


Figura 2. Abundancia estimada de formación de hierro depositado a lo largo del tiempo geológico. Escala horizontal es esquemática-no lineal, aproximadamente logarítmica; rango de 0 – 10^{15} toneladas (tomada y modificada de James, 1983).

2.2. MECANISMOS DE OXIDACIÓN Y DEPOSICIÓN DE LAS BIFS

Los principales mecanismos involucrados en la oxidación y deposición de formaciones de hierro bandeado siguen sin ser completamente esclarecidos, sin embargo, existen tres de carácter químico – biológico ampliamente respaldados por la literatura científica, los cuales se mencionan a continuación:

1. Oxidación del Fe^{2+} por O_2 cianobacterial

El modelo clásico para la deposición de depósitos BIF indica que la precipitación de hierro férrico se produjo en la interfaz entre las aguas poco profundas oxigenadas y las corrientes ascendentes de aguas ricas en hierro (Cloud, 1965, 1973). El oxígeno fue producido por las cianobacterias, las cuales probablemente se desarrollaron en la zona fótica de las aguas cercanas a la costa, donde el Fe^{2+} y los nutrientes eran suficientes (Cloud, 1973).

Las cianobacterias son organismos que se encuentran en los estromatolitos, éstos son estructuras órgano-sedimentarias laminadas generalmente de $CaCO_3$.

Según Li et al. (2015) a pesar de que las cianobacterias aparecieron hace ≈ 3000 Ma en la Tierra, este mecanismo oxidante fue posterior al Gran Evento Oxidante.

2. Oxidación del hierro por actividades metabólicas microbianas

La oxidación de Fe (II) en el océano Precámbrico ha sido asociada también con actividades metabólicas de las bacterias oxidantes de hierro (IOB, por sus siglas en inglés) (Konhauser et al., 2007, Planavsky et al., 2009). Existen tres vías principales

mediante las cuales se suscitó la oxidación microbiana metabólica del hierro: la micraerófila, la fotosintética anoxigénica y la dependiente del nitrato.

Las principales bacterias que influyeron en este proceso de oxidación de hierro son: *Gallionella ferruginea*, *Leptothrix*, *Mariprofundus ferrooxydans*, *Acidovorax* y *Dechlorosoma suillum* (Bekker et al. 2014, Li et al. 2015).

3. Fotooxidación UV de Fe^{2+}

Cairns-Smith (1978) y Francois (1986) propusieron que el Fe^{2+} en el océano Precámbrico pudo haber sido fotooxidado por el alto flujo de fotones ultravioletas que hayan podido llegar a la superficie de la Tierra antes del aumento del oxígeno y de la formación de la ozonosfera.

La penetrar la radiación UV las superficies de aguas marinas someras con una longitud de onda de 300-450 nm las especies de Fe^{2+} solubles en agua se convertirían en hierro férrico disuelto, que se hidrolizaría y formaría hidróxidos férricos insolubles bajo valores de pH cercanos al neutro (Cairns-Smith, 1978; Braterman, 1983).

2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS BIFS

En general, las BIFS son clasificados en 2 categorías: por **facies**, el cual se basa en el mineral de hierro dominante (óxido, silicato, carbonato y sulfuro); por **tipo**, basado en las unidades estratigráficas (Superior, Algoma y Rapitiano) (James, 1992); y, por su textura, morfología y mineralogía (Robb, 2005).

2.3.1. CLASIFICACIÓN SEGÚN SU MINERALOGÍA (FACIES)

La mayoría de los depósitos de hierro son precipitados químicos y, por lo tanto, su mineralogía está fuertemente controlada por el Eh y pH del medio acuoso. Con base en este principio James (1954) dividió los depósitos de hierro en cuatro facies sedimentarias principales, óxido, silicato, carbonato y sulfuro, las cuales se formaron aparentemente en condiciones ambientales definidas por los minerales de hierro dominantes del medio (Misra, 2000). Las características de estas facies se encuentran en la Tabla 2.

2.3.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN LA ESTRATIGRAFÍA

Basándose en las unidades estratigráficas Gross et al., (1965, 1973) clasificó los depósitos de hierro en tres tipos diferentes: **Tipo Algoma**, tipificado por la presencia de depósitos de hierro en los cinturones de rocas verdes del **Arqueno Tardío** (los cuales intersectan el cratón de Ungava); **Tipo Superior**, ejemplificado por la notable cadena de depósitos de hierro del **Proterozoico Temprano**, los cuales se preservan en un margen de ≈ 3000 km en el cratón de Ungava en el este de Canadá y el centro-norte de los Estados Unidos (James, 1992). La mayoría de los distritos mineros de hierro en el mundo pertenecen a este tipo; y, finalmente el **Tipo Rapitiano**, el cual fue agregado posteriormente para distinguir aquellos depósitos de hierro del **Proterozoico Tardío** asociados con depósitos clásticos gruesos, siendo algunos de origen glaciogenico (Button, 1982). Esta clasificación ha sido utilizada de manera favorable para diferenciar depósitos de hierro con base en sus dimensiones, estratos asociados, ambiente de depósito, entre otros factores. Sin embargo, es importante señalar que muchos depósitos de hierro no se ajustan con este esquema.

La Tabla 2 muestra las características de los depósitos según su mineralogía.

Tabla 2. Principales características de las facies de las formaciones de hierro (tomado y modificado de James 1954, 1992, Gross 1965).

FACIES	MINERALES DE HIERRO	FRACCIÓN MÁSCICA DE Fe (%)	LITOLOGÍA	AMBIENTE DEPOSICIONAL	CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS
Óxido (Hematítica)	Hematita	30-40	Estratificación delgada a ondulada	Fuertemente oxidante	Abundante especularita; Oolítica en muchos distritos
Óxido (Magnetítica)	Magnetita	25-35	Estratificación uniforme a irregular	Débilmente oxidante a débilmente reductor	Fuertemente magnético
Silicato	Minnesotaíta Estilpnomelana	20-30	Rocas verdes claras a oscuras con minerales de silicato de hierro	Fuertemente reductor	Comúnmente magnético
Carbonato	Siderita	20-30	Estratificación o laminación alternada uniforme a irregular de siderita y pedernal	Reductor	Generalmente no es magnético: los estilolitos son comunes
Sulfuro	Pirita	15-25	Varía de láminas a capas finas de argilita carbonosa; raramente con pedernal	Fuertemente reductor	Frecuentemente gráfítico

La Tabla 3 muestra las características principales de los depósitos tipo Algoma, Superior y Rapitiano.

Tabla 3. Tabla comparativa de los depósitos de hierro clasificados según su estratigrafía (tomado y modificado de Eichler 1976, Gross 1980, James 1992).

CLASIFICACIÓN	TIPO ALGOMA	TIPO SUPERIOR	TIPO RAPITIANO
<i>Dimensiones</i>	Cuerpos lenticulares; espesor de un metro a decenas de metros y con extensión lateral de pocos kilómetros	Cuerpos grandes, de 100 m. o más en espesor y de decenas a centenas de km en extensión lateral	Cuerpos grandes, de decenas a centenas de metros en espesor y alcanzan centenas de km en extensión lateral
<i>Estratos asociados</i>	Rocas volcánicas y piroclastos, grauvaca; los depósitos de hierro están irregularmente distribuidos	Cuarcita, dolomita, conglomerado, lutita negra; los depósitos de hierro se encuentran generalmente en la parte inferior de la secuencia sedimentaria	Lodolita, lutita, conglomerado, diamictita; la ubicación estratigráfica de los depósitos de hierro es incierta
<i>Ambiente de depósito</i>	Orogénica, "eugeosinclinal", volcanes submarinos y cinturones de rocas verdes	Epirogénica, "miogeosinclinal", plataforma continental estable, cuencas marginales, generalmente no-volcánicas	Zonas de rift no-volcánicas en cuencas marginales
<i>Facies Sedimentarias</i>	Se encuentran todas las facies, aunque la óxido-hematítica es poco común	Se encuentran todas las facies, aunque las facies de sulfuro pueden ser insignificantes o ausentes	Solo se encuentran óxido-hematíticas
<i>Eón</i>	Principalmente del Arqueano, pero existen algunos del Paleozoico	Principalmente del Proterozoico Temprano	Los que se conocen pertenecen al Proterozoico Tardío

2.4. GEOLOGÍA Y TECTÓNICA DE LAS FORMACIONES DE HIERRO

Desde el punto de vista tectónico las formaciones de hierro del Precámbrico son características de la era Proterozoica y Arqueana.

(a) Formación de hierro del Arqueano

James (1983) reconoce depósitos del **Mesoarqueano** (3500-3000 Ma) y del **Arqueano Tardío** (2900-2600 Ma). Los depósitos más grandes del **Mesoarqueano** se encuentran dentro del Escudo de Guyana de Sudamérica que comprende a Guyana y a Venezuela y su probable correlativo dentro del **Escudo de Liberia** en África, el cual abarca Liberia, **Sierra Leona**, Guinea y Costa de Marfil. Actualmente separados por la relativamente reciente apertura del Océano Atlántico, hay grandes depósitos de hierro esparcidos sobre un área que ocupaba, anterior a la separación continental, al menos 250,000 km². – Gruss (1973) sugiere que la deposición tuvo lugar sobre una plataforma epicontinental.

Los dos tipos de roca principales que caracterizan un Escudo Arqueano son los cinturones de rocas verdes y gneises de granito. Estos cinturones se caracterizan por tener rocas volcánicas y sedimentarias, intrusiones de origen granítico, lavas almohadilladas, así como fallas y pliegues complejos. La estructura de cada depósito normalmente es compleja, con estratos metasedimentarios altamente metamorfoseados (incluyendo la formación del hierro) dentro de gneises granulíticos. Las unidades litológicas con formaciones de hierro, comúnmente de una a varias centenas de metros de espesor, están intercalados con cuarcita,

cuarzo mica-esquistos, y anfibolita. Los procesos tectónicos mediante los cuales se forman los cinturones de rocas verdes son de rift intracontinental, y cuenca de ante-arco.

(b) Formación de hierro del Proterozoico

El **Paleoproterozoico** representa el periodo de mayor deposición de formaciones de hierro. La interpretación del ambiente de depósito de una gran cantidad de formaciones de hierro de este eón muestra la importancia tectónica de una extensa zona de subsidencia de aguas someras con salida parcial o completa al mar. Estas formaciones son, por lo tanto, representativas de márgenes continentales pasivos. (Edwards, 2012).

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. LOCALIZACIÓN

La República de Sierra Leona se localiza en la **costa oeste** de África, entre las latitudes 7° y 10° **norte** y longitudes 10.5° y 13° **oeste**. Se encuentra delimitada por Guinea al Norte y al **este**, al **sureste** por Liberia y por el Océano Atlántico al **oeste** y al **suroeste**. El nombre de Sierra Leona fue adoptado del nombre portugués “*Serra Leoa*” que significa “Montañas de Leones”. Sierra Leona cubre un área total de 71,740 km^2 . La capital y la ciudad más grande es Freetown. Sierra Leona se compone de cuatro regiones, la Provincia Norte, la Provincia del Sur, la Provincia del Este y la Provincia del Oeste.

Las zonas de estudio con potencial minero para la extracción de hierro son Tonkolili y Marampa, con coordenadas geográficas 8°58'49.51"N, 11°47'41.15"O y 8°41'32.31"N, 12°28'13.12"O respectivamente. Tonkolili se ubica al NE de Makeni Makeni y al SW de Bumbuna. Por otro lado, Marampa se localiza entre los distritos de Lunsar y Rokupr Rokupr (Figura 3).

3.2. HIDROGEOGRAFÍA

Existen en Sierra Leona nueve ríos principales. Los ríos de *Rokel/Seli*, *Pampana/Jong*, *Sewa*, *Waanje* se originan en el centro del país; el resto, lo integran el río *Grande* y *Little Scarcies*, éstos se originan en la República de Guinea y, finalmente, el *Rio Moa* que se origina en la República de Liberia. Estos ríos varían en longitud desde 160 km hasta 430 km como son el río *Great Scarcies* y el río *Sewa* respectivamente.

El río *Sewa* es comercialmente el más importante y fluye 240 km en una dirección Sur-Suroeste, éste está formado por los ríos *Bagbe* y *Bafi* e inicia en la parte Noreste del borde de Guinea.

La Figura 3 muestra un mapa geográfico de la región en estudio.



LEYENDA

Área de estudio
 Tonkolili
 Marampa

Escala Numérica

1:2.000.000

Figura 3. Mapa geográfico de Sierra Leona. El rectángulo rojo incluye las zonas de interés minero Marampa y Tonkolili), así como regiones aledañas que cuentan con depósitos de hierro. (Tomado y modificado de Warnsloh, 2011).

3.3. GEOLOGÍA REGIONAL

La mayor parte de Sierra Leona está subyugada por rocas del Precámbrico (Arcaico y Proterozoico) con una franja costera de aproximadamente 50 km de ancho, la cual comprende sedimentos marinos y de estuarios del Terciario y Cuaternario. Los afloramientos precámbricos (principalmente Arcaicos) cubren alrededor del 75% del país y por lo general comprenden rocas graníticas, gnéisicas y dioríticas, así como rocas supracorticales⁹ (rocas volcánico-sedimentarias) con formaciones de hierro bandeado (BIF) y sedimentos detríticos. **Esto en conjunto forma el cinturón granítico de rocas verdes, el cual es parte del Cratón Africano Occidental** (Jalloh, 2013).

Las regiones con cinturones de rocas verdes graníticas representan el proceso principal mediante el cual la corteza continental fue formada durante el Arcaico. El término de roca verde se debe a que las rocas ígneas básicas alteradas poseen un color verde distintivo debido al contenido de clorita y otros minerales. La característica más notable y significativa de los territorios que cuentan con cinturones graníticos de rocas verdes del Arcaico es el predominio de los granitoides. La proporción de éstos parcialmente dependerá del grado de erosión que tenga la roca (la cual, a menudo se desconoce). La forma y estructura de los cuerpos granitoides dependerá también del nivel de exposición que tengan: por ejemplo, los que tienen altos niveles de exposición (tal es el caso de Arabia) se caracterizan por ser discordantes; los que tienen niveles más bajos son a menudo diapíricos, ya que el diapirismo requiere altos niveles de viscosidad para las rocas

⁹ Rocas Supracorticales: Son rocas que se han emplazado en la superficie de la corteza terrestre y que consisten en sedimentos o rocas volcánicas (Gargaud, 2013).

de pared¹⁰. A pesar de estas complicaciones, es evidente que el volumen de magma silíceo era mucho mayor en las etapas tempranas de la evolución geológica. La tasa real de plutonismo granítico también era mucho más alta en los inicios de la historia de la Tierra (Shackleton, 1995).

En Sierra Leona los **cinturones de rocas verdes** afloran como **cuatro** prominentes zonas montañosas **alongadas** en la parte oriental del país. Dos de ellos, son conocidos como el cinturón **Sula-Kangari** (Wilson and Marmo 1958, Marmo 1962), el otro lleva el nombre de cinturón **Kambui** (Andrews-Jones, 1966) y los dos últimos se denominan cinturón de **Nimini** y **Gori**. En la Figura 4 se muestra un mapa geológico de Sierra Leona que exhibe la ubicación de los cinturones de rocas verdes principales.

Los cinturones de rocas verdes consisten de un grupo volcánico inferior compuesto de lavas ultramáficas y básicas con capas de lavas almohadilladas, a las cuales les sobreyacen tobas, metasedimentos pelíticos y psamíticos las cuales contienen capas conglomeráticas y horizontes de hierro bandeado (Patrick, 2005).

¹⁰ Roca de pared: Constituye un bloque de roca de un área sometida a actividad geológica, e.g. la roca existente a lo largo de un cuello volcánico, en el borde de un cuerpo intrusivo que se está emplazando, a lo largo de un plano de falla, que encierra un depósito mineral o donde se esté emplazando un filón o un dique (Cram101, 2016).

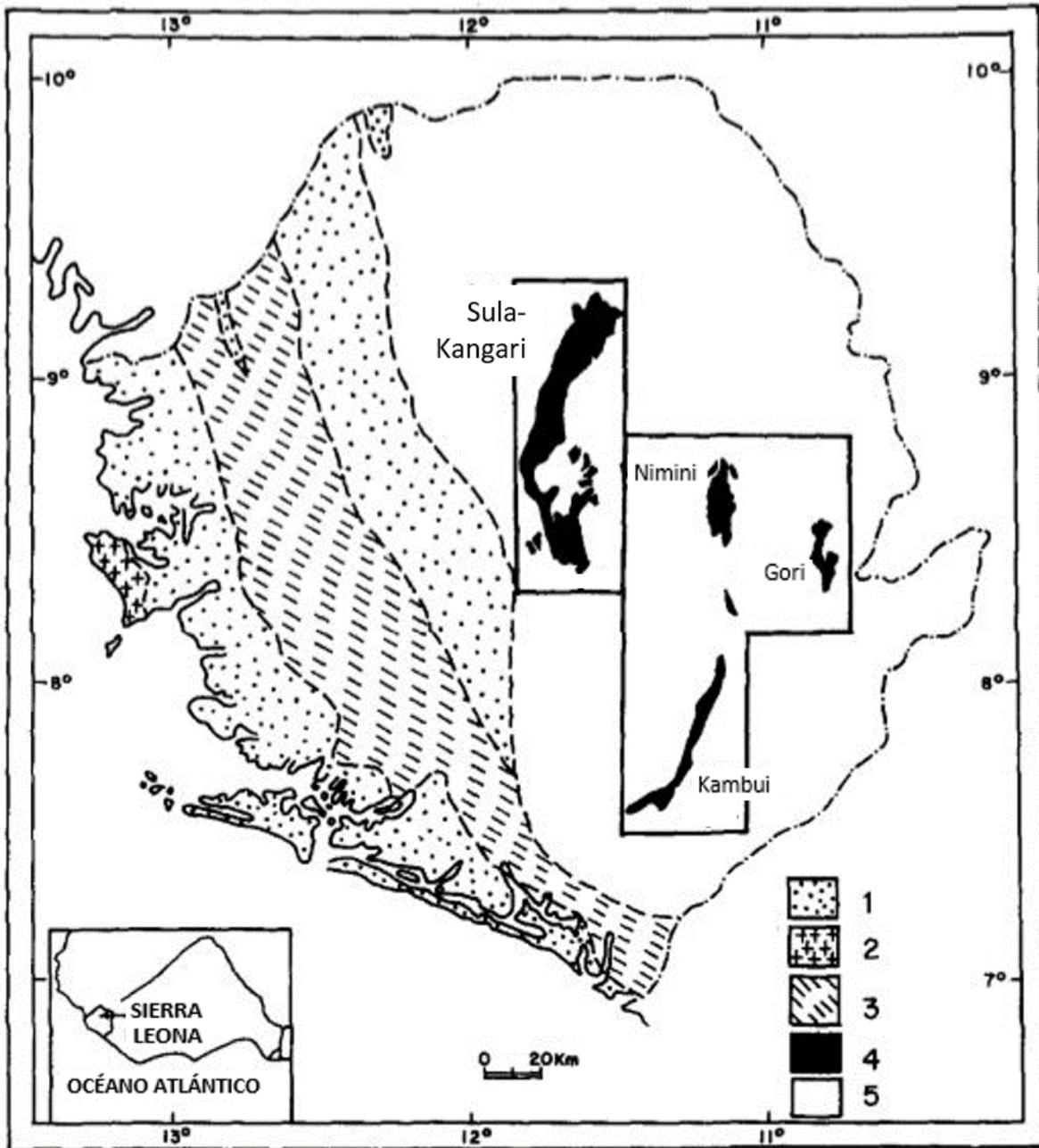


Figura 4 Mapa Geológico de Sierra Leona indicando los cinturones de rocas verdes que posee y principales litologías (obtenido de Umeji, 1983). 1, Sedimentos; 2, Complejo Freetown de rocas ígneas básicas; 3, Grupo Kasila; 4, Cinturones de Rocas verdes y 5, rocas graníticas.

