

**CONTRIBUCIÓN A LA CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y GEOQUÍMICA DE  
LAS MINERALIZACIONES DE HIERRO EN EL SECTOR EL PALMOR,  
MAGDALENA.**

ANDY CORONADO PATIÑO  
JUAN CAMILO CASTRO BURGOS

Proyecto de grado

Asesor

Alejandro Beltrán Triviño

Geólogo - PhD

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE CIENCIAS | DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
GEOLOGÍA  
MEDELLÍN  
2021

## Contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2. Preguntas de investigación</b> .....	<b>6</b>
<b>1.3. Hipótesis</b> .....	<b>6</b>
<b>1.4. Justificación</b> .....	<b>7</b>
<b>1.5. Objetivos</b> .....	<b>7</b>
1.5.1. Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos .....	7
<b>2. Generalidades</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1. Área de estudio</b> .....	<b>8</b>
2.1.1. Localización .....	8
2.1.2. Clima.....	8
2.1.3. Hidrografía .....	8
<b>2.2. Antecedentes</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3. Geología regional</b> .....	<b>11</b>
2.3.1. Precámbrico.....	12
2.3.1.1. Granulita de los mangos (PEm).....	12
2.3.1. 2. Neises Anortosíticos (PErs):.....	13
2.3.2. Mesozoico.....	14
2.3.2.1. Stock del socorro (Jc):.....	14
2.3.3. Depósitos recientes (Qal) .....	15
<b>2.4. Marco estructural</b> .....	<b>15</b>
2.4.1. Falla Bucaramanga- Santa Marta .....	16
2.4.2. Falla de Oca.....	18
2.4.3. Lineamiento Sevilla.....	18
2.4.4. Falla Cesar .....	19
<b>2.5. Marco teórico</b> .....	<b>19</b>
2.5.1. Rocas Anortosíticas .....	19

2.5.1.1. Mineralogía y texturas .....	19
2.5.1.2. Morfología de complejos anortosíticos y mineralizaciones asociadas	21
2.5.1.3. Ambiente tectónico .....	22
2.5.1.4. Clasificación anortositas .....	23
2.5.2. Mineralizaciones asociadas a las rocas anortosíticas.....	26
2.5.2.1. Génesis de los yacimientos .....	27
2.5.3. Fundamentos estructurales .....	29
2.5.3.1 Zona de cizalla .....	29
2.5.3.2 Orientación de líneas y planos .....	29
2.5.4. Cinemática de fluidos en zonas de falla.....	30
2.5.5. Difracción de rayos X – XRD: .....	32
2.5.6. Fluorescencia de rayos X por energía dispersiva .....	34
<b>3. Metodología .....</b>	<b>34</b>
3.1. Trabajo de Campo.....	35
3.2. Análisis de datos estructurales .....	35
3.3. Análisis de Dispersión (DRX) y Fluorescencia (FRX) de Rayos X .....	36
3.4. Análisis de resultados .....	36
<b>4. Resultados .....</b>	<b>38</b>
4.1 Geología local.....	38
4.1.1. Granulita de los Mangos (PEm).....	39
4.1.2 Anortositas de río Sevilla (PErs) .....	40
4.1.2.1. Anortositas.....	40
4.1.2.2. Neises anortosíticos .....	41
4.1.2.3. Anfibolitas .....	41
4.1.3. Stock del Socorro .....	43
<b>4.2. Geología de la mineralización.....</b>	<b>44</b>
4.2.1. Depósitos Aluviales:.....	46
4.2.2. Depósitos vetiformes .....	47
<b>4.3. Difracción de rayos X (XRD): .....</b>	<b>48</b>
<b>4.4. Fluorescencia de rayos X:.....</b>	<b>50</b>
<b>4.5 Geología estructural: .....</b>	<b>51</b>