En los cinturones de Kambui y Gori, la cromita funge como mineral primario, éstos dos se caracterizan por ser ultramáficos, asimismo el otro mineral que predomina es el olivino, como mineral accesorio se encuentra la serpentina, la flogopita también se halla en estos cinturones, aunque en menores cantidades (Umeji, 1983).

En el caso del cinturón Nimini, la roca predominante es la serpentinita junto con olivino, anfibolita y talco. Finalmente, para el cinturón de la parte Oriente comprendido por las Colinas Kangari y las Montañas Sula, las rocas más abundantes son las serpentinitas, serpentinitas de olivino, de tremolita y de clorita-tremolita. Los minerales primarios son el olivino, ortopiroxeno y hornblenda (Umeji, 1983).

3.4. LITOLOGÍAS PRINCIPALES

3.4.1. Rocas ultra-máficas

En las montañas Sula existe una gruesa sucesión (4 km) de esquistos de clorita-tremolita. Están intercaladas por anfibolitas, lavas almohadilladas, las cuales también yacen encima de esta sucesión. En los cinturones más pequeños de rocas verdes (i.e. los cinturones de Nimini, Gori y Kambui) al Oeste de Sierra Leona se encuentran rocas ultramáficas de esquistos de tremolita-clorita y serpentinitas que varían de grano grueso a grano fino. También hay unidades ultramáficas ricas en clinopiroxeno. Cercano a la base de la sucesión de rocas del cinturón Nimini yacen unidades ultramáficas intercaladas concordantemente con anfibolita y pedernal, las cuales contienen abundante clinopiroxeno en una matriz de grano fino, actualmente recristalizada a tremolita y que probablemente representa un flujo ultramáfico. Gran parte de las rocas ultra-máficas presentes en los

cinturones de rocas verdes al oriente de Sierra Leona yacen de manera discordante con respecto a las anfibolitas y, los sedimentos indican que son intrusivos (varían de 80 a 1000 m de espesor) posteriores a las anfibolitas (Rollinson, 1983). (Tabla 4).

3.4.2. Anfibolitas (rocas máficas)

Esta unidad consiste en una gran variedad de rocas gabroicas o basálticas. Las anfibolitas se presentan de forma masiva. Coexisten también algunas lavas almohadilladas con vesículas las cuales han sido rellenadas con calcita y cuarzo. Asimismo, las cuarcitas ricas en magnetita suelen encontrarse en el contacto volcánico/sedimentario (Umeji, 1983). (Tabla 4).

3.4.3. Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias predominantes son cuarcitas, grauvacas y hierro bandeado. Están presentes en la parte superior de la sucesión, sin embargo, en la región sur del cinturón Kambui las cuarcitas se encuentran en la parte inferior. También hay horizontes conglomeráticos en la parte superior de la mayoría de los cinturones generalmente de naturaleza intraformacional, los cuales llevan clastos de cuarcita, anfibolita, y mica-esquistos. Asimismo, existen variaciones de facies sedimentarias en algunos cinturones. En las Colinas Gori existe un cambio de facies de esquistos pelíticos a cuarcitas en dirección **oeste-este** (Rollinson, 1983).

Los depósitos de hierro se encuentran como formaciones de hierro bandeado y son característicos de zonas transicionales entre unidades sedimentarias y volcánicas. Estos depósitos están presentes en cada uno de los cinturones de rocas verdes (Umeji, 1983).

La Tabla 4 muestra la extensión aproximada, así como la composición predominante de los diferentes tipos de roca que se encuentran en los cinturones antes mencionados.

Tabla 4. Tamaños y composición de los cinturones de rocas verdes existentes en Sierra Leona (obtenida de Umeji, 1983).

CINTURÓN DE ROCAS VERDES	LONGITUD (KM)	ÁREA (KM²)	ROCAS ULTRA- MÁFICAS (%)	ROCAS MÁFICAS (%)	ROCAS SEDIMENTARIAS (%)
<i>Sula-Kangari</i>	130	115	25	41	34
<i>Nimini</i>	32	172	13	45	42
<i>Kambui</i>	80	133	10	73	17
<i>Gori</i>	25	67	36	38	26

3.5. TECTÓNICA

La geología de Sierra Leona se divide en dos unidades tectono-estratigráficas principales. La parte oriental corresponde al Cratón Occidental Africano del Precámbrico que pertenece al Eón Arcaico, el cual se vio interrumpido por la apertura del Océano Atlántico. El fragmento cratónico oriental se extiende desde el Oeste del Sahara y las montañas Anti-Atlas hacia el este a las montañas de Hoggar y hacia el Sur en las regiones de Mauritania, Senegal, Guinea, Sierra Leona, Liberia, Costa de Marfil y Ghana, tiene un rumbo de foliación en la dirección NE-SW. La porción occidental del Cratón se encuentra actualmente formando el Escudo de Guyana, el cual comprende los países de Venezuela, Guyana Francesa y Brasil con un rumbo NNW-SSE siendo oblicuo a los altiplanos centrales. El cratón está constituido por rocas con alto grado de metamorfismo y gneises graníticos. La parte occidental contiene elementos de un cinturón orogénico conocido como "*Rokelides*" o "*Grupo del Río Rokel*", el cual fue formado durante el evento termo-tectónico Pan-africano, éste data de hace **560 Ma**. Finalmente, una menor parte que abarca 20 a 40 km de franja costera se compone de sedimentos marinos los cuales datan desde el Pleistoceno hasta la actualidad (Warnsloh, 2011).

Tectónicamente las rocas Arcaicas de Sierra Leona involucran dos ciclos superpuestos, ambos incluyen deposición sedimentaria, extrusión de lava que varía desde composición máfica hasta ultramáfica, deformación e intrusión granítica. El ciclo más viejo, data de **2950 a 3200 Ma**, es conocido como el Evento Leoneano; las formaciones geológicas afectadas por este ciclo exhiben una tendencia este-oeste. El ciclo más joven, conocido como Evento Liberiano data de **2700 Ma** con una tendencia aproximadamente

de **norte-sur** (Patrick, 2005). Este grupo está constituido por granitos foliados y no foliados, así como sinformes, dominan las anfibolitas supracorticales, grauvacas, hierro bandeado (BIF), sedimentos magnesianos y tobas, además de rocas ígneas intrusivas de composición básica y ultramáfica.

La deformación tectónica de los cinturones de rocas verdes se divide en pre-diapírica, diapírica y post-diapírica. Las primeras formaciones fueron traslacionales, principalmente de cabalgamientos; los segundos fueron del tipo compresional sin adelgazamiento de la corteza y, finalmente, el tercero sí involucra adelgazamiento de la corteza. Únicamente las estructuras diapíricas son un elemento esencial en la evolución de los cinturones de rocas verdes, no obstante, las otras estructuras también son importantes. Las estructuras pre-diapíricas y diapíricas están relacionadas directamente con procesos de subducción (Shackleton, 1995).

La tendencia general de las estructuras post-diapíricas pueden asociarse a procesos de acreción o de colisión, deformación del Arcaico la cual es **este-noreste** (Shackleton, 1995). Las rocas supracorticales que forman actualmente parte de los cinturones de rocas verdes, se encuentran en las Montañas Sula, las Colinas de Kangari, Nimini, Gori y Kambui, así como las áreas de Sankarama y Serekolia, comprenden entre todas ellas el Supergrupo Kambui (Patrick, 2005).

Es posible que en todos estos cinturones se haya suscitado un periodo prolongado de vulcanismo cíclico con muy poca o nula deposición de sedimentos clásticos a la cual le siguió un largo periodo de sedimentación de materiales clásticos derivados de las rocas volcánicas y de la corteza granítica. Los sedimentos clásticos que rellenaron las

depresiones creadas por la subsidencia volcánica son, por lo tanto, inmaduros y los materiales sedimentarios que traspasaron diapíricamente a través del cinturón granitoide de rocas verdes marcaron la etapa final del tectonismo Arcaico (Umeji, 1983).

A continuación, se describe detalladamente, por eón, la litología predominante de Sierra Leona (Warnsloh, 2011):

3.5.1. ROCAS ARCAICAS

La mayor parte de Sierra Leona está ocupada por un escudo granítico antiguo que contiene restos gnéisicos de formaciones más viejas (Fig. 5). Éstas datan de principios del Arcaico e incluyen granitos gruesos cristalinos, cuarzo-granulitas y granulitas hematíticas.

Sobre ellos yacen, en discordancia, serpentinas, anfíbolitas, conglomerados y rocas ferruginosas pertenecientes al **Supergrupo Kambui** que incluye a las **montañas Sula** y las **colinas Kangari, Kambui, Nimini, y Gori** (Figuras 5 y 6). Este Supergrupo se divide en los **Grupos Sula, Marampa y Kasila** (Tabla 5). Al norte de Sierra Leona se pueden encontrar formaciones graníticas complejas, migmatización, deformación a lo largo del eje **este-oeste** y formaciones pegmatíticas. Este episodio termo-tectónico se trata del Evento Leoneano, antes mencionado, y se asume que precedió a la deposición del Supergrupo **Kambui** (Figuras 5 y 6). Esta unidad incluye los depósitos de hierro de **Marampa** y **Tonkolili**.

En el sureste de Sierra Leona, Liberia y al oeste de Costa de Marfil existen pequeños restos de esquisto (un máximo de 40 km de largo) con sucesiones estratigráficas más delgadas (raramente mayores a 1 km) en donde las BIF son dominantes y los complejos de gabbro-anortosita son menores.

El grupo ofiolítico de esquistos *Kambui* se divide en tres grupos; uno inferior ultramáfico, uno intermedio máfico y uno superior sedimentario. Dentro del grupo sedimentario las rocas más comunes son grauvacas, turbiditas, y cuarcitas con menores cantidades de fucsita-cuarcita, conglomerados, meta-pedernal y **formaciones de hierro bandeado** (Warnsloh, 2011).

Tabla 5. Características estratigráficas y litológicas de los Grupos Kasila, Marampa y Sula, con sus respectivas Formaciones. Los Grupos pertenecen al Supergrupo Kambui. El Grupo Kasila y Marampa pertenecen al eón Proterozoico. Los Grupos en la parte superior de la tabla son más jóvenes que los de la parte inferior para ese tiempo geológico. Elaboración propia con información compilada de Warnsloh (2011), Williams (1978) y De Waele (2014).

		Formación Matoto	Formación Rotokolón
GRUPO MARAMPA	<ul style="list-style-type: none"> El Grupo Marampa forma parte de las formaciones supracorticales del Arqueano, dominado por finas capas de formaciones de hierro bandeado. Las rocas en las partes más bajas del Grupo tienden a ser volcánicas de clorito-sericita en el este y anfíbolitas en el oeste, lo que refleja el aumento de metamorfismo de este a oeste Se subdivide en las Formaciones Matoto y Rotokolón 	<p>Consiste de 750 m de lavas baálticas con horizontes almohadillados de hasta 25 m de espesor. Las andesitas tienen fenocristales de piroxenos intercaladas con rocas ultramáficas, que consisten en olivino-serpentinitas y rocas cloríticas. Contiene anfíbolitas con magnetita</p>	<p>Es principalmente meta-sedimentaria y contiene horizontes de guijarros laminación cruzada, con tobas y andesitas secundarias. Las cuarcitas en la parte superior son, por lo regular, manganíferas ricas en hematita especular y fuchsita. Contiene esquistos de magnetita – especularita</p>
GRUPO KASILA	<ul style="list-style-type: none"> Está conformado por un grupo distintivo de gneises máficos y granulitas que yacen a lo largo de la región SW del cratón de África Occidental en Sierra Leona y pasa a través de Liberia en dirección SE Gran parte del Grupo Kasila está compuesto por granulitas básicas de grano fino a mediano que contienen pequeños horizontes de rocas con magnetita, cuarzo-diópsido y sillimanita. Las granulitas están intrusionadas por gabros deformados, anortositas y rocas ultramáficas 		
GRUPO SULA	<ul style="list-style-type: none"> Evento Leoneano Fue depositado, deformado y metamorfoseado en el Evento Liberiano En este Grupo se encuentran las <i>Colinas Loko, Gori, Kambui, Nimini, Kangari y las Montañas Sula</i>, siendo en estas dos últimas donde hay mayor abundancia de los depósitos BIF Se subdivide en las Formaciones Tonkolili y Sonfón 	Formación Sonfón	Formación Tonkolili
		<p>Consiste predominantemente de anfíbolitas de diferentes tamaños de grano y composición. Es de origen meta-baáltico, algunas rocas contienen diópsido y grosularia. Asimismo, hay mineralización por sulfuros de hierro, cobre y arsénico. Hay rocas ultramáficas y depósitos BIF</p>	<p>Está compuesta predominantemente de sedimentos clásticos con capas delgadas de sílice y tobas metavolcánicas, en las cuales se encuentra mineralización de magnetita. Descansa sobre la formación Sonfón</p>

El evento Leoneano fue precedido por un cuerpo ígneo básico y por la formación de un cinturón de rocas verdes, conocido como Grupo Loko, el cual no se menciona ya que ha sido totalmente erosionado (MacFarlane, 1981).

3.5.2. ROCAS PROTEROZOICAS

En la Tabla 6 se describen los Grupos y Formaciones correspondientes al eón Proterozoico. Las Figuras 5 y 6 muestran su ubicación geográfica y periodos de deposición.

Tabla 6. Características estratigráficas y litológicas del Grupo Río Rokel, con sus respectivas Formaciones. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo están ordenadas las Formaciones de las más viejas a las más jóvenes para ese tiempo geológico. Elaboración propia con información compilada de Warnsloh (2011) y Culver (1979).

		Formación Tabe	Formación Makani	Formación Teve
GRUPO RÍO ROKEL	<ul style="list-style-type: none"> ○ Se extiende al sur desde Guinea a Sierra Leona ocupando un cinturón de 30 km de ancho con tendencia SSE ○ Este grupo fue plegado y metamorfoseado por el <i>Evento Rokelides</i> hace ≈ 500 Ma ○ Este grupo se divide en las formaciones: <i>Tabe, Makani, Teye, Mabole, Taia</i> y <i>Colinas Kasewe</i> 	<p>Descansa en discordancia sobre el basamento granítico Arcaico y aflora a lo largo del margen oriental del principal afloramiento del <i>Grupo Río Rokel</i>. Cuenta con lutitas interestratificadas con cuarcita, arcosa y conglomerado. Se subdivide en los miembros <i>Tibai, Taban</i> y <i>Dodo</i></p>	<p>Se compone de arcillas limosas grises con intercalaciones ortocuarcíticas y subarcosas</p>	<p>Secuencia gruesa de lutitas color azul-marrón a gris, intercaladas con capas de areniscas gris verdoso de 5 mm a 0,5 m de espesor. Algunas secuencias consisten casi por completo de limolitas</p>
		Formación Mabole	Formación Taia	Formación Colinas Kasewe
		<p>Está compuesta predominantemente de lutitas con intercalaciones de limolitas, ortocuarcitas, subarcosas y arcosas</p>	<p>Consiste de lodolitas grises y lutitas con algunas intercalaciones de capas de arena y arcilla</p>	<p>Se caracteriza por lentes de hasta 2 km de espesor dentro de las formaciones <i>Mabole</i> y <i>Taia</i>, se compone de tobas volcánicas y flujos de lava. Predominan andesitas</p>

3.5.3. ROCAS MESOZOICAS – CENOZOICAS.

En la Tabla 7 se describen los depósitos más recientes en Sierra Leona. Las Figuras 5 y 6 muestran su ubicación geográfica y periodos de deposición.

Tabla 7. Características estratigráficas y litológicas del Grupo Saionia Scarp, el Complejo Freetown, el Grupo Bullom y las rocas de origen intrusivo (diques y sills de diabasa). Los Grupos en la parte superior de la tabla son más jóvenes que los de la parte inferior para ese tiempo geológico. Los intrusivos de diabasa son posteriores al Complejo Freetown y anteriores al Grupo Bullom. Elaboración propia con información compilada de Warnsloh (2011).

		INTRUSIVOS (DIQUES Y SILLS DE DIABASA)
GRUPO BULLOM	<ul style="list-style-type: none"> ○ Estos depósitos se extienden hasta 50 km tierra adentro y se encuentran hasta 40 m de altura sobre el nivel del mar ○ El Grupo <i>Bullom</i> está constituido por una secuencia con variaciones laterales de gravas con hierro pobremente consolidadas, arenas y arcillas con lateritas intraformacionales ocasionales y vetas lenticulares de lignito ○ Aluviones y arcillas presentes que son generalmente caoliníticas de color rojo, púrpura y blanco 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Los diques y sills de diabasa cubren gran parte de Sierra Leona ○ Las diabasas son más comunes cerca de la costa, intrusionando rocas precámbricas y las del Grupo del <i>Río Rokel</i> ○ Los diques muestran variación mineralógica, algunos contienen olivino y ortopiroxeno; otros muestran únicamente vestigios de estos minerales ○ La magnetita, ilmenita e intercrecimiento gráfico de cuarzo-feldespato se presentan como minerales accesorios ○ Los sills de diabasa forman resistentes capas en 2 montañas importantes de Sierra Leona, <i>Bintumani</i> y <i>Saionia Scarp</i>. ○ La composición mineralógica de los sills es similar a la de los diques
COMPLEJO FREETOWN	<ul style="list-style-type: none"> ○ Se compone de una serie de 6 km de espesor de rocas de composición gabroica, que contiene capas de dunita, troctolita, gabro de olivino, gabro, leucogabro y anortosita ○ El complejo intrusionó en los gneises del Grupo <i>Kasila</i>; le sobreyacen sedimentos del Grupo <i>Bullom</i> cuyas capas inferiores corresponden al Eoceno. Presentan estructuras sedimentarias tales como estratificación cruzada ○ El complejo ha sido fechado con 193 Ma 	
GRUPO SAIONIA SCARP	<ul style="list-style-type: none"> ○ Cubre un área de 50 km² en el norte de Sierra Leona, y se extiende hacia el norte en Guinea ○ Descansa de manera discordante sobre rocas graníticas arcaicas y sobre conglomerados del Grupo <i>Río Rokel</i>, éste último fue plegado durante el evento termo-tectónico Pan-africano ○ La secuencia sedimentaria del Grupo <i>Saionia Scarp</i> es de 190 m de espesor, probablemente perteneciente al Triásico y está intrusionado por varios sills de diabasa, de hasta 90 m de espesor, probablemente pertenecientes al Triásico ○ El Grupo está subdividido en las formaciones de <i>Moria</i> y <i>Cascada</i> 	

3.6. GEOLOGÍA LOCAL DE TONKOLILI

Tonkolili se encuentra sobre un basamento (Figs. 5 y 6) formado por granitoides (Leoneanos y Liberianos), se cree que se emplazaron durante los eventos cinemáticos relacionados con la orogénesis. Sobre este basamento yace de manera discordante una secuencia con metamorfismo regional meta-sedimentaria, meta-volcánica y unidades litológicas vulcano-sedimentarias y ultramáficas pertenecientes al Súper Grupo Kambui. Tonkolili está dominada por unidades litológicas pertenecientes al Grupo Sula, el cual es parte del Supergrupo Kambui (Armitage, 2010). El Grupo Sula (Fig. 6) está comprendido por la Formación Sonfón y la Formación Tonkolili.

La Formación Sonfón está compuesta de anfibolitas con lavas almohadilladas y rocas ultramáficas, así como esquisto de anfibolita y hornblenda. En menor medida hay depósitos BIF, los cuales están interestratificados con anfibolitas. Sobre esta Formación descansa la Formación Tonkolili de manera concordante, en la cual la parte superior alberga la mayoría de los depósitos BIF (caracterizados por tener alternancia de capas delgadas de magnetita y sílice) y está compuesta de capas alternadas finas, bien estratificadas de mica-esquisto de cuarzo, sedimentos semipelíticos a pelíticos y posiblemente tobas. La parte inferior está compuesta principalmente por mica-esquisto de cuarzo de grano grueso, el cual gradúa en cuarcitas hacia el sur del área de estudio. En las tobas se encuentran dos tipos de mineralizaciones en forma de bandas y lentes, la mineralización primaria de magnetita y la secundaria de hematita/goethita (Armitage, 2010). Estas mineralizaciones tienen un porcentaje férrico aproximado de 55 % (Dzigbodi, 2009).

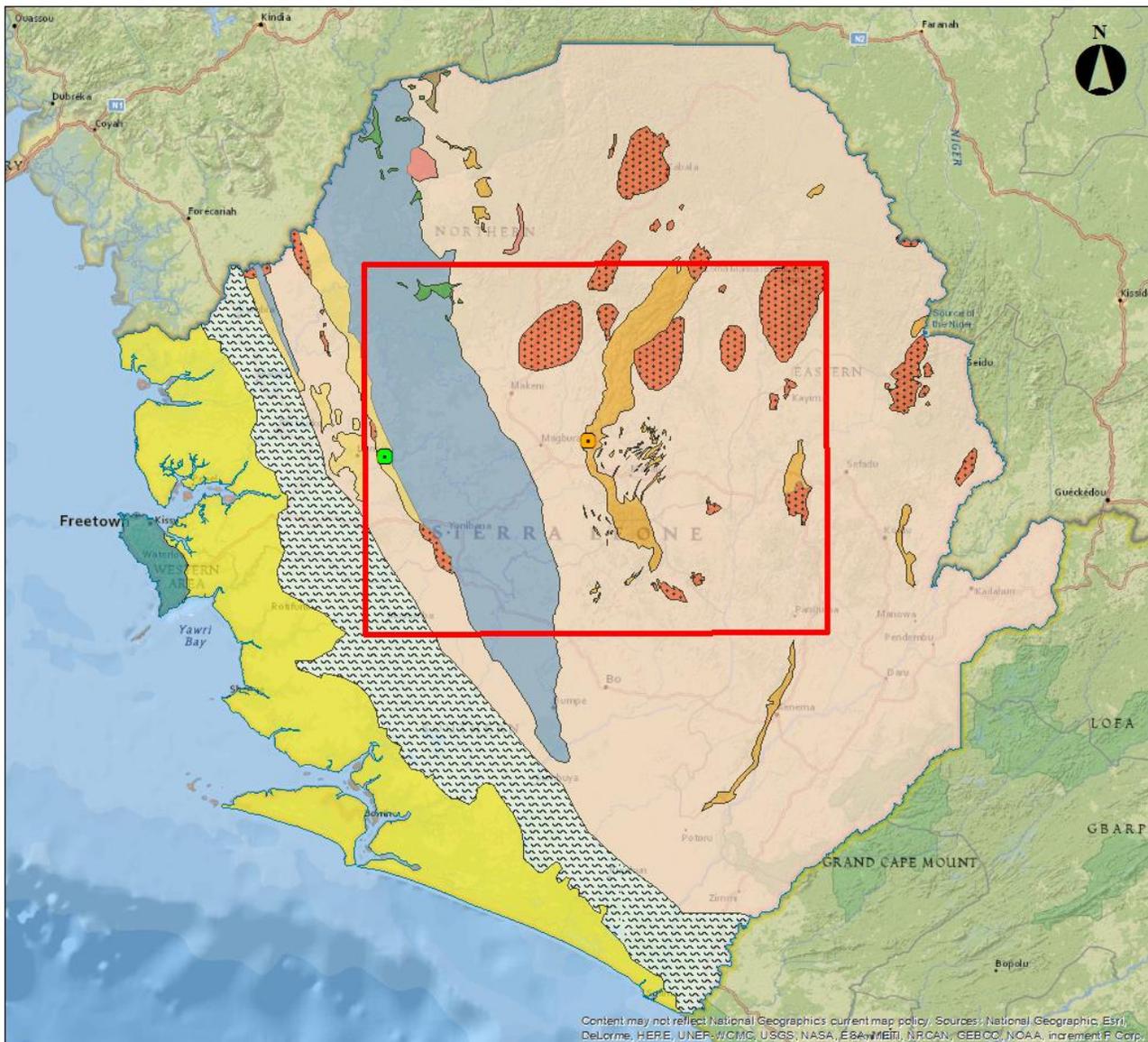
El mineral principal que se encuentra en esta formación es de magnetita. Estos depósitos han sido clasificados como tipo Algoma (Dzigbodi, 2009).

3.7. GEOLOGÍA LOCAL DE MARAMPA

La secuencia supracortical del grupo Marampa corresponde al eón Arcaico (Figuras 5 y 6) la cual fue afectada por el metamorfismo Paleoproterozoico Eburniano (Morel 1979; Wright et al. 1985).

El grupo Marampa está dividido por dos formaciones (Figura 6), la formación metavolcánica Matoto y la formación metasedimentaria que le sobreyace Rotokolon, en ambas existe la ocurrencia mineral de hierro. La formación Matoto está compuesta por lavas basálticas con zonas de lavas almohadilladas de hasta 25 m de espesor, intercalada por serpentinitas y andesitas (Williams, 1978), además contiene anfibolitas con magnetita, unidades ultramáficas serpentinizadas y serpentinitas de talco (De Waele, 2014), así como tobas volcánicas que varían de composición máfica a félsica y sedimentos vulcanogénicos (Dzigbodi, 2009), esta Formación se encuentra limitada por fallas y cabalgamientos. El espesor estimado varia de 200 m a 750 m. Por otro lado, la formación Rotokolon es una sucesión metasedimentaria dominada por semipelitas, psamitas, cuarcitas (ricas en hematita), paragneises, esquistos de clorita, esquistos de moscovita, sericita y esquistos de magnetita especular y formaciones de hierro bandeado (De Waele, 2014).

El grupo Marampa contiene minerales de hierro, rocas de origen volcánico que varían de composición félsica a máfica y sedimentos vulcanogénicos. Las rocas de Marampa datan de aproximadamente **2,100 Ma**, la deformación Pan-africana data de **560 Ma**.



GEOLOGÍA

Rocas Cenozoicas y sedimentos recientes

 Grupo Bullom

Rocas e intrusivos del Mesozoico

 Diques y sills de diabasa

 Complejo Freetown

 Grupo Saionia Scarp

Rocas del Proterozoico

 Grupo Río Rokel

 Grupo Marampa

 Grupo Kasila

Rocas Arcaicas

 Grupo Sula (cinturón de rocas verdes)

 Granito Liberiano

 Basamento granítico (Leoneano)

 Gneises migmatíticos y granitoides

LEYENDA

 Área de estudio  Tonkolili  Marampa

Escala Numérica

1:1.500.000

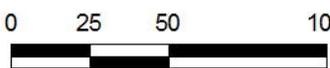
 0 25 50 100
Kilómetros

Figura 5. Mapa geológico de Sierra Leona. Elaboración propia con información compilada de Hydro Nova (2017), Lapworth (2015), Keyser (2004), NMA (2004), Culver (1979), Warnsloh (2011), Williams (1978), De Waele (2014), Kröner (2004).

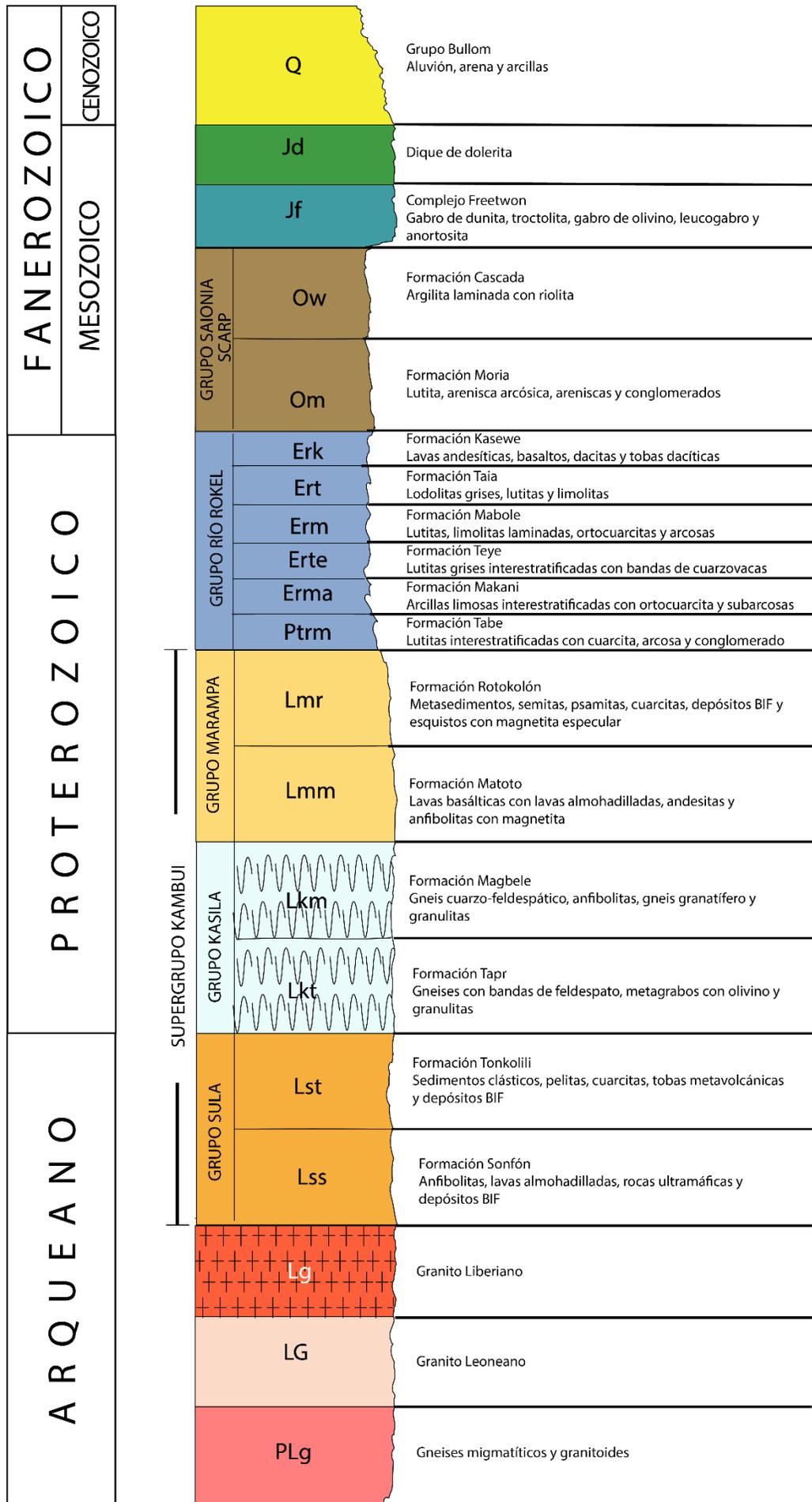


Figura 6. Columna estratigr3fica de Sierra Leona. Elaboraci3n propia con informaci3n compilada de Hydro Nova (2017), Lapworth (2015), Keyser (2004), NMA (2004), Culver (1979), Warnsloh (2011), Williams (1978), De Waele (2014), Kr3ner (2004).

4. METODOLOGÍA

4.1. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

4.1.1. DEFINICIÓN

La **percepción remota**, en palabras simples, significa obtener información acerca de un objeto o material sin tener contacto con él. Esto involucra dos facetas: la tecnología de adquisición de datos a través de algún dispositivo que esté localizado a cierta distancia del objetivo (e.g. satélites), y el análisis de datos para la interpretación de atributos físicos del objeto, ambos aspectos están íntimamente relacionados.

La adquisición de datos en **percepción remota** es mediante la radiación electromagnética (comúnmente en un rango de longitud de onda de 0.4μ y 30 cm) que reciben sensores en vuelo en plataformas aéreas o espaciales.

4.1.2. HISTORIA

Como antecedente elemental a la **percepción remota** encontramos la cámara fotográfica la cual tiene ya más de 150 años desde su invención, siendo el francés Joseph-Nicéphore Niépce el hombre que tomó la primera fotografía en 1826. Posteriormente, para mediados del siglo XIX surgió la idea de tomar fotografías aéreas en globos aerostáticos con propósitos de índole topográfica. Con la llegada de la Primera Guerra Mundial, los ejércitos montaban cámaras en los aviones, lo que les proporcionaba vistas aéreas de grandes extensiones de terreno que resultaron invaluable para el reconocimiento militar.

El término de “percepción remota” fue utilizado por primera vez en los años 50 por la estadounidense Evelyn Pruitt de la Oficina Naval de Investigación de EE.UU. Sin embargo, fue hasta la Era Espacial que los rusos y estadounidenses empezaron a hacer uso de diversos tipos de sensores para obtener imágenes de la superficie terrestre. El 23 de julio de 1972 el Landsat 1 (también conocido como ERTS-1) fue puesto en órbita, lo que representó el primer paso en el uso tecnologías espaciales y de teledetección para registrar y gestionar los recursos que posee el planeta Tierra.

4.1.3. PRINCIPIO FUNDAMENTAL

El principio básico involucrado en los métodos de percepción remota es que, en diferentes rangos de longitudes de onda del espectro electromagnético, cada objeto o material refleja o emite cierta intensidad de luz, la cual depende de los atributos físicos o composicionales del objeto.

Las curvas mostradas a continuación muestran la intensidad de luz emitida o reflejada por los objetos en diferentes longitudes de onda, éstas son conocidas como **curvas de respuesta espectral** o **firmas espectrales**, las cuales constituyen información básica requerida para cumplir con los objetivos utilizando percepción remota. Asimismo, se pueden adquirir firmas espectrales para diferentes tipos de minerales, rocas, tipos de vegetación, etc. Estos pueden ser consultados en el USGS, o bien, en material bibliográfico.

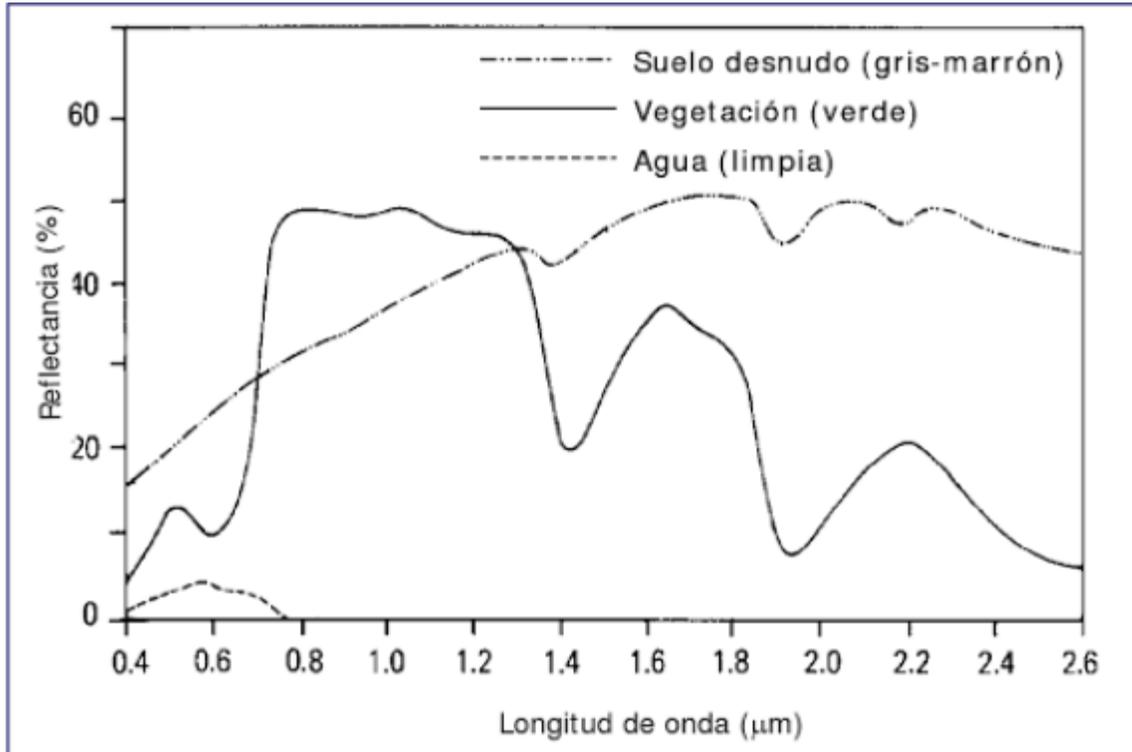


Figura 7. Curvas de reflectancia espectral para vegetación, suelo desnudo y agua (imagen tomada de Chuivoco, 1996).