4.5.1. Diaclasas .....	51
4.5.2. Diques.....	53
4.5.3. Fallas .....	54
4.5.4. Vetas mineralizadas.....	55
<b>4.6. Modelo conceptual génesis depósitos óxidos de Fe.....</b>	<b>56</b>
<b>5. Análisis de resultados .....</b>	<b>57</b>
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>61</b>
<b>7. Recomendaciones.....</b>	<b>62</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>63</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Mapas de localización del área de estudio.....	5
Figura 2. Mapa geológico regional. ....	12
Figura 3. Mapa estructural mostrando los principales sistemas de falla de la SNSM. ....	16
Figura 4. Falla Bucaramanga Santa Marta.....	17
Figura 5. Sección delgada perteneciente a las anortositas de Roseland (U.S.A) .....	20
Figura 6. Veta discontinua de titanomagnetita y hemo-ilmenita en el Cape Caribou River allochthon.....	21
Figura 7. Mapa global de la distribución de cuerpos anortosíticos.....	23
Figura 8. Modelo para la generación de anortositas de tipo masivo. ....	26
Figura 9. Formación de depósitos diseminados de óxidos de Fe y Ti. ....	28
Figura 10. Sistema tipo bomba de succión.....	31
Figura 11. Sistema tipo válvula activada.....	32
Figura 12. Modelo conceptual del proyecto.....	37
Figura 13. Mapa geológico local.....	38
Figura 14. Granulita de los Mangos. ....	40
Figura 15. Rocas anortosíticas, neises anortosíticos y anfibolitas .....	42
Figura 16. Stock del Socorro.....	43
Figura 17. Mapa de mineralizaciones. ....	45
Figura 18. Depósitos aluviales de óxidos de hierro.. ....	46
Figura 19. Depósitos vetiformes. ....	47
Figura 20. Difractograma muestra #2.....	49
Figura 21. Mapa estructural y diagramas de rosas con los sistemas de diaclasas. ....	52
Figura 22. Mapa estructural, diagramas de rosas y estereogramas. ....	53
Figura 23. Mapa estructural, diagramas de rosas y estereogramas. ....	54
Figura 24. Mapa estructural, diagramas de rosas y estereograma .....	55
Figura 25. Modelo genético de los depósitos de hierro del sector El Palmor.....	57

## Índice de tablas

Tabla 1.Descripción de vetas mineralizadas. ....	48
Tabla 2.Resultados composición mineralogía por difracción de rayos X (XRD). ....	50
Tabla 3. Resultados óxidos mayores y elementos menore por fluorescencia de rayos X .....	51
Tabla 4. Concentración mínima de elementos metálicos para constituir yacimientos.. ....	58
Tabla 5. Contenidos de óxidos mayores mineralizaciones del sector Don Diego .....	60

## Resumen

En el corregimiento de El Palmor (Ciénaga, Magdalena), existen importantes manifestaciones de hierro presentadas en forma de depósitos aluviales y cuerpos vetiformes sobre la unidad Anortositas del río Sevilla, que aún no tienen definida la existencia de un posible control estructural sobre las vetas, ni una clasificación química de las mineralizaciones. Cuatro muestras de hierro fueron tomadas, junto con los datos estructurales de la zona, con el propósito de identificar los minerales presentes, la concentración porcentual de hierro, determinar el origen de los depósitos y definir si existe alguna implicación estructural sobre el emplazamiento de los cuerpos mineralizados. Las muestras se caracterizaron mediante dos ensayos de laboratorio, (1) el análisis de difracción de rayos X (DRX) corroborando la existencia de caolinita/dikita, magnetita, hematita y goethita y (2) la fluorescencia de rayo X (FRX) mostrando concentraciones de  $Fe_2O_3$  de aproximadamente 17%. Las manifestaciones de hierro están asociadas a la formación de rocas anortosíticas, en donde por cristalización fraccionada fluidos inmiscibles ricos en Fe y Ti quedan atrapados entre la malla cristalina, los cuales son acumulados por el fenómeno de filter pressing y posteriormente movilizadas a zonas de bajas presiones, en este caso posiblemente al lineamiento Sevilla.