4.2. ASPECTOS FÍSICOS

4.2.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La luz puede representarse como una onda electromagnética armónica que se propaga tanto en el vacío como en medios materiales. La radiación electromagnética se describe utilizando la longitud de onda (λ) que se define como la distancia que hay que recorrer para encontrar un punto en la misma fase de la variación a lo largo de la onda. Las principales regiones de interés dentro del espectro electromagnético para percepción remota son las del espectro visible, infrarrojo cercano, medio y lejano y la región del radar. Aquí usaremos únicamente las bandas en el visible e infrarrojo. La radiación

electromagnética se clasifica según el valor de la longitud de onda, tal y como se muestra en la Tabla 8.

Los sensores satelitales se caracterizan por abarcar ciertas regiones del espectro electromagnético con el objeto de discernir entre diferentes tipos de materiales que se encuentran sobre la superficie terrestre. A estas regiones se les conoce como bandas espectrales.

Tabla 8. Longitudes de onda asociadas a su color y espectro (Boreman, 1999).

Longitud de onda (λ)	Nombre
$10^{-6} - 10^{-2} \mu\text{m}$	rayos X
$10^{-2} - 0.4 \mu\text{m}$	ultravioleta
$0.4 - 0.7 \mu\text{m}$	visible
0.40 - 0.46	violeta
0.46 - 0.49	azul
0.49 - 0.55	verde
0.55 - 0.58	amarillo
0.58 - 0.60	naranja
0.60 - 0.70	rojo
$0.7 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$	infrarrojo próximo
$3 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$	infrarrojo medio (primera ventana)
$5 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$	infrarrojo medio (segunda ventana)
$15 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$	infrarrojo lejano
$1 \text{mm} - 1 \text{cm}$	ondas milimétricas
$1 \text{cm} - 1 \text{m}$	microondas
$1 \text{m} - 10 \text{km}$	ondas de radio

4.2.2. INTERACCIONES CON LA ATMÓSFERA

La radiación total que recibe la Tierra está conformada por radiación directa, la cual está constituida por fotones provenientes directamente del disco solar, que no fueron absorbidos ni dispersados al atravesar la **atmósfera**; la radiación difusa proviene de todos lados, ésta se origina por la interacción de los fotones con la materia (átomos o moléculas) que, sin absorberlos, los reflejan hacia diferentes direcciones dependiendo de la longitud de onda (λ) y del tamaño de la **partícula o molécula**. De esto se desprende la dispersión de Rayleigh y la de Mie. La dirección de la dispersión o “*scattering*” es imposible de predecir.

4.2.2.1. Dispersión de Rayleigh

La dispersión de Rayleigh (dispersión molecular) resulta de la interacción de fotones con gases como N_2 y O_2 . Se define en forma sencilla como el resultado de la reflexión (o mejor expresado el cambio de dirección) que sufre un fotón al “colisionar” con una molécula de diámetro menor que la longitud de onda del fotón. Operacionalmente, la dispersión de Rayleigh equivale a la fracción de luz dispersada por una partícula de tamaño menor que la longitud de onda del fotón que interacciona con ella.

4.2.2.2. Dispersión de Mie

Esta dispersión no-molecular es el producto de la interacción de fotones con partículas de mayor tamaño que su longitud de onda, como son los aerosoles o las gotas de agua componentes de las nubes. Este tipo de dispersión es mucho más compleja que la de

Rayleigh, debido a que influye el tamaño, la forma y la distribución de las partículas en la nube o la **atmosfera**.

Ambos tipos de dispersión tienen una relación inversa con λ . Esto significa que, mientras menores son las λ a que está expuesta una partícula, mayor será el componente disperso con respecto al directo. Por tanto, las λ menores son más dispersadas que las λ más largas.

4.2.2.3. Dispersión No Selectiva

La dispersión **no-selectiva** tiene lugar en las porciones más bajas de la atmósfera. Las partículas son aproximadamente mayores a 10 veces la longitud de onda incidente, se dice que es no-selectiva porque todas las longitudes de ondas son dispersadas y se muestran como luz blanca.

La razón por la cual la dispersión o "*scattering*" es importante para la percepción remota es que este fenómeno puede reducir el contenido de información de las imágenes. El contraste de imágenes se pierde, lo cual dificulta apartar objetos de otros.

4.2.3. INTERACCIONES CON LA SUPERFICIE

Al tener contacto con la superficie de la **tierra** la energía electromagnética será reflejada, dispersada, absorbida o transmitida. En **percepción remota** nos interesa más el fenómeno de reflexión, el cual dependerá de las irregularidades de la superficie y ángulo de incidencia. Las reflexiones pueden ocurrir de dos tipos:

- Reflexión especular: Si la superficie de interacción es relativamente suave para la longitud de onda, ésta redirigirá casi toda la radiación con el mismo ángulo de incidencia, lo cual cumpliría con la Ley de Snell.
- Reflexión difusa: Si la superficie es relativamente rugosa para la longitud de onda, la energía será dispersada de manera cuasi-equitativa en todas las direcciones.

4.2.4. REFLECTANCIA

Se refiere a la brillantez relativa de una superficie según se mida durante un intervalo específico de longitud de onda, se expresa matemáticamente con la siguiente razón:

$$\text{Reflectancia} = \frac{\text{Radiación de la superficie del cuerpo}}{\text{Radiación incidente}}$$

El resultado es expresado en porcentaje y es diferente para cada material y para cada ventana espectral.

4.3. ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN

Para el proceso de adquisición es necesaria la interacción entre la radiación incidente (proveniente del Sol en nuestro caso) o bien, de alguna fuente artificial y los materiales de interés. Durante la obtención de información suceden los siguientes pasos:

- 1. Fuente de energía o iluminación (A):** Se requiere una fuente de energía que **ilumine** o **proporcione** energía electromagnética al objeto de interés.
- 2. Radiación y atmósfera (B):** Al viajar la energía de la fuente al objetivo, ésta también interactúa con la atmósfera al pasar a través de ella. Esta interacción sucede dos veces, una cuando viaja hacia el objetivo y la segunda cuando viaja del objetivo al sensor.
- 3. Interacción con el objetivo (C):** Una vez que la energía pasa a través de la atmósfera, ésta interactúa con el objetivo de tal modo que dependerá de las propiedades de éste y de la radiación.
- 4. Registro de la energía electromagnética por el sensor (D):** La energía que llega al objetivo es dispersada y reflejada por éste, nosotros requerimos de un sensor remoto (que no se encuentre en contacto con el objetivo) para recolectar y registrar la radiación electromagnética.
- 5. Transmisión, recepción y procesamiento (E):** La energía registrada por el sensor es transmitido, en forma electrónica, a una estación de recepción y procesamiento donde los **datos** son **convertidos** en archivos digitales tipo **ráster**.
- 6. Interpretación y Análisis (F):** Los archivos ráster se despliegan como imagen para después ser procesada digitalmente y/o electrónicamente, con el objeto de extraer información acerca del objetivo para finalmente interpretarla en forma digital y visual.
- 7. Aplicación (G):** Finalmente, integramos la información obtenida a partir de las imágenes multiespectrales con otros estudios realizados en la zona del objetivo.

A continuación, en la Figura 8. se muestra un esquema que ilustra los pasos anteriormente mencionados:

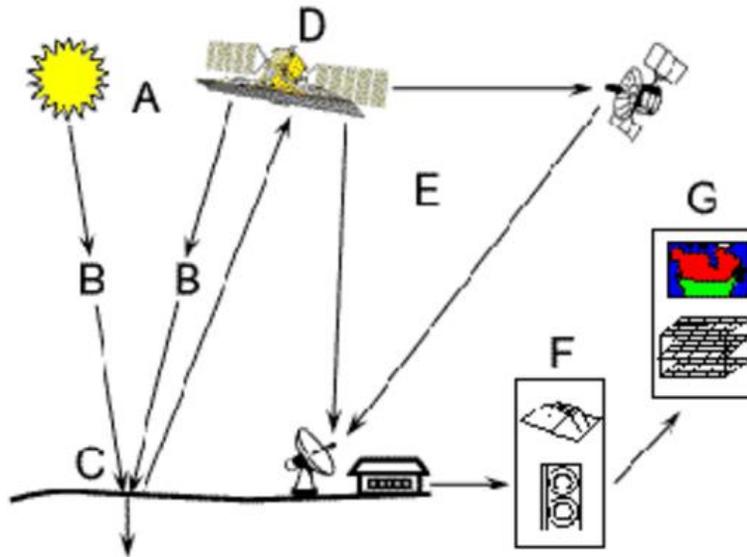


Figura 8. Adquisición de información (Imagen obtenida de Natural Resources Canada, 2015).

El registro de las ondas electromagnéticas se lleva a cabo en sensores que yacen sobre plataformas, éstas son vehículos en movimiento que alcanzan alturas aproximadas de más de 100 km.

Cada sensor posee distintos tipos de resoluciones de acuerdo a su diseño:

- a) Resolución Espacial: Se refiere al tamaño del objeto más pequeño que se puede ver (píxel) y del área que hay que cubrir (ángulo de barrido).
- b) Resolución Espectral: Indica qué parte del espectro electromagnético se necesita detectar y el ancho de las bandas detectadas, es decir, entre más resolución espectral tengamos, abarcaremos más longitudes de onda del espectro electromagnético.

- c) Resolución Radiométrica: Es la sensibilidad que tiene el sensor de detectar diferencias en brillantez, está determinada por la cuantización, por ejemplo:
6 bits=64 valores de brillantez; 8 bits=256 VB; 10 bits=1024 VB.
- d) Resolución Temporal: Es la periodicidad entre observaciones.

En la Tabla 9, se muestran los satélites y sensores más usados en técnicas de Percepción Remota:

Tabla 9. Satélites y sensores con sus respectivas resoluciones radiométricas, espaciales, temporales y espectrales.

Satélite	Fecha de Lanzamiento	Sensor	Resolución Espacial [m]	Resolución Espectral [μm]	Resolución Temporal [días]	Resol. Radiométrica [bits]
Landsat 1	23/7/1972	RBV	80	B1 (verde) 0.475-0.575 B2 (rojo) 0.85-0.68 B3 (IR cercano) 0.69-0.83	18	6
		MSS	80	B4 (verde) 0.5-0.6 B5 (rojo) 0.6-0.7 B6 (IR cercano) 0.7-0.8 B7 (IR cercano) 0.8-0.11	18	6
Landsat 5	1/3/1984	MSS	75	B4 (verde) 0.5-0.6 B5 (rojo) 0.6-0.7 B6 (IR cercano) 0.7-0.8 B7 (IR cercano) 0.8-0.11	16	8
		TM	30 (120 en B6)	B1 (azul) 0.45-0.52 B2 (verde) 0.52-0.60 B3 (rojo) 0.63- 0.69 B4 (IR cercano) 0.76-0.90 B5 (IR medio) 1.55-1.75 B6 (IR lejano) 10.4-12.5 B7 (IR medio) 2.08-2.35	16	8

Continuación de la Tabla 9.

Landsat 7	15/4/1999	ETM+	30 (60 en B6 y 15 en B8)	B1 (azul) 0.45-0.52 B2 (verde) 0.52-0.6 B3 (rojo) 0.63-0.69 B4 (IR cercano) 0.76-0.9 B5 (IR medio) 1.55-1.75 B6 (IR térmico) 10.4-12.5 B7 (IR cercano) 2.08-2.35 B8 (Pancromática) 0.5-0.9	16	9
Landsat 8	11/2/2013	OLI	30 (15 en B8)	B1 (costero) 0.433-0.453 B2 (azul) 0.45-0.515 B3 (verde) 0.525-0.60 B4 (rojo) 0.63-0.68 B5 (IR cercano) 0.845-0.885 B6 (SW IR) 1.56-1.66 B7 (SW IR) 2.1-2.3 B8 (Pancromática) 0.5-0.68 B9 (Cirrus) 1.36-1.39	16	12
		TIRS	100	B10 (LWIR) 10.6-11.2 B11 (LWIR) 11.5-12.5	26	8
Spot-4	23/3/1998	HRVIR	20 (10 en la pancromática)	(Verde) 0.5-0.59 (Rojo) 0.61-0.68 (IR cercano) 0.79-0.89 (IR medio) 1.58-1.75 (Pancromática) 0.49-0.73	26	8
		Vegetation Instrument	1000	(Azul) 0.43-0.47 (Rojo) 0.61-0.68 (IR cercano) 0.79-0.89 (IR medio) 1.58-1.75	26	8
Spot-5	4/5/2002	HRG	10 (5 en la pancromática)	(Verde) 0.50-0.59 (Rojo) 0.61-0.68 (IR cercano) 0.79-0.89 (IR medio) 1.58-1.75 (Pancromática) 0.49-0.73	26	8

4.3.1. PRE – PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Es necesario realizar operaciones previas (correcciones) antes de proceder con el procesamiento de imágenes, estas operaciones son:

- a) Corrección Radiométrica: La corrección radiométrica corrige por factores variables como: iluminación de la escena, condiciones atmosféricas, geometría de la vista y respuesta del instrumento. El objetivo es recuperar la radiancia “verdadera” y/o reflectancia del material de interés.

La corrección por condiciones atmosféricas tiene como objetivo minimizar la dispersión y absorción de la atmósfera. La dispersión incrementa la brillantez, las longitudes de onda más cortas son influenciadas por la dispersión de **Rayleigh**, **Mie** y la **No selectiva**; por otro lado, la absorción decrece la brillantez, donde longitudes de onda largas en el infrarrojo son influenciadas por la absorción del vapor de agua. Dentro de estas correcciones encontramos:

- Corrección Absoluta: Esta corrección toma en cuenta el ángulo cenital solar al momento del paso del satélite, la transmitancia atmosférica para un ángulo de incidencia dado, la irradiancia espectral en la atmósfera superior y las leyes de dispersión de Rayleigh y Mie.
- Corrección Relativa: Esta corrección toma una banda (o imagen) como línea base y transforma las otras bandas (o imágenes) en correspondencia con ésta.

- b) Corrección Geométrica: Trata de compensar las distorsiones provocadas por varios factores, de manera que las imágenes corregidas tienen una “integridad” geométrica en un mapa.

4.3.2. MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN

Los procedimientos encargados para mejorar la imagen tienen como objetivo mejorar la visualización del contenido de la información de la imagen, este proceso tiende a ser más cualitativo que cuantitativo.

Algunas de estas técnicas son:

- Realce de contraste: Consiste en deformar linealmente el histograma para generar una expansión uniforme de todos los valores.
- Realce espacial: Modifica los valores de los píxeles con base en los valores de los píxeles que lo rodean, entre los que se encuentran:
 - Filtro pasa-altas: Enfatiza los detalles locales y destaca los bordes, e.g. carreteras, parcelas o estructuras geológicas.
 - Filtro pasa-bajas: Enfatiza las tendencias generales y suaviza la imagen.
 - Máscaras direccionales: Generan un valor máximo de salida para cambios en la brillantez en alguna dirección, es decir, realza los cambios en esa dirección.
- Realce espectral: Modifica los valores de los píxeles solamente con base en el valor propio de cada píxel en todas las bandas para identificar respuestas espectrales de los materiales de interés (los métodos de realce espectral se describen brevemente en el siguiente apartado).

- Laplaciano: No varía con la dirección y resalta las regiones de rápido cambio de intensidad, así como puntos, líneas y bordes, también suprime regiones con variación suave.

4.3.3. CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Estos métodos involucran el uso algoritmos computacionales para combinar y hacer interactuar los diferentes aspectos de un conjunto de datos. El objetivo es mostrar las características espectrales que no son evidentes en las imágenes espectrales restauradas y mejoradas. Algunos de los métodos de realce espectral son:

- **Cocientes de bandas:** Es útil para discriminar variaciones espectrales que son enmascaradas por las variaciones de brillantez en las imágenes, también sirve para eliminar variaciones de brillantez debido a efectos topográficos.
- **Índices de Vegetación:** El objetivo es remover el efecto de la brillantez del suelo y aislar y enfatizar los cambios de reflectancia debidos a la vegetación.
- **Composición de falso color:** Se utilizan para realzar la respuesta espectral de materiales, puesto que al seleccionar las bandas que se introducirán a la composición, se incluyen aquellas que contengan los rasgos espectrales que caracterizan a los materiales de interés.
- **Análisis de Componentes Principales:** Se utilizan para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos, es decir, comprime la información obtenida en el conjunto original de datos de n-bandas en un número menor de “nuevos componentes”.

4.4. TÉCNICAS UTILIZADAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

Para llevar a cabo los objetivos anteriormente planteados, se requirió hacer uso del software de procesamiento de imágenes IDRISI Selva versión 17.0, desarrollado por la “Graduate School of Geography” de la Universidad Clark en Estados Unidos, así como el software especializado ArcMap 10.1 de ArcGIS.

A continuación, (Figura 9), se muestra el flujo de trabajo de la metodología empleada.

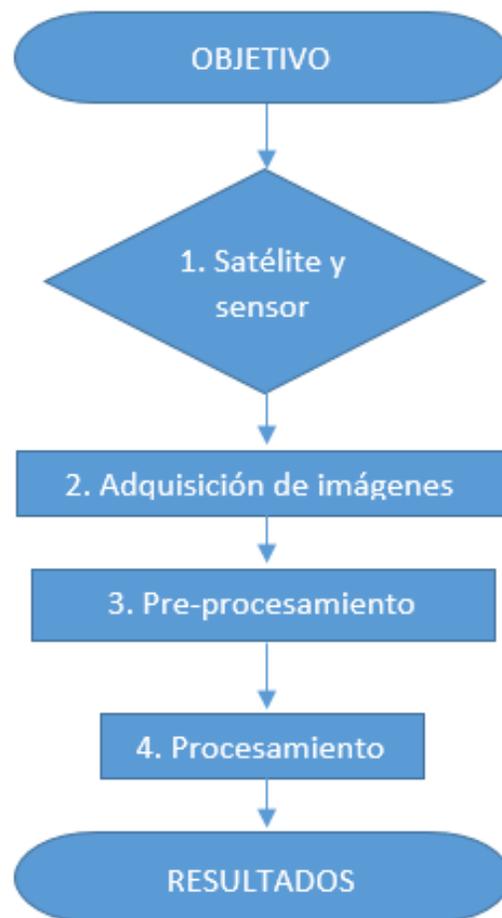


Figura 9. Metodología de trabajo empleada de acuerdo al objetivo propuesto.

4.4.1. SATÉLITE Y SENSOR

El satélite utilizado para el presente trabajo fue el Landsat 5 con sensor TM (ver Tabla 9) debido a que la información necesaria corresponde al año 2010, aunado al hecho de que el sensor TM es bastante útil para la identificación de óxidos.

4.4.2. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Las imágenes fueron obtenidas del USGS, las cuales se encuentran de manera gratuita en la página: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

4.4.3. PRE-PROCESAMIENTO

Respecto a los objetivos de estudio, se utilizaron las bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7, la banda TM6 ha sido descartada ya que pertenece a la región espectral del infrarrojo térmico y ésta no es útil para la finalidad del trabajo.

Las imágenes adquiridas ya tienen las correcciones radiométricas y geométricas, de manera que el primer paso del procesamiento consiste en recortar la imagen considerando la zona de estudio.

Para esto se consideraron las siguientes coordenadas en UTM.

Tabla 10. Coordenadas en UTM de las imágenes recortadas.

Coordenada Mínima en X	113055
Coordenada Máxima en X	276735
Coordenada Mínima en Y	899835
Coordenada Máxima en Y	1028955

A continuación, se aplicó la corrección atmosférica relativa, utilizando el método de sustracción del píxel más oscuro. Ésta corrección requiere de analizar el histograma de cada imagen y restar el valor mínimo de cada una. Los valores sustraídos para cada imagen se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Valores mínimos de los histogramas de cada banda.

BANDA	VALOR MÍNIMO
TM1	47
TM2	18
TM3	14
TM4	14
TM5	0
TM7	1

4.5. PROCESAMIENTO

4.5.1. REALCE ESPECTRAL

Para esta etapa se utilizaron tres técnicas de percepción remota: composición a color, cocientes de bandas y componentes principales, así como la combinación entre éstas, es decir, composición a color con cocientes de bandas y componentes principales con cocientes de bandas.

4.5.1.1. Composición a color

La combinación y superposición de los colores rojo, verde y azul (RVA) dentro de ventanas espectrales de 0.6-0.7 μm , 0.5-0.6 μm y 0.4-0.5 μm respectivamente dan como resultado una *composición de color verdadero*. Si estos colores son asignados a ventanas o bandas espectrales (las cuales son diferentes en cada sensor) es posible mejorar la percepción visual que se tiene de los materiales en estudio, a esto se le conoce como *Composición a falso color*.

Inicialmente se establecieron 3 composiciones: Color Real (321), colocando el cañón Rojo, en la banda 3 el cañón Verde en la banda 2 y el Azul en la 1 (esta y otras composiciones varían dependiendo del sensor que haya sido utilizado). La siguiente composición tuvo como objetivo vislumbrar cuánta vegetación coexiste con los depósitos de hierro, por lo que se requirió de las bandas TM4, TM3 y TM2 en los cañones del rojo, verde y azul respectivamente. Finalmente, para la identificación de óxidos se estableció una composición 345. Siendo 3 para los óxidos, 4 para la vegetación y 5 para hidroxilos

y/o arcillas (posteriormente nos referiremos a éstos últimos como sedimentos) que pudieran coexistir con los otros dos materiales.

4.5.1.2. Cocientes de bandas

El cociente de bandas se define como la imagen que resulta al dividir los números digitales (o valores de brillantez) de una banda entre los números digitales de otra banda (Gibson, 2000).

En este proceso se busca realizar la respuesta espectral de los óxidos, vegetación e hidroxilos (sedimentos). Los cocientes son los siguientes:

Tabla 12. Cocientes de bandas utilizados para la identificación de óxidos, vegetación e hidroxilos (sedimentos).

ÓXIDOS	VEGETACIÓN	HIDROXILOS (SEDIMENTOS)
TM3/TM1	TM4/TM3	TM5/TM7

Antes de llevar a cabo este cociente, es necesario realizar una reclasificación de las bandas TM1, TM3, y TM7. Esto con el objetivo de evitar indeterminaciones al momento de realizar la división.

Una vez realizados los cocientes, las imágenes fueron desplegadas con un ajuste lineal del histograma (“*stretch*”) con una saturación del 1%.

4.5.1.3. Composición a color con cocientes de bandas

Ya obtenidos los cocientes en el paso 4.5.1.2. fue necesario realizar un realce adicional, el cual involucraba realizar una composición a color en dichos cocientes. La composición se muestra a continuación:

Tabla 13. Cañones asignados para los cocientes de bandas utilizados para la identificación de óxidos, vegetación e hidroxilos (sedimentos).

ROJO	VERDE	AZUL
Óxidos	Sedimentos	Vegetación
TM3/TM1	TM5/TM7	TM4/TM3

4.5.1.4. Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (o PCA por sus siglas en inglés) se define como una transformación matemática que genera nuevas imágenes basándose en la varianza y covarianza del conjunto de datos de las imágenes multiespectrales (Gibson, 2000).

Para llevar a cabo el análisis de Componentes Principales se utilizaron las bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7, obteniendo como resultado 6 nuevas componentes.

A continuación, se analizó la matriz de carga obtenida del análisis para determinar qué componente o componentes principales son los apropiados para llevar a cabo el realce de los óxidos.

4.5.1.5. Análisis de componentes principales con cocientes de bandas

Con el objeto de identificar detalladamente en qué regiones de la zona de estudio se encuentran los óxidos de hierro, se utilizaron las imágenes obtenidas del paso 4.5.1.2 para realizar con dos de ellas un análisis de componentes principales. Los cocientes utilizados fueron el de óxidos y el de vegetación. Por tanto, las componentes obtenidas fueron dos.

Hecho esto, se analizó la matriz de carga para determinar cuál de las dos componentes permite identificar óxidos. Una vez obtenida la componente que brinda mejor información de los óxidos, se realizó un ajuste lineal con saturación del histograma del 1%.

4.5.1.6. Mapa de localización de óxidos

Como paso final de la etapa del procesamiento, se compararon los resultados obtenidos entre el análisis de componentes principales con cocientes de bandas y la composición a color con cociente de bandas donde la presencia de óxidos de hierro es evidente a fin de delimitar zonas con alto potencial minero aprovechable.

Después se ubicaron las regiones en Google Earth y se indicaron las vías de acceso para una etapa de exploración.

5. RESULTADOS

A continuación, se muestran los realces espectrales llevados a cabo para lograr los objetivos propuestos en este trabajo.

5.1. COMPOSICIÓN A COLOR

Se realizaron dos composiciones a color, la primera con el objeto de comprender cuánta vegetación hay en las regiones de Marampa y Tonkolili; la segunda tiene como finalidad examinar la coexistencia de óxidos de hierro, vegetación e hidroxilos.

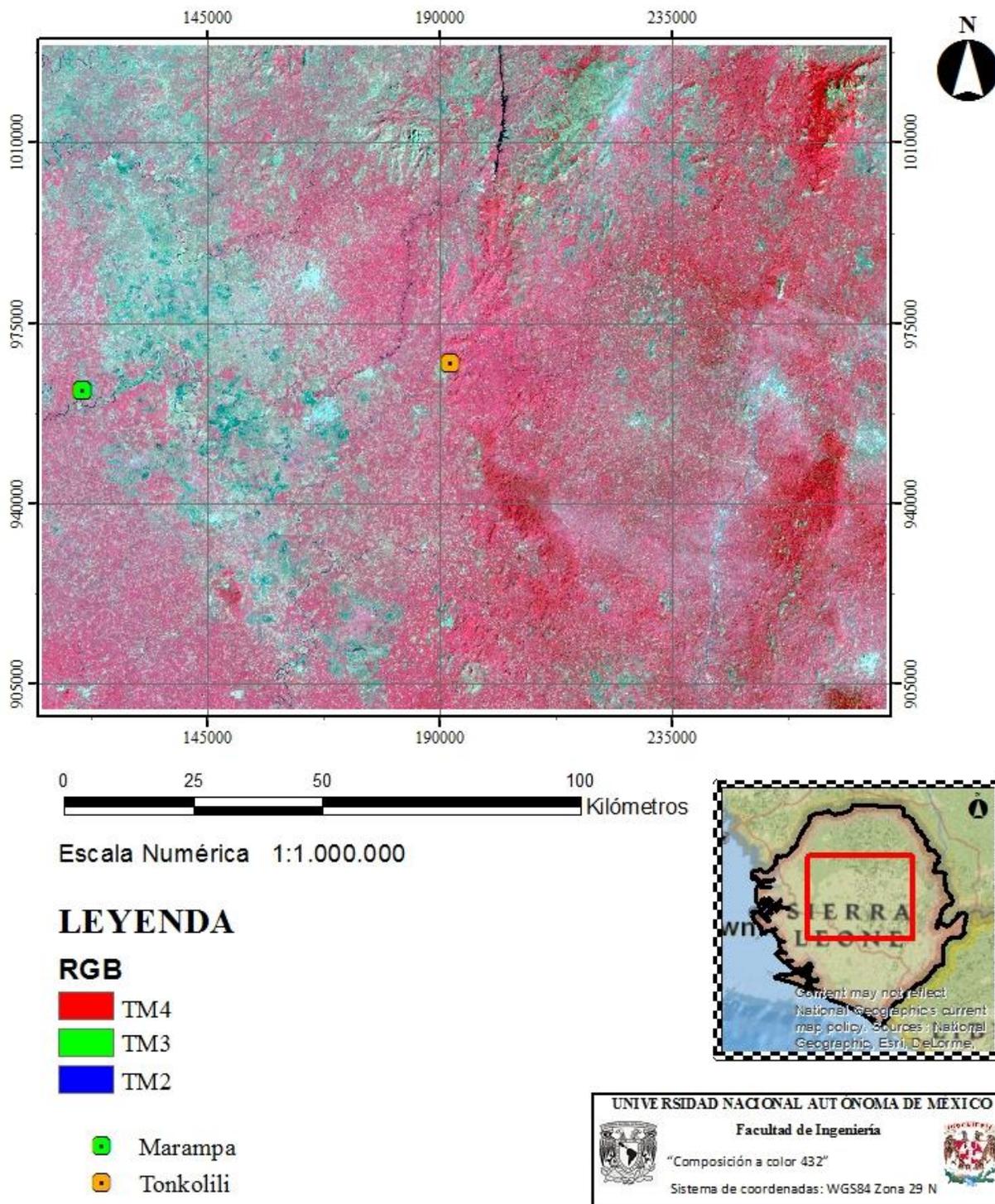


Figura 10. Composición 432. En tonos rojos se encuentra la vegetación.

Era de esperarse, con base en la información previamente adquirida, que la composición (432) para la zona de estudio mostrara bastante vegetación.

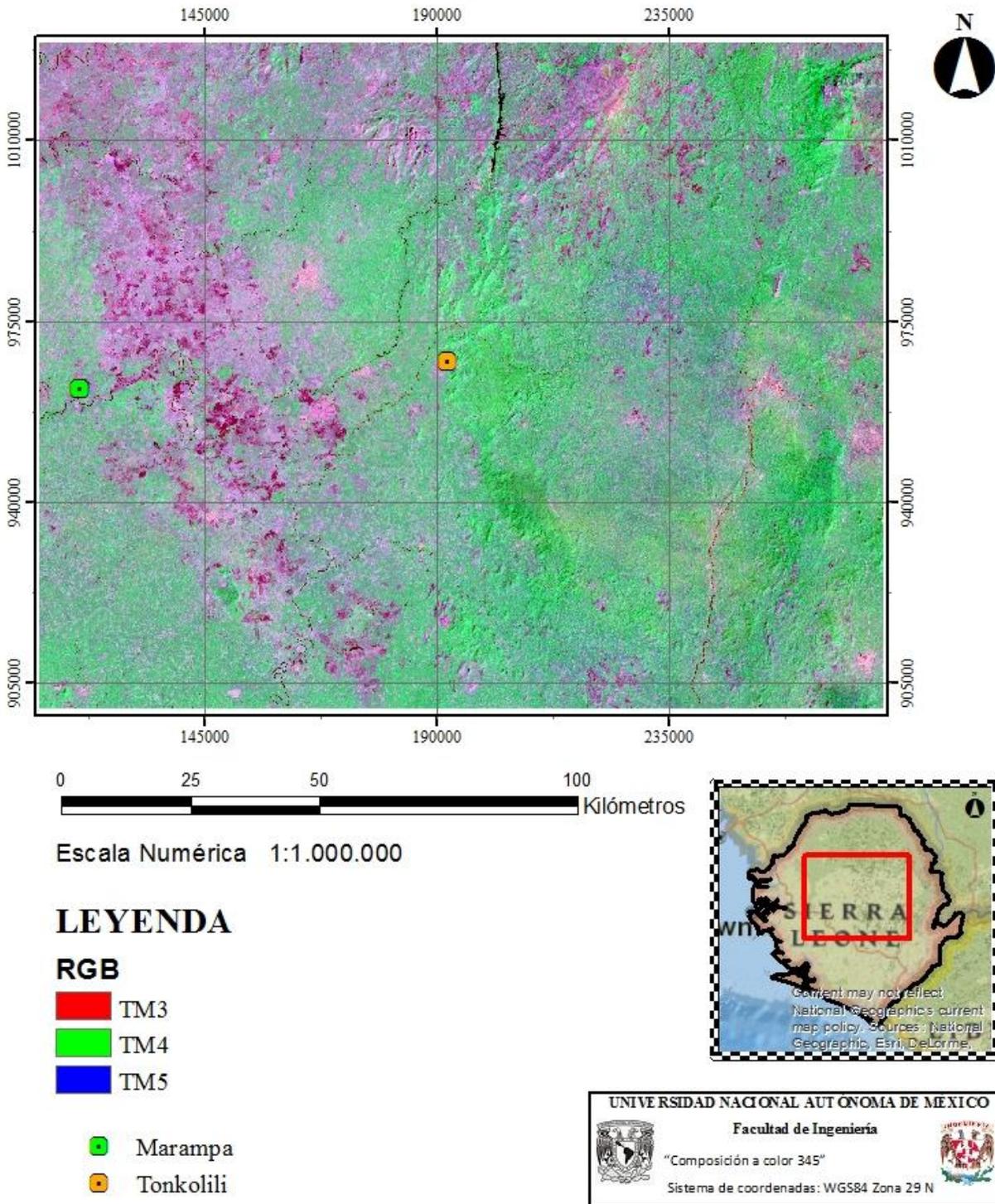


Figura 11. Composición 345. En esta composición se encuentra la vegetación en tonalidades verdes. Los tonos morados indican la presencia de óxidos e hidroxilos en coexistencia.

Como se observa en la Figura 11. aún no estamos visualizando los óxidos de hierro, es por eso que será necesario hacer uso de otras técnicas de realce espectral, tales como cocientes de bandas y análisis de componentes principales (ACP), así como la combinación de éstas para conseguir mejores resultados y lograr separar los óxidos que cohabiten con la vegetación y/o hidroxilos.

5.2. COCIENTES DE BANDAS

Para tener una mejor visualización de los óxidos, que son el material de estudio, fue indispensable llevar a cabo un realce espectral adicional. En proceso de cociente de bandas se lleva a cabo una simple división entre los valores de brillantez de un material en la banda que corresponda a una alta reflectancia y una alta absorbancia.

Los cocientes espectrales realizados son los que se muestran en la Tabla 12.

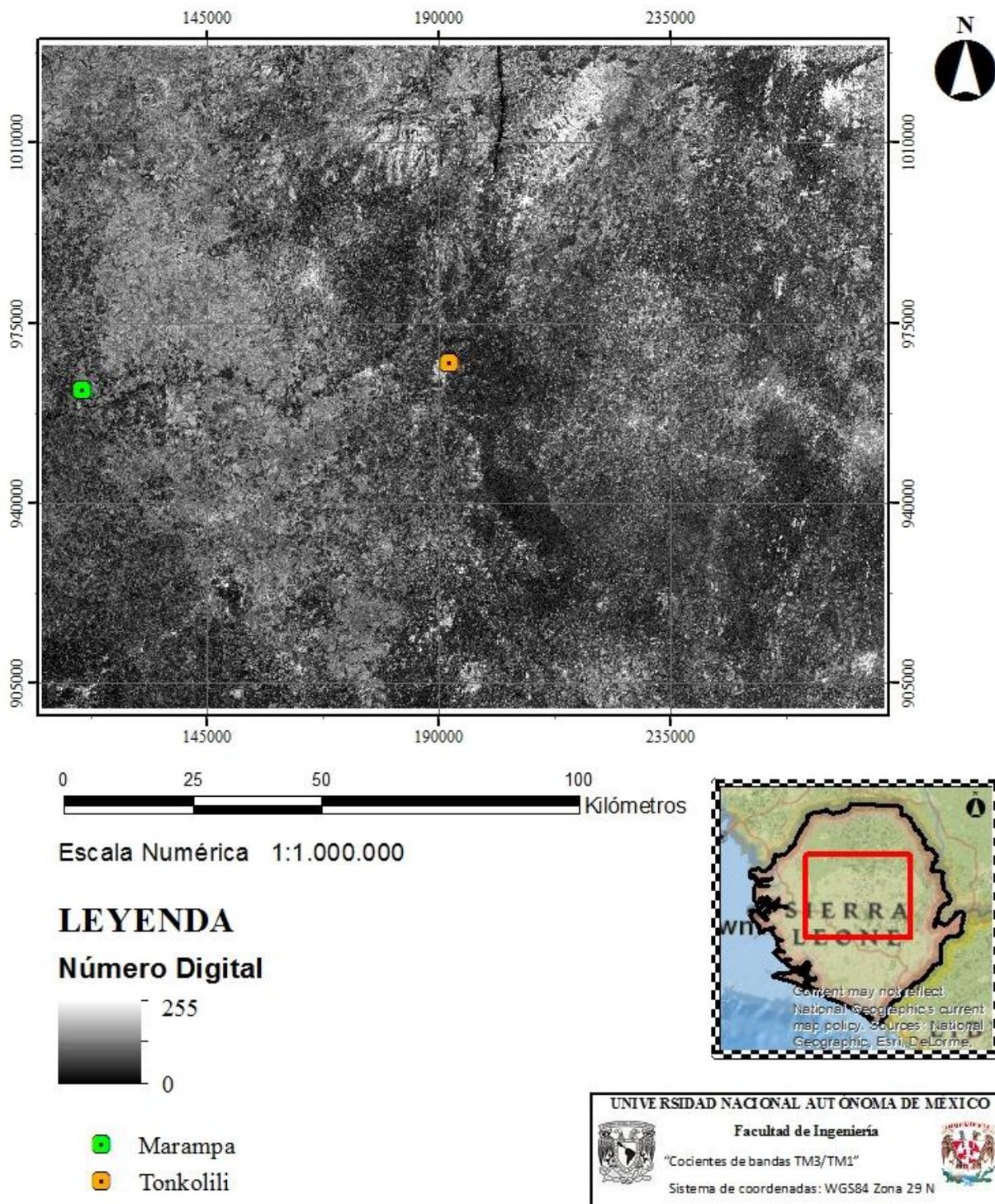


Figura 12. Cociente TM3/TM1 con saturación lineal del histograma del 1 %. Los tonos claros muestran la respuesta espectral de los óxidos de hierro.