Palabras clave: El Palmor, manifestación de hierro, Anortositas del río Sevilla, control estructura, clasificación química, cristalización fraccionada, fluidos inmiscibles, filter pressing, lineamiento Sevilla

## Abstract

In the village of El Palmor (Ciénaga, Magdalena), there are important manifestations of iron presented with form of alluvial deposits and tabulate bodies on the Anortositas unit of the Sevilla river, which have not yet defined the existence of a possible structural control on the seams, neither a chemical classification of mineralizations. Four samples of iron were taken, join with structural information of the zone; the main purpose was identified mineral's presents, iron's concentration percentage, and to identify the origin of these deposits, off course whether there is any structural implication on the location of the mineralized bodies. The samples were characterized by two laboratory tests (1) X-ray diffraction analysis (XRD) to corroborate the existence of kaolinite / dikite, magnetite, hematite and goethite and (2) X-ray fluorescence (XRF) for show Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentrations of approximately 17%. Therefore, it was inferred that iron declarations were associated with the formation of anortositic rocks, which by fractional crystallization of immiscible fluids rich in Fe and Ti are trapped between the crystalline mesh, which in turn they are accumulated by the phenomenon of filter pressing and subsequently mobilized to areas of low pressure, in this case possibly to the Sevilla guideline.

Key words: El Palmor, declaration of iron, Anortositas of the Sevilla river, control structures, chemical classification, fractional crystallization, fluids inmiscibles, filter pressing, Sevilla Guideline.

## 1. Introducción

El hierro es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, con una concentración de 5.8% (wt/wt) (Allègre et al., 1995); Como mineral hace parte del grupo de los metálicos con una abundancia en la corteza superior a 0,1% (Skinner, 1979). Sin embargo, es prácticamente imposible encontrarlo en estado puro; en la naturaleza el hierro puede encontrarse y extraerse de minerales tales como magnetita y hematita, los cuales tienen concentraciones de Fe entre 64–67% (Clout y Manuel, 2015).

El uso del hierro se restringe principalmente a la industria de la construcción y como materia prima para la producción de acero. China, el mayor productor de hierro del planeta, produjo el 45% del hierro total del mundo, generando de 1.043 Bt en 2001 a 2.93 Bt en 2012, seguido por Australia y Brasil. Por otra parte, en términos de reservas y recursos de este mineral metálico, Australia tiene las mayores reservas con una concentración de 35,000 Mt de minerales mena de hierro sin procesar y 17,000 Mt procesado, seguido por Brasil con 31,000 Mt sin procesar y 16,000 Mt procesado; en tercer lugar, está Rusia, seguido por China e India (Holmes y L. Lu., 2015).

América Latina genera en promedio 44.7 Mt toneladas de hierro anualmente desde 2014 hasta 2018, el mayor aporte lo hizo Brasil, generando el 65% de esta producción. México aportó el 24% y Argentina el 9% (Upme, 2018). a pesar de que Argentina no lidera esta lista cuenta con la mina de hierro subterránea más grande de Latinoamérica, ubicada en la provincia de Río Negro con una reserva estimada de 265.823.000 Ton, para extraer 3.000.000 Ton de mineral anualmente (Zanetti, 2008).

Colombia cuenta con una amplia variedad de ambientes donde pueden encontrarse acumulaciones de hierro. Los depósitos más grandes se encuentran localizados en la Cordillera Oriental, en los departamentos de Boyacá y Casanare, formados en capas estratificadas conocidas como banded iron formation (Ulloa, 2019). Otra importante acumulación de este mineral se encuentra en la Sierra Nevada de Santa Marta donde el mineral ferroso se formó por segregación magmática (Alfonso y González, 1990).

El departamento de Magdalena, ubicado al noreste de Colombia en la región Caribe (Fig. 1) se caracteriza por presentar una gran variedad de depósitos minerales debido a la diversidad de su contexto geológico (Hernández, 2001). Este departamento es uno de los sectores con mayor concentración minera del país, con el 4% total de la extracción, además de ser una de las principales fuentes de minerales para construcción, generando nacionalmente el 8% de minerales no metálicos (Ulloa, 2019). Actualmente, este departamento cuenta con 83 títulos mineros vigentes, de los cuales hay 8 en exploración, 4 en construcción y montaje y 71 en explotación (ANM, 2017). De estos, cinco pertenecen a minas de carbón, tres a carbón y otros minerales (talco, dolomita, mármol y demás concesibles), 52 de materiales de construcción, siete de materiales de construcción y otros materiales (agregados, arenas, caliza, gravas y arcillas), dos de oro y metales preciosos y 14 de otros minerales (cuarzo, talco, vermiculita). Todos estos títulos y depósitos representan un área de 388234 ha, correspondiente al 1,68% de la totalidad del departamento (ANM, 2017).