En la Figura 12, se observa claramente una afluencia de óxidos de hierro el NE de la región de Tonkolili. Asimismo, en la esquina superior derecha también es posible identificar una clara respuesta espectral de éstos. Sin embargo, será necesario conjuntar a este proceso otras técnicas de realce espectral para discriminar los óxidos de hierro que coexisten con la vegetación e hidroxilos.

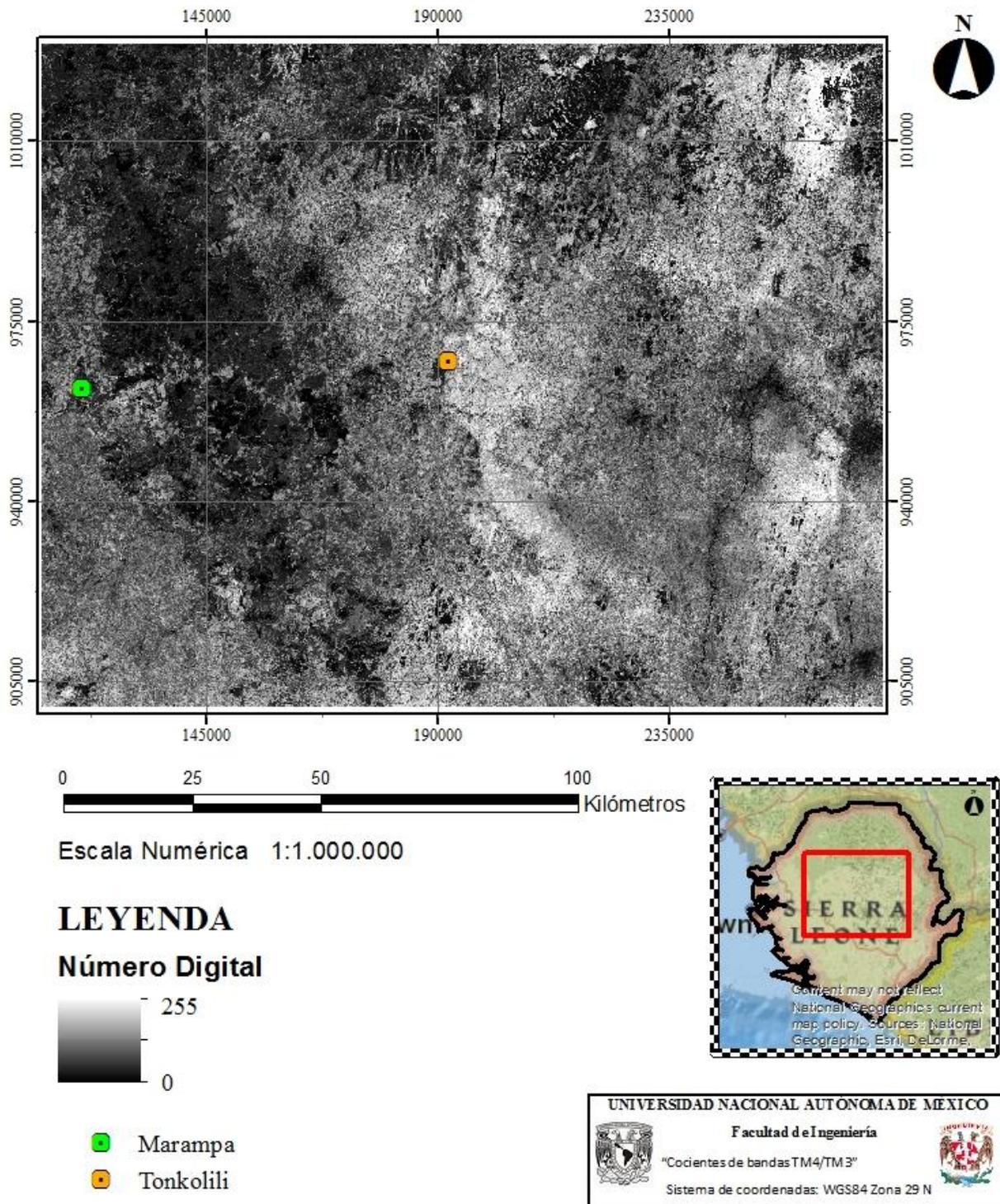


Figura 13. Cociente TM4/TM3 con saturación lineal del histograma del 1%. Los tonos claros muestran la respuesta espectral de la vegetación.

Con el objeto de diferenciar los óxidos de hierro de otros materiales, es importante también conocer la respuesta espectral de éstos últimos, es por eso que en la Figura 13, identificamos las zonas con mayor contribución vegetal que corresponde a los tonos claros de la imagen; los tonos oscuros indican presencia de otros materiales.

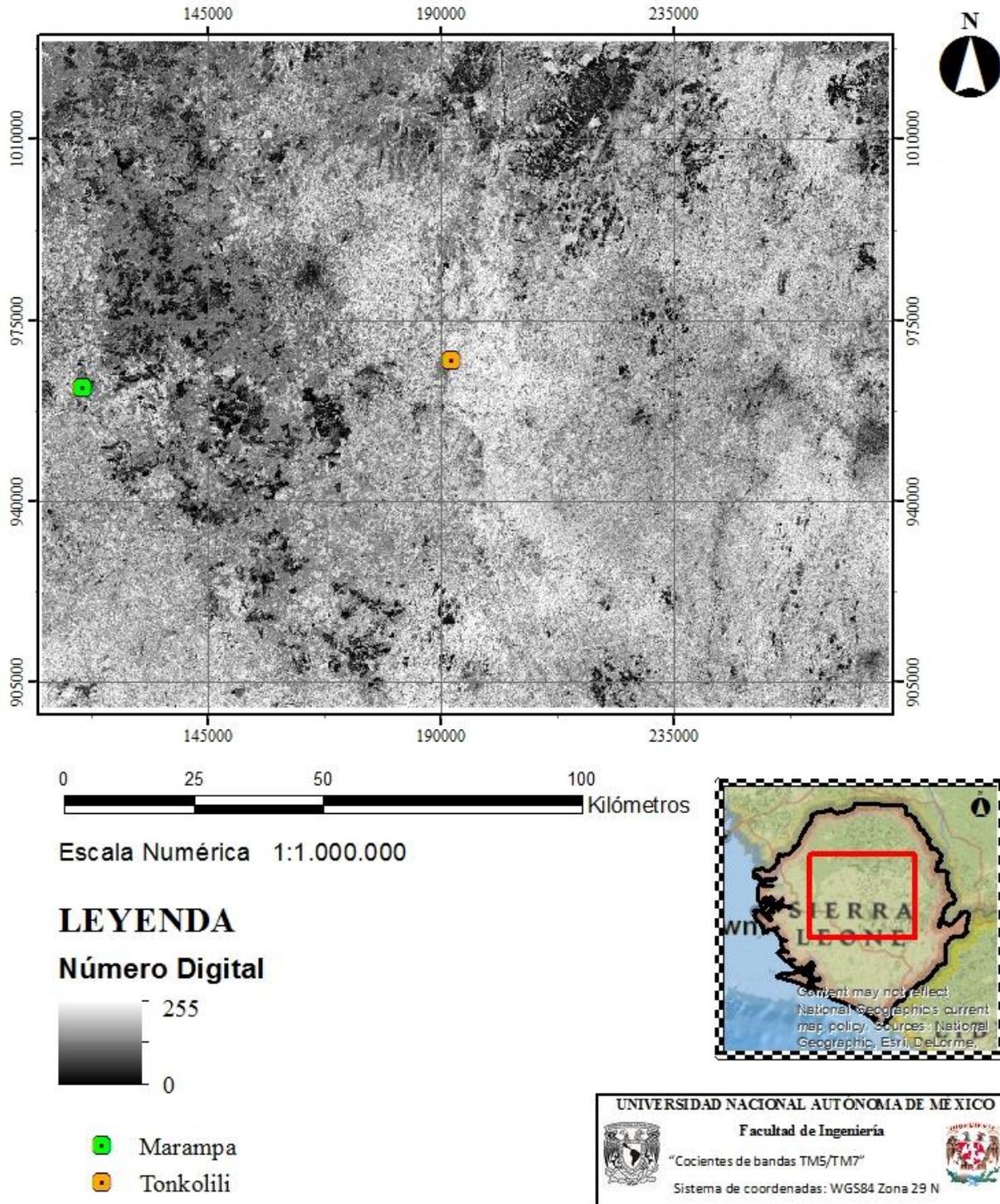


Figura 14. Cociente TM5/TM7 con saturación lineal del histograma del 1%. Los tonos claros muestran la respuesta espectral de los hidroxilos.

Con estas tres imágenes obtenidas y con la Composición a Color que se muestra a continuación será posible destacar los óxidos de hierro que se encuentran en convivencia con vegetación e hidroxilos.

5.3. COMPOSICIÓN A COLOR CON COCIENTES DE BANDAS

Los cocientes para los óxidos, vegetación e hidroxilos “*per se*” mostraron respuestas espectrales diferentes entre sí. Sin embargo, dado que es necesario tener una clara visualización de los óxidos de hierro, se presenta a continuación la composición a color con los cocientes de bandas para los óxidos, vegetación e hidroxilos.

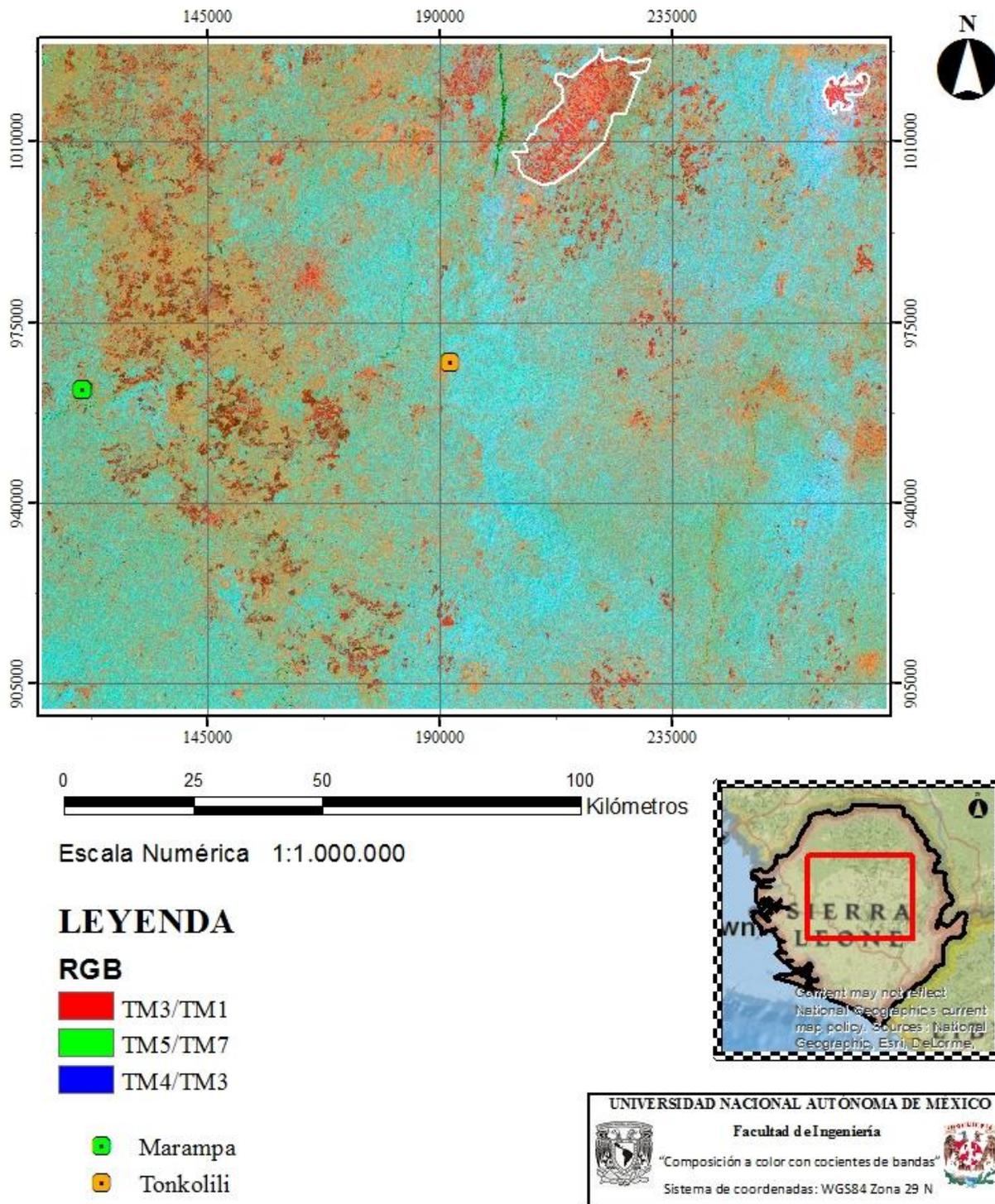


Figura 15. Falso color con cocientes de bandas. Los tonos rojos indican la presencia de óxidos de hierro; en tonos azules encontramos la vegetación; en tonos cian están los hidroxilos en convivencia con la vegetación y en tonos cafés coexisten los óxidos y los hidroxilos, siendo mayor la contribución de los primeros. Las regiones marcadas con color blanco indican tonos en rojo más puros.

Para la respuesta espectral de óxidos de hierro (TM3/TM1) ha sido asignado al color rojo; la respuesta de la vegetación (TM4/TM3) corresponde al color azul y, finalmente los hidroxilos (TM5/TM7) se les ha asignado el color verde. Asimismo, se pueden observar la combinación de estos colores como son: color cian y cafe principalmente. Estos por otro lado muestran la coexistencia de materiales como óxidos de hierro e hidroxilos (color cafe) siendo mayor el aporte de los primeros, así como la coexistencia de vegetación e hidroxilos (color cian).

A diferencia de las imágenes presentadas anteriormente, en la Figura 15., podemos notar claramente dónde hay **óxidos de hierro**, muchos de los cuales se encuentran rodeados por vegetación, así como en coexistencia con hidroxilos. De igual manera se puede observar que al **noroeste de Tonkolili** encontramos materiales con una respuesta espectral que corresponde a **óxidos de hierro**, los cuales no eran visibles en los procesos anteriores a éste. No obstante, será necesario comparar estos resultados con los que se obtengan del análisis de componentes principales para así discriminar con mayor grado de certeza en qué áreas predominan los óxidos de hierro.

5.4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

La componente 1 (C1) contiene la información de la topografía y el albedo. Esta componente se caracteriza por tener la mayor parte de la varianza de todos los datos.

La componente 2 (C2) y las subsecuentes presentan generalmente menos contraste entre los albedos y están desprovistas de información topográfica.

La componente 3 (C3) y 4 (C4) normalmente tienen menos estructura de la imagen y más ruido que las dos primeras, pero pueden contener información específica de alguna clase espectral.

Las últimas componentes 5 (C5) y 6 (C6) (en nuestro caso, ya que el número de componentes depende del número de bandas con las que se esté trabajando) contienen prácticamente solo ruido.

Con este Análisis de Componentes Principales no se obtuvieron resultados provechosos, es por esta razón que no se muestra ninguna imagen de este procedimiento.

5.5. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES CON COCIENTES DE BANDAS

Fraser y Green (1987) abogaban por el uso de cocientes de bandas en el análisis de componentes principales, debido a que los cocientes tienen los efectos de resaltar la respuesta espectral de un material y de remoción de brillantez por píxel. Asimismo, **Fraser (1991)** sugiere el uso de esta técnica de realce espectral en regiones dominadas por hierro y vegetación. Por esta razón, los cocientes utilizados para disociar los óxidos de hierro de la vegetación son $TM3/TM1$ y $TM4/TM3$ respectivamente.

La Tabla 14 muestra la matriz de carga de las 2 Componentes Principales obtenidas para los cocientes de bandas TM3/TM1 para óxidos y TM4/TM3 para vegetación.

Tabla 14. Matriz de carga de Componentes Principales utilizando cocientes de bandas para la identificación de óxidos y vegetación.

T-MOD	C 1	C 2
% Varianza	99.699305	0.300694
TM3/TM1	-0.734203	0.678930
TM4/TM3	0.999995	0.003262

Como las componentes principales han sido creadas a partir de un cociente de bandas, la (C1) no contiene mucha información del albedo y topografía, por el contrario, contiene el 99.72% de la información requerida para la identificación de óxidos de hierro.

Sin embargo, es necesario utilizar la (C1) negativas, es decir, operacionalmente hay que multiplicar la componente 1 (C1) por -1 con la finalidad de obtener (-C1) para que de esa manera los píxeles más brillantes indiquen dónde hay óxidos y los más oscuros muestren las regiones con vegetación. De no hacerlo, la (C1) mostraría los píxeles brillantes como vegetación y, para propósitos del estudio, la identificación de éste material no es de gran utilidad. En otras palabras, todos los píxeles muy oscuros (cerca de cero) indicarán vegetación; y todos los **píxeles muy brillantes** (cerca de 255) indicarán **óxidos de hierro**.

La Figura 16 muestra la (-C1) con un ajuste lineal del histograma del 2%.

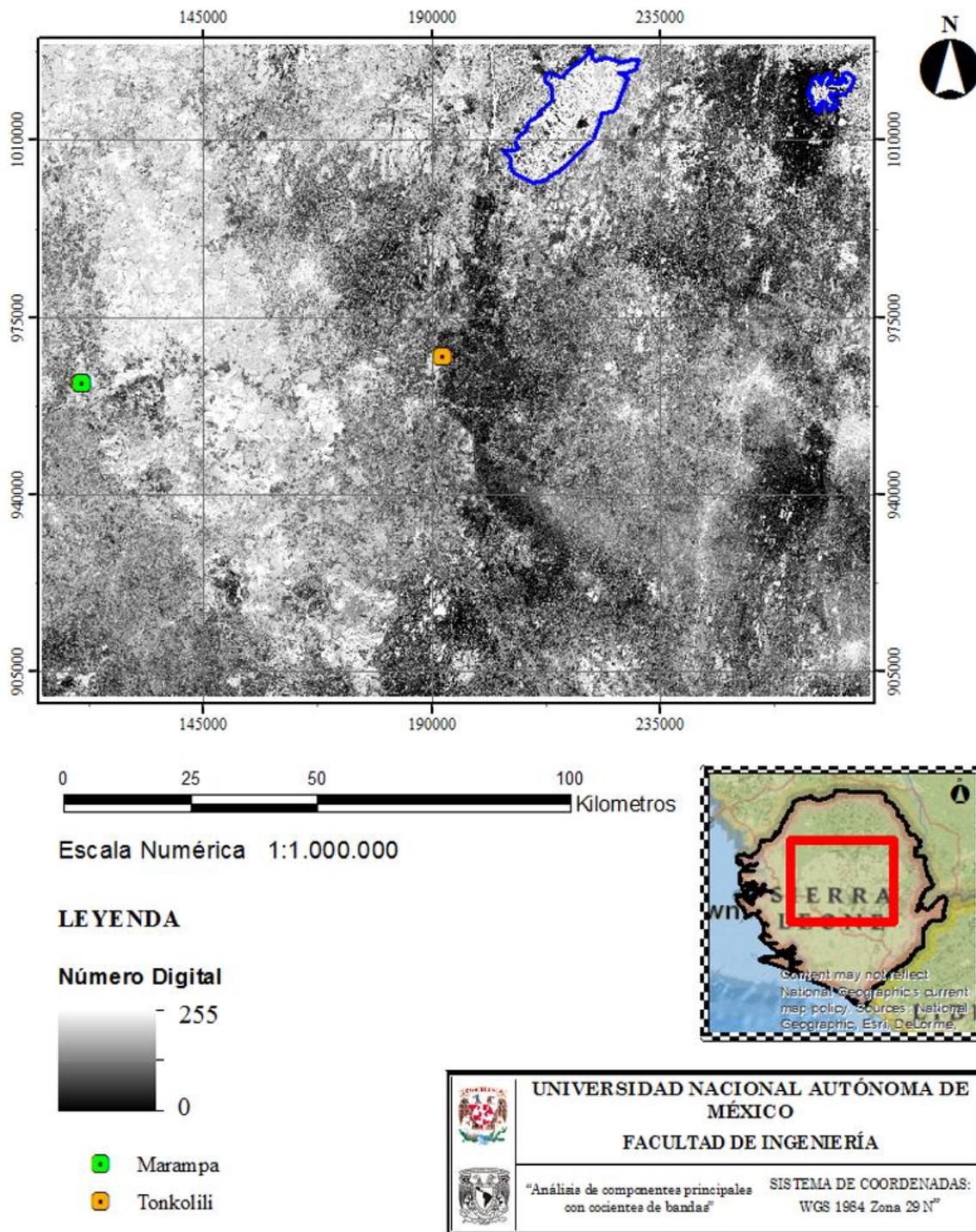


Figura 16. Componente 1 negativa (-C1) con saturación lineal del 2 %. Los píxeles brillantes indican presencia de óxidos; los píxeles oscuros indican presencia de vegetación. Las regiones demarcadas en azul muestran números digitales muy cercanos a 255.

La saturación lineal del histograma puede ser muy útil en la elaboración de imágenes para una visualización ventajosa, ya que concentra los valores de salida en los valores menos extremos (y que son los que aparecen con más frecuencia). Aunado a esto, es preciso analizar el histograma numérico de la imagen para cerciorarse de que no se esté perdiendo mucha información.

“Normalmente, la saturación lineal de 1 o 2 % de una imagen, es una buena medida, la saturación aceptable dependerá de la imagen y los objetivos del estudio” (Schowengerdt, 2012).

Con esta combinación de técnicas de realce espectral inicialmente hemos acentuado con ayuda de los cocientes de bandas los números digitales para los óxidos y la vegetación, que son los materiales predominantes del área de estudio, seguido de una segunda discriminación que logra separar los óxidos de hierro de la vegetación, hidroxilos y algún otro material presente que pudiera coexistir con ellos, dando como resultado un mapa con píxeles brillantes que indican la presencia de óxidos de hierro.

5.6. FIRMAS ESPECTRALES Y VÍAS DE ACCESO

Las zonas delimitadas en las **Figuras 15 y 16** muestran **tonos rojos muy puros y tonos muy brillantes** respectivamente, lo que nos corrobora que en estas regiones abundan óxidos de hierro, para ratificar éste enunciado se elaboraron polígonos de entrenamiento dentro y fuera (para los hidroxilos y la vegetación) de las zonas enmarcadas, a fin de mostrar las firmas espectrales características de los óxidos, hidroxilos y vegetación.

Las firmas obtenidas se muestran a continuación:

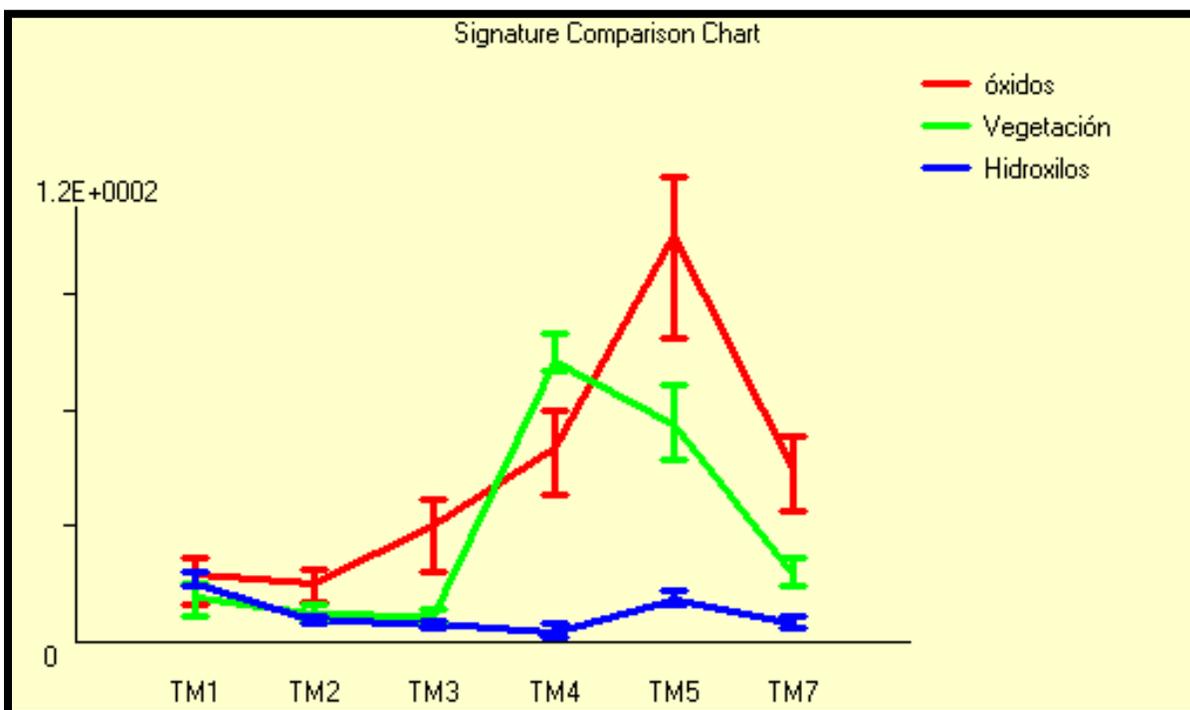


Figura 17. Firmas espectrales para vegetación, hidroxilos y óxidos de hierro obtenidas al realizar los polígonos de entrenamiento.

Finalmente, se localizaron en Google Earth las regiones enmarcadas en las figuras 15. y 16 y se superpuso la Figura 5 a fin de descubrir a qué litologías o Grupos se asocian los polígonos encerrados y, finalmente, se incluyeron las vías de acceso para su posible explotación.

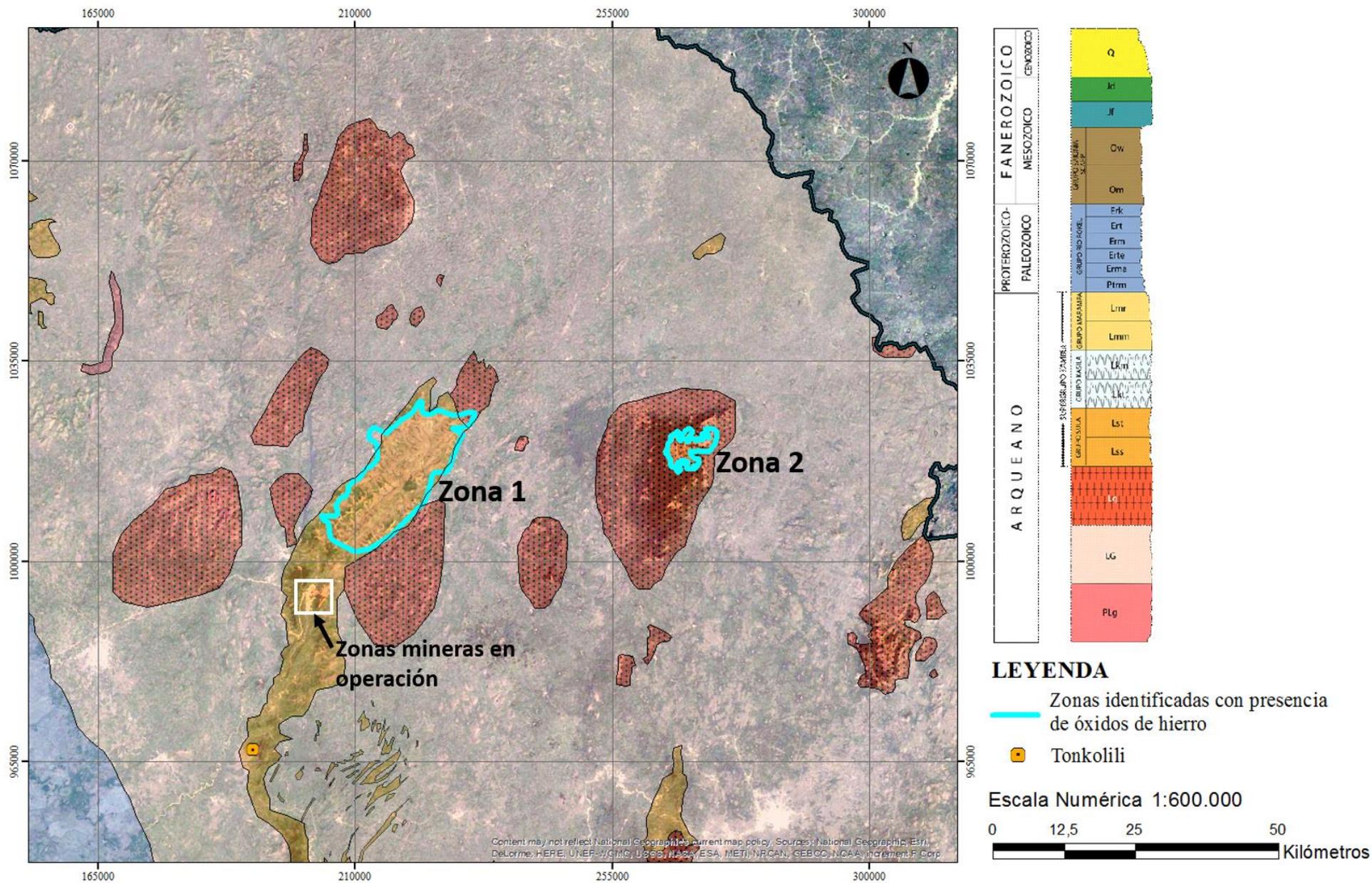


Figura 18. Mapa importado de Google Earth con identificación de óxidos de hierro y su asociación geológica.

Zona 1: Esta zona se encuentra en el pueblo de Bumbuna el cual pertenece al distrito de Tonkolili. En la Figura 18 se puede observar que la zona enmarcada coincide con el Grupo Sula, en el cual se encuentran las Formaciones Sonfón y Tonkolili. Esta zona es parte del cinturón de rocas verdes Sula-Kangari, Según Wright et al. (1985), las formaciones de hierro bandeado de esta región están interestratificadas con anfibolitas, por lo que es probable que los depósitos BIF se encuentren en la Formación Sonfón. Aunado a esto, el mismo autor menciona que los depósitos de esta región no han sido explotados hasta el año 2012. Por lo tanto, es importante llevar a cabo brigadas de exploración ya que se encuentra a aproximadamente a 42 kilómetros al noroeste del distrito minero Tonkolili, el cual se encuentra operando actualmente.

Se recomienda llegar a este sitio en automóvil partiendo de Makeni ya que ésta es la ciudad más grande y poblada en la provincia del Norte de Sierra Leona. De Makeni es necesario dirigirse al Noroeste en dirección a la autopista Kabala y tomar la carretera Binkolo – Bumbuna, ésta nos deja justo en la parte Suroeste de zona delimitada que se muestra en la Figura 18.

Zona 2. Esta zona se encuentra en el Monte Bintumani, el cual pertenece a las montañas Loma con sus laderas inferiores están cubiertas de bosques tropicales. Sin embargo, los resultados indican que los depósitos descansan sobre un granito Liberiano de dimensiones considerables. Al tratarse de un cuerpo de origen magmático y de acuerdo con la geología de Sierra Leona los depósitos de hierro que se encuentren en esta zona son, teóricamente, de origen sedimentario, lo cual contradiría con la información geológica recopilada en este trabajo. Por otro lado, la elaboración del mapa presentado en la Figura 5 se realizó

mediante la digitalización de mapas previamente elaborados por los autores Hydro Nova (2017), Lapworth (2015), Keyser (2004), NMA (2004), Culver (1979), Warnsloh (2011), Williams (1978), De Waele (2014) y Kröner (2004) sin embargo, algunos de ellos diferían en cuanto a unidades litológicas, dimensiones y ubicaciones de las mismas, por esta razón se considera la probabilidad de que este sitio no haya sido mapeado de manera minuciosa, por lo que probablemente sobre el granito Liberiano también descansen sedimentos pertenecientes a la Formación Tonkolili que alberguen formaciones de hierro bandeado. Cabe destacar también que, al analizar las Figuras 10, 11, 13 y 15, éstas muestran alta densidad de vegetación en esta región, por lo que podría ser un factor que contribuya a que no se hayan mapeado depósitos del Grupo Sula anteriormente.

Asimismo, con base en la tabla estratigráfica (Figura 6) la época metalogénica sí corresponde con un periodo favorable de deposición de depósitos de hierro, ya que los resultados aquí presentados indican que los depósitos de hierro de la Zona 1 y Zona 2 se encuentran en la Formación Tonkolili, del Grupo Sula, el cual se depositó durante el eón Arqueano.

En esta región no se incluirán vías de acceso debido a que de acuerdo con el Departamento de Primatología del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva (<http://apes.eva.mpg.de>) este territorio cuenta con una reserva de 1065 chimpancés, siendo extremadamente alta la densidad poblacional de los mismos hacia las laderas del Monte Bintumani y no se recomienda su exploración ni explotación.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La Percepción Remota juega un papel bastante importante en los proyectos mineros de exploración geofísica de reconocimiento y el trabajo aquí presentado no es la excepción. Los dos métodos presentados: composición a color con cocientes de bandas y análisis de componentes principales con cocientes de bandas han proporcionado mapas con alto potencial de hallar óxidos de hierro en las zonas preferentes que se muestran en la figura 18.

La composición a color con cocientes de bandas analiza primeramente la respuesta espectral de cada pixel en la imagen al dividir los valores de brillantez asociados al material de interés, posterior a esto, la composición a color permite una mejor percepción visual al vincular los cocientes previamente elaborados a los cañones rojo, verde y azul dentro del espectro electromagnético que se esté trabajando. La **Figura 15.**, muestra tonos rojos muy marcados, lo cual aunado a la gráfica de firmas espectrales (**Figura 17.**), indica que la posibilidad de encontrar óxidos de hierro en esas zonas es alta.

Adicionalmente, se buscó otra técnica de realce espectral donde, a diferencia del primer método, en esta se utilizan variables estadísticas como la varianza y covarianza en los realces espectrales ya obtenidos con los cocientes de bandas. Con esta técnica se obtuvieron dos componentes: una que indica la presencia de vegetación (bandas TM4/TM3) y otra que muestra la presencia de óxidos de hierro (bandas TM3/TM1). En esta técnica se buscan los valores más altos de brillantez de cada píxel dentro de la imagen siendo las zonas encerradas en la **Figura 16.** Los más cercanos o iguales 255.

Ambas técnicas utilizadas difieren una de otra y, sin embargo, los resultados advierten la presencia de óxidos de hierro en la misma región. Es por esto que complementariamente se realizaron polígonos de entrenamiento en las zonas encerradas con el objeto de obtener firmas espectrales (**Figura 17**). características de los óxidos de hierro, vegetación densa e hidroxilos (denotados como sedimentos), los cuales son diferentes entre sí y representan correctamente las firmas de esos materiales.

Finalmente, las zonas de interés que se delimitaron anteriormente se ubicaron en Google Earth y se empalmaron con el mapa geológico de Sierra Leona (**Figura 18**) a fin de identificar a qué Formaciones o Grupos pertenecían, de donde se obtuvieron dos zonas de interés.

7. CONCLUSIONES

Los objetivos propuestos se cumplieron con éxito y, siguiendo la metodología propuesta, fue posible obtener mapas útiles que permitan la elaboración de un plan logístico de exploración para dependencias mineras que se dediquen a la extracción de depósitos de hierro en Sierra Leona.

La combinación e integración de dos técnicas de realce espectral: cocientes de bandas con composición en falso color y el análisis de componentes principales con cocientes de bandas para la identificación de óxidos de hierro proporcionó resultados favorables, por lo que se recomienda ampliamente para trabajos de exploración geofísica de reconocimiento que tengan objetivos similares a los de este trabajo.