La mayor producción minera del Magdalena proviene principalmente de Ciénaga (ANM, 2017) (Fig. 1). Este municipio además de proveer una gran fuente de materiales para construcción cuenta con diversas mineralizaciones de hierro y titanio que hasta el momento no han sido tomados en cuenta para exploraciones ni explotaciones mineras (Hernández, 2001). Estas mineralizaciones se encuentran contenidas en los cuerpos anortosíticos de los sectores de El Palmor y Buritaca (Ulloa, 2019). La zona que más interés ha despertado por el potencial de contenido de titanio y hierro es la de Buritaca, estudiada por Alfonso y González (1990) y González (2000).

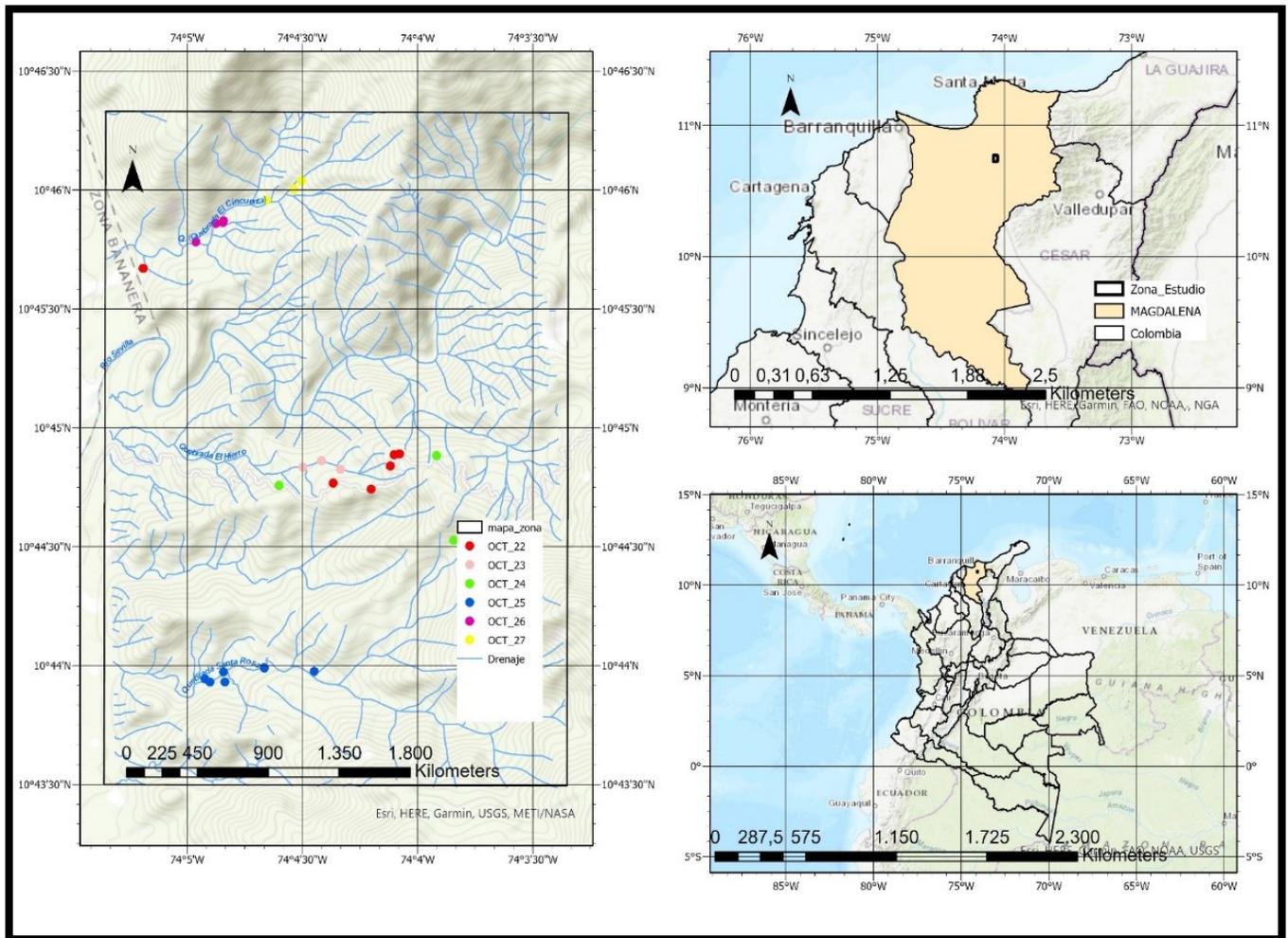


Figura 1. Mapas de localización del área de estudio. Derecha: Localización del departamento de Magdalena. Izquierda: Mapa del área de estudio ilustrando el drenaje principal y las estaciones de control geológico en terreno representadas por los círculos de colores.

Por otra parte, Hernández (2001) propone también la importancia de realizar un análisis estructural y genético a los depósitos de hierro alojados en las Anortositas de Sevilla del sector El Palmor, debido a la potencialidad y extensión que estos presentan. Cortes (2013) realizó un análisis petrogenético en esta zona determinando el comportamiento geoquímico de los elementos mayores, elementos traza y REE, logrando definir un posible ambiente genético para las Anortositas de Sevilla. Sin embargo, aún no se ha

realizado una caracterización que establezca la composición mineralógica y distribución espacial de las mineralizaciones de hierro en el sector El Palmor

El presente trabajo se enfoca en definir la composición química, mineralógica y el control estructural sobre las mineralizaciones de hierro del sector El Palmor, con la finalidad de establecer una posible relación genética y estructural. Para lograr estos objetivos se utilizó información recolectada en campo y se realizaron análisis de difracción y fluorescencia de rayos x de las mineralizaciones. Los resultados obtenidos en esta investigación contribuyen de manera importante a la planeación de futuros proyectos de prospección de hierro en el departamento del Magdalena.