Se encontraron dos zonas de interés minero para llevar a cabo actividades de exploración:

- **Zona 1:** Se localiza en el pueblo de Bumbuna el cual pertenece al distrito de Tonkolili. Coincide con el Grupo Sula, el cual cuenta con las Formaciones Tonkolili y Sonfón, ambas contienen formaciones de hierro bandeado según los trabajos elaborados por Williams et al. (1978) y Wright et al. (1985).
- **Zona 2.** Se ubica en el Monte Bintumani, el cual pertenece a las montañas Loma. Esta zona de interés se encuentra sobre un granito Liberiano, por lo que se sospecha que sobre este cuerpo magmático descansan restos de rocas del Grupo Sula que no hayan sido correctamente mapeados. Sin embargo, debido a la ética animalista del autor de este trabajo, no se han incluido vías de acceso y no se recomienda llevar a cabo la exploración o explotación de los recursos para este sitio.

Finalmente, con la información recabada en este trabajo aunado con los resultados presentados se concluye que sería conveniente llevar a cabo este estudio en los otros cinturones de rocas verdes: Kambui y Gori, los cuales también son parte del Grupo Sula, y tal como establece Umeji et al. (1982) en estas regiones se encuentran formaciones de hierro; así como en la región noroeste del Grupo Marampa la cual se encuentra fuera del área de estudio (Figura 5).

REFERENCIAS:

Abulghasem, Y. A., (2012), *The use of Remote Sensing Technology in Geological Investigation and Mineral Detection in Wadi Shati, Libya*. Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, vol 17, 1279-1291.

africafundacion.org, (2010). *Se inicia la explotación del mayor depósito de mineral de hierro de África*. 20/11/2017, URL: <http://www.africafundacion.org/?article5856#>

Alasta A. F., (2011), *Using Remote Sensing data to identify iron deposits in central western Libya*. International Conference on Emerging Trends in Computer and Image Processing, 56-61.

Andrews-Jones D. A., (1966). *Geology and mineral resource of the Northern Kambui schist and adjacent granulites*. Geol Surv. Sierra Leone Bull. 6.

Armitage Mike, (2010). *Technical Review of the Tonkolili Iron Ore Project, Sierra Leone*. SKR Consulting Engineers and Scientists, 1,10,12.

Bekker A. and Planavsky, N. and Rasmussen, B. and Kraepz, B. and Hofmann, A. and Slack, J. and Rouxel, O.J., (2014). *Iron Formations: Their Origins and Implications for Ancient Seawater Chemistry*, in Holland, H. and Turekian, K. (ed), *Treatise on Geochemistry*, Vol. 9, Netherlands: Elsevier. 488-489, 562-563.

Bekker A., Slack, J. F., Planavsky. N., (2010) *Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes*. *Economic Geology* 105: 467–508

Belevtsev Ya. N., (1959), 'Genesis of Iron Ores of the Krivoy Rog Basin', In: Trendall A.F., Morris R.C. (eds.), *Iron-formation: facts and problems*, Elsevier, Amsterdam, pp. 211-252.

Borchert H., (1958). *Die Chrom- und Kupferlagerstätten der initialen ophiolitischen Magmatismus in der Türkei, Ankara*.

Boreman Gleen D., (1999). *Fundamentos de electro-óptica para ingenieros*. Textos de Ingeniería Óptica Volumen 37, SPIE Press, 2.

Boyd C. E., (2015). *Water Quality: An introduction*. Springer, 2nd Editionm, USA, 48.

Braterman P. S., (1983). *Photo-oxidation of hydrated Fe²⁺ significance for banded iron formations*. *Nature*, 303, 163-164.

Bruker A., (2006) *Quantitative analysis of geological samples: combined XRD-XRF analysis*, at D karlsruhe Germany, 76-87

Bryan S. Ernst, R., (2007). *Revised definition of Large Igneous Province (LIP)*. Earth-Science Reviews 86. Elsevier. 175.

Button A., (1982). *Sedimentary iron deposits, evaporites, and phosphorites*. State of the art report. In: H.D. Holland and M. Schidlowski (Editors), *Mineral Deposits and the Evolution of the Biosphere*. Springer, Berlin, 260.

Cairns-Smith A., (1978). *Precambrian solution photochemistry, inverse segregation, and banded iron formations*. Nature, 276, 807-808.

Canfield D. E., (1998). *A new model for Proterozoic ocean chemistry*. Nature 396: 450–453.

Carvalho Pedro S. L., (2014). *Minério de ferro*. BNDES Setorial, Río de Janeiro, n. 39, 198.

Ceccon Eliane., (2014). *Restauración en bosques tropicales: Fundamentos ecológicos, prácticos y sociales*, Ediciones Díaz de Santos. UNAM, México, D.F., 215.

Chuivenco E., (1996) *Fundamentos de teledetección espacial*. 3era edición, Ediciones Rialph. Madrid España, 59.

Cloud P., (1965). *Significance of Gunflint (Precambrian) microflora*. Science 148. 27–35.

Cloud P., (1973). *Paleoecological significance of the banded iron formations*. Economic Geology, 68: 1135-1143.

Clugston Rosalind, (2000). *Advanced Chemistry*. Oxford University Press. UK, 204.

Cooper C. David, (2014). *Introduction to Environmental Engineering*. Waveland Press, Inc. University of Central Florida, 32.

Cornell M. Rochelle and Schwertamn Udo (2006). *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. John Wiley & Sons, Germany, 297.

Craig James R., (1994). *Ore Microscopy and Ore Petrography*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 260-261.

Cram101 Textbook Reviews, (2016). *Just the facts 101. Textbook Key Facts: Essentials of Geology*. Cram101 Textbook Reviews. 3era Edición. 18.

Culver S. J., (1979). *Late Precambrian and Phanerozoic geology of Sierra Leone*. J. geol. Soc. London, vol. 136, 605-606.

De Waele B., (2014). *New insights on proterozoic tectonics and sedimentation along the peri-Gondwanan West African margin based on zircon U–Pb SHRIMP geochronology*. Precambrian Res. Elsevier, 1-3.

Dzigbodi – Adjimah K., (2009). *The Tonkolili Iron Occurrence of Sierra Leone: A Petrological Enigma?* Ghana Mining Journal, Vol. 11. 18-19, 21. 29.

Edwards Richard, (2012). *Ore Deposit Geology and its Influence on Mineral Exploration*. Springer Science & Business Media, 316-317, 320-323.

Eichler J., (1976). *Origin of the Precambrian banded iron formations*. In Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, K. H. Wolf (ed.). Elsevier, Amsterdam. 7, 157 – 201.

Ellis Roger, (2003). Sierra Leona ready for business. *The Mining Journal LTD*. London. UK, 1

Equipo, (2000). *Diccionario de Ciencias de la Tierra*. Editorial Complutense. Madrid, España, 16.

Ernst R. E., and Bell, K., (2010). *Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites*. Mineralogy and Petrology 98: 55–76.

Eugster H. P. and Chou, I-Ming, (1973). *The depositional environments of Precambrian banded iron formations*. Economic Geology, 68: 1144-1168.

Ewers W. E., (1983). Chemical Factors in the Deposition and diagenesis of banded iron-formation. In *Iron Formation: Facts and Problems* (eds A. F. Trendall and R. C. Morris), Elsevier, Amsterdam, 493-494.

Faivre Damien, (2016). *Iron Oxides: From Nature to Applications*. John Wiley & Sons, Germany, 13.

Falk Dietmar, (1986). *Metalotecnia Fundamental*. Reverte, Barcelona. España, 93.

François L. M., (1986). *Extensive deposition of banded iron formations was possible without photosynthesis*. Nature, 320, 352-354.

Fraser S. J. and Green, A. A., (1987). *A Software Defoliant for Geological Analysis Ratios*. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, 525-532.

Fraser S.J., (1991). *Discrimination and Identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: A Newman case study*. *International Journal of Remote Sensing*, vol 12, number 3, 639.

Gargaud Muriel, (2013). *Young Sun, Early Earth and the Origins of Life: Lessons for Astrobiology*, Springer Science & Business Media, Editions Belin, 294

Gargaud Muriel, (2011). *Enciclopedia of Astrobiology*, Springer Science & Business Media, Vol. 1, 683

Garrels Robert M., and Christ, C.L., (1965). *Solutions, minerals and equilibria*. Harper & Row; 1st edition, NY, USA. 383-384.

Gibson Paul J. and Clare H. Power. (2000). *Introductory Remote Sensing: Digital Image Processing and Applications*. Routledge, NY, 170, 174.

Gross G. A., (1965). *Geology of iron deposits in Canada*, Geol. Surv. Can. Econ. Geol. Rep., 22.

Gross G. A., (1980). *A classification of iron formations based on depositional environments*. Can. Mineral., 18, 215 – 222.

Gruss H., (1973). *Itabirite iron ores of the Liberia and Guyana shields*. UNESCO Earth Sci. Ser., 9, 15 – 21, 335 – 359.

Gupta P. Ravi, (2013). *Remote Sensing Geology*. Springer Science & Business Media, Germany, 508.

Hamilton M. A., Buchan, K. L., Ernst, R. E., and Stott G. M., (2009). *Widespread and short-lived 1870 Ma mafic magmatism along the northern Superior craton margin*. Eos Transactions, American Geophysical Union 90(22), Joint Assembly Supplement: Abstract GA11A-01.

Harnmeijer J. P., (2003). *Banded Iron Formation: A Continuing Enigma of Geology*. University of Washington, 12.

Holland H. D., (1973). *The oceans, a possible source of iron in iron formations*. Economic Geology, 68: 1169-1172

Holland H. D., (1984). *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans*. Princeton, NJ: Princeton University Press

Hudson Institute of Mineralogy, (2017). *Martite*. 10/01/2018, de Hudson Institute of Mineralogy Sitio web: <https://www.mindat.org/min-2583.html>

Hydro Nova, (2017). *Lithology of Sierra Leone*. 22/02/2018, de Government of Sierra Leone, Ministry of Water Resources, Freetown, Sierra Leone, URL:

http://www.salgrid.org/Hydrogeologic_Atlas_of_Sierra_Leone_2017/04_Lithology_of_Sierra_Leone.pdf

Hydro Nova, (2017). **Geology of Sierra Leone**. 22/02/2018, de de Government of Sierra Leone, Ministry of Water Resources, Freetown, Sierra Leone. URL: http://www.salgrid.org/Hydrogeologic_Atlas_of_Sierra_Leone_2017/03_Geology_of_Sierra_Leone.pdf

IBP inc., (2015). *African Countries Mineral Industry Handbook Volume 1 Strategic Information and Regulations, International Business Publications*, Washington D.C., USA, 26.

Isley A. E. and **Abbott**, D. H., (1999). *Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation*. *Journal of Geophysical Research* 104: 15461–15477.

Jalloh Abu Bakarr., (2013). *The Geology, Mineral Resources of Sierra Leone and how the Resources can be used to develop the nation*, *Procedia Earth and Planetary Sciences* 6 Elsevier, 131-132.

James H. L., (1954). *Sedimentary facies of iron formation*. *Economic Geology*, 49, 235-293.

James H. L., (1983). *Distribution of banded iron-formation in space and time*. In *Iron Formation: Facts and Problems* (eds A. F. Trendall and R. C. Morris), Elsevier, Amsterdam, pp. 471-490.

James H. L. and **Sims**, P. K., (1973). Introduction. In: H. L. James and P. K. Sims (Editors), *Precambrian Iron Formations of the World – Economic Geology*. 68: 913 – 914.

James H. L., (1992). *Precambrian iron-formations: nature, origin, and mineralogic evolution from sedimentation to metamorphism*. *Diagenesis III. Developments in Sedimentology*, Vol. 47, Capítulo 11, Elsevier Science Publisher, 543 – 589.

Kalpakjan Serope and **Schmid** R. Steven, (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. *Pearson Educación (4ta edición)*, México, 138.

Karigi H., (2007) *Principal components analysis for borate mapping*. *International Journal of Remote Sensing*: 1805-1817.

Keyser N., (2004). *Geological Map of Sierra Leone*. 22/02/2018, de Koidu Limited, URL: http://www.koiduholdings.com/media/docs/geology_of_sierra_leone01.pdf

Kirschvink J. L., (1992). *Late Proterozoic low-latitude global glaciation: The snowball Earth*. In: Schopf JW and Klein C (eds.) *The Proterozoic Biosphere*, pp. 51–52. Cambridge: Cambridge University Press.

Konhauser K. O., (2007). *Decoupling photochemical Fe (II) oxidation from shallow-water BIF deposition*. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1), 87-100.

Kröner A., (2004). *Pan-African Orogeny*. *Enciclopedia of Geology*, vol. 1, Elsevier, 1,10.

Lapworth D. J., Carter R. C., Pedley S. and MacDonald A. M., (2015). *Threats to groundwater supplies from contamination in Sierra Leone, with special reference to Ebola care facilities*. 22/02/2018, de Earthwise British Geological Survey URL: <http://earthwise.bgs.ac.uk/images/e/ef/OR15009fig9.jpg>

Li Jun, (2015). *Biogenesis of banded iron formations interpreted by geobiological experiments*. University of Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong SAR. 7-11.

Lu Liming, (2015). *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Elsevier, UK, 1.

Luo G., (2016), *Rapid oxygenation of Earth's atmosphere 2.33 billion years ago*. *Sci. Adv.* 2, 1.

MacFarlane A., (1981). *The geology and mineral resources of northern Sierra Leone*. Vol. 7, Overseas memoirs, Institute of Geological Sciences. London, UK, 3.

Marmo V., (1962). *Geology and Mineral Resources of the Kangari Hills Schist Belt*. *Geol. Surv. Sierra Leone Bull.* 2.

Mauger Alan J., (2014). *History of Remote Sensing in Geological Exploration, Conference, Burswoof on Swan Convention*.

Meurant G. (1976). *Tectonics and Metamorphism*. Handbook of Strata-bound and Stratiform ore deposits. Vol 4. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 39.

Misra K. C., (2000). *Understanding Mineral Deposits*. Kluwer Academic Publishers, University of Tennessee, USA, 661-668.-

Morel S. W., (1979). *The geology and mineral resources of Sierra Leone*. *Econ. Geol.* 74(7): 1563-1576.

Natural Resources Canada, (2015). *Fundamentals of Remote Sensing - Introduction*. 22/11/2017, de Government of Canada URL: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9363>

NMA, (2004). *Geological Map 1:250,000*. 22/02/2018, de National Minerals Agency of Sierra Leone, URL: <https://gims.nma.gov.sl/content/geological-map-1250000>

Patrick D., and Forward P. (2005). *Review of a Portfolio of Exploration Properties Held in Sierra Leone by Sierra Leone Diamond Company Limited*, ACA Howe International Limited. Herts, UK, 38.

Petrasccheck Walther E., (1965). *Yacimientos y criaderos. Un estudio sucinto de los tesoros del subsuelo*. Ediciones Omega. Barcelona, España. 62-63, 68, 84, 86, 91-92.

Planavsky N. J., (2009). *Ironoxidizing microbial ecosystems thrived in late Paleoproterozoic redox-stratified oceans*. Earth and Planetary Science Letters, 286(1), 230-242.

Price Monica, (2005). *Pocket Nature, Rocks and Minerals*. Dorling Kindersley Limited. 35-36

Robb L., (2005). *Introduction to Ore-Forming Processes*. Blackwell Science Ltd. 266-272

Rollinson H.R., (1983). *The geochemistry of mafic and ultramafic rocks from the Archean greenstone belts of Sierra Leone*, *Mineralogical Magazine*, Vol. 47, No. 344, UK, 269.

Sangster D. F., (1972). *Precambrian volcanogenic massive sulfide deposits in Canada: A review*, *Geol. Sur. Can. Pap. No. 72-22*, 44

Shackleton R.M., (1995). *Tectonic evolution of greenstone belts*, *Geological Society Special Publication*, Number 95, UK, 53, 62.

Schowengerdt Robert A., (2012). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing, Elsevier (2nd edition)*, University of Arizona, USA, 204.

Stanton R. L., (1972). *Ore Petrology*. McGraw-Hill, 771.

Stetoff Rebecca, (2007). *The camera*. Marshall Cavendish, New York, USA, 10.

Subramani T., (2017). *Appraisal Of Kanjamalai Iron Ore Deposit Using Remote Sensing And Geographical Information System*. International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Sciences (IJETTCS), Vol. 6, Issue 3 Vinayaka Missions University, Salem, India, 230

Trendall A. F., (1983). *Introduction in Iron-Formations: Facts and Problems*, (eds A. F. Trendall and R. C. Morris), Elsevier. Amsterdam, Holanda, 1-11, 475-476.

Tritlla Jordi., (2003). *Estructura y edad del depósito de hierro de Peña Colorada (Colima): un posible equivalente fanerozoico de los depósitos de tipo IOGC*, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Amsterdam, vol. 20, número 3, 185.

Umeji A.C., (1983). *Archean greenstone belts of Sierra Leone with comments on the stratigraphy and metallogeny*, *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 1, Number 1, University of Nigeria, Nigeria, 1-7.

U.S. Geological Survey, (2010). *Mineral Commodity Summaries, United States Government Printing Office*, Washington, USA, 78-79.

USA International Busines Publications, (2007). *Sierra Leone Mineral & Mining Investment and Business Guide*, *Int'l Business Publications*. Washington D.C., USA, 6.

Van Straaten Peter, (2002). *Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa*, *ICRAF*, Nairobi, Kenya, 252.

Walther John V., (2013). *Earth's Natural Resources*. Jones & Balett Publishers, 132-133.

Warnsloh J. M., (2011). *Geology and Mineral Industry of Sierra Leone*, 1-2, 26.

Williams H. R., (1978). *The Archean geology of Sierra Leone*, *Elsevier Scientific Publishing Company*, 6, Amsterdam, Netherlands, 251-252, 257-260.

Wilson N. W. and Marmo, V., (1958). *Geology Geomorphology and Mineral Resources of the Sula Mountains*. Geol. Surv. Sierra Leone Bull. 4.

Wright J. B., Hastings D. A., Jones W. B. and H. R. Williams (1985). *Geology and mineral resources of West Africa*. Allen and Unwin, London, UK, 35, 187pp

Zelenov K. K., (1958). *Leaching and transportation of dissolved iron by thermal waters of from the North Pole area, Western Australia*. *Nature*, 284: 443-445. Ebeko volcano. *Akad. Nauk SSSR Dokl.*, 120: 1089-1092.