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Según Ulloa (2019), el departamento de Magdalena cuenta con varios depósitos de hierro producto del proceso de segregación magmática, que se han destacado por su extensión y potencialidad. Los que más han resaltado son los del sector de El Palmor y Buritaca. Sin embargo, la escasa información geológica disponible sobre los depósitos de hierro presentes en las Anortositas de Sevilla en el sector de El Palmor, ha limitado el interés de proyectos mineros que puedan brindar un provecho económico para el beneficio y desarrollo del municipio.

### **1.2. Preguntas de investigación**

- ¿Se encuentran controlados estructuralmente los depósitos de hierro en el sector El Palmor?
- ¿Cuál es la composición mineralógica de las mineralizaciones de hierro en el sector de El Palmor?

### **1.3. Hipótesis**

Los fluidos mineralizados enriquecidos en óxidos de hierro lograron migrar y precipitar debido a la presencia de estructuras geológicas perteneciente al sistema de fallas Bucaramanga - Santa marta presente en la zona de estudio.

## **1.4. Justificación**

Realizar la caracterización composicional y estructural de una mineralización es fundamental para el ámbito de la geología económica, ya que permite entender los controles estructurales en los fluidos mineralizantes durante el momento de emplazamiento, pues las estructuras geológicas desarrollan un papel como canales en el transporte y precipitación de los minerales. Asimismo, la identificación de la composición química y mineralógica del depósito permite realizar una correcta clasificación del mismo, logrando así determinar su potencial como mena de hierro y futuros usos.

Adicionalmente, la información obtenida por medio de los resultados de este proyecto es de gran importancia, ya que permitirá llenar los vacíos de información geológica y servirá como fuente de información para proyectos de prospección de minerales de hierro en el departamento del Magdalena.

## **1.5. Objetivos**

### 1.5.1. Objetivo general

Plantear un modelo genético-espacial de las mineralizaciones de hierro presentes en las Anortositas del Río Sevilla, localizados en El Palmor-Magdalena, por medio de la determinación de la composición química, mineralógica y el posible control estructural de las zonas mineralizadas.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar las zonas y direcciones preferenciales de mineralización por medio de la cartografía geológica y el análisis estructural.
- Definir la composición química y mineralógica de los depósitos de hierro mediante un análisis de difracción y fluorescencia de rayos X
- Desarrollar un modelo conceptual que establezca las condiciones genéticas que dieron lugar a la mineralización de hierro.

## **2. Generalidades**

### **2.1. Área de estudio**

#### **2.1.1. Localización**

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es un macizo rocoso, situado en la costa norte de Colombia, limitado por los departamentos de Magdalena, Guajira y Cesar, entre las latitudes norte  $10^{\circ} 01' 05''$ ,  $11^{\circ}22' 11''$ , y las longitudes al oeste del meridiano de Greenwich  $72^{\circ}36' 16''$ ,  $74^{\circ}12' 49''$  ( cortes, 2013)

El área de estudio se encuentra localizada en el flanco occidental de la SNSM, sobre las quebradas, El Cincuenta, El Hierro, Santa Rosa y a lo largo de la carretera que conecta los corregimientos de El Palmor y San José de Kennedy, entre las coordenadas, norte  $10^{\circ}46'21''$ - $10^{\circ}34'30''$ , y las longitudes, hacia el oeste  $74^{\circ}05'21''$ -  $74^{\circ}03'22''$ , cubriendo un área de aproximadamente  $20 \text{ km}^2$  (Fig. 1).

#### **2.1.2. Clima**

La zona de estudio está ubicada en el piso térmico cálido, donde la temperatura promedio es de veinticuatro ( $24^{\circ}$ ) grados Celsius la temperatura máxima pasa los treinta ( $30^{\circ}$ ) grados centígrados en épocas de sequía.

En el departamento de Magdalena, así como en la zona de estudio se presentan dos (2) temporadas de lluvia, la primera comienza entre los meses de abril y mayo, seguido por la segunda temporada que se da entre los meses de septiembre y noviembre; en total la precipitación media anual del departamento oscila entre los 1000 a 1200 mm/año Hernández (2001).

#### **2.1.3. Hidrografía**

La Sierra Nevada de Santa Marta está conformada por tres vertientes (norte, occidental, suroriental), 35 cuencas y más de 650 microcuencas, esta fuente hídrica produce cerca de 10.000 millones de metros cúbicos de agua al año Hernández (2001)

La vertiente occidental, en donde se encuentra la zona de estudio, se extiende entre el río Fundación (sur), la Ciénaga Grande de Santa Marta (oeste) y Quebrada Mateo (norte). Esta macrocuenca, está compuesta por seis (6) cuencas, las cuales recogen las aguas de los ríos Frío, Sevilla, Tucurínca, Aracataca y Fundación, desembocando en la Ciénaga Grande de Santa Marta, abarcando una extensión total de 380.400 hectáreas

## 2.2. Antecedentes

Se realizó una recopilación bibliográfica de los estudios geológicos desarrollados en cuerpos anortosíticos de la SNSM y de las mineralizaciones asociadas a estos.

- Los primeros estudios geológicos del área de estudio fueron llevados a cabo por Tschanz et al. (1969) quienes reportaron el primer avistamiento de cuerpos anortosíticos en el flanco occidental de la SNSM, y posteriormente se encargaron de realizar un análisis petrológico de esta unidad. Diferenciaron tres cuerpos a partir de su composición mineralógica y ubicación espacial: Neises Anortosíticos con Andesina (P $\epsilon$ a), Neises Anortosíticos con granate (P $\epsilon$ ag) y Neises Anortosíticos con magnetita (P $\epsilon$ am).

Debido a la composición mineralógica que estas rocas presentaban, fueron asociadas a unidades precámbricas de alto grado metamórfico. Para la génesis de estos cuerpos rocosos los autores postulan que podrían tratarse de fragmentos exóticos, placas falladas o bloques movidos por gravedad que fueron desprendidos de alguna manera del basamento cratónico adyacente por medio del sistema de fallas del lineamiento de Sevilla. Sin embargo, no existen evidencias de campo que soporten esta interpretación.

- Tschanz et al. (1970) desarrollaron una recopilación preliminar de las diferentes manifestaciones minerales en la SNSM, haciendo énfasis en las mineralizaciones de Magnetita-Ilmenita presentes en las Anortositas y Neis anortosíticos aflorantes en el Río Don Diego, en el sector norte de la SNSM.
- Alfonso y González (1990), realizaron la prospección a los depósitos de ilmenita presentes en la parte norte de la SNSM. Definiendo dos tipos de mineralización

presentes en la Anortosita de Don Diego (noritas mineralizadas y mineralizaciones estratiformes de ilmenita-magnetita-apatito). En los cuales se determinó un volumen inferido en torno a 4'772.000 toneladas y un origen para la mineralización enmarcado en el modelo de yacimientos tipo Kiruna, provenientes de un magma anortosítico rico en magnetita, apatito, que fue concentrando un silicato fundido residual, enriqueciéndose durante la diferenciación magmática y expulsado luego por presión filtrante.

- Alvarado L. & Solano F (1995), estableció un análisis de proveniencia en parte norte SNSM, entre los Ríos Don Diego y Ancho. Con el fin de determinar el ambiente de formación de la roca fuente de las mineralizaciones de arenas negras, así como el medio de transporte y mecanismos de concentración. Determinando como roca fuente a las Anortositas de Don Dieguito, compuestas en un 80% de plagioclasa y minerales máficos, constituidos principalmente por ilmenita y magnetita.
- En el estudio de González (2000) se tratan aspectos de potencial minero, duración del proyecto, aspectos ambientales y evaluación financiera de los depósitos de ilmenita presentes en el Rio Don Diego.
- Hernández et al., (2002), Desarrollo la cartografía 1:100.000 para el SGC de las planchas 11 y 18 pertenecientes al municipio de Ciénaga, Magdalena. En este, se describe a las Anortositas de Sevilla como una unidad conformada por anortositas y neises anortosíticos, bastante uniformes, de composición mineralógica casi exclusivamente de plagioclasa y cuarzo, con delgadas láminas de biotita y anfíbol. Plantea que su génesis se puede atribuir a la cristalización fraccionada de un magma gabrónico parental, que posteriormente fue afectado por los efectos del metamorfismo regional. Sin embargo, el origen y las relaciones de campo de las anortositas aún no son claros. Hernández et al., (2002) también, realizaron la descripción de unos depósitos de hierro de gran longitud presentes en las Anortositas de Sevilla hacia el sector del Palmor. Señalando la importancia en determinar las relaciones estructurales y genéticas de los mismos, ya que podrían ser de gran potencial.

- Cortes (2013), realizó un análisis petrogenético de las Anortositas del río Sevilla en el sector El Palmor. determinando el comportamiento geoquímico de los elementos mayores, elementos traza y REE. A partir del cual logro determinar que las rocas aflorantes en el sector del Palmor corresponderían a anortositas de tipo masivo, provenientes de magmas generados por fusión parcial del manto, que posteriormente ascendieron en forma de diapiros y fueron emplazadas por inyección en la corteza.
- Ulloa (2019), Elaboró una recopilación bibliográfica sobre las manifestaciones y prospectos de hierro en el territorio colombiano, recalcando la potencialidad de los depósitos generados por segregación magmática presentes en los sectores de Sevilla (Palmor) y Don Diego de la SNSM.

### **2.3. Geología regional**

En este capítulo se presenta el contexto regional de la geología en la zona de estudio, la cual se ubica en el margen de convergencia entre la placa del Caribe y el borde NW de Suramérica.

La SNSM es un macizo rocoso formado por tres cinturones tectonoestratigráficos (Cortes, 2013). Los dos más jóvenes están conformados por esquistos de origen pelítico que son intruidos por rocas del Triásico Jurásico y Terciario. El cinturón más antiguo está constituido por neises migmatíticos en facies granulita cuya litología dominante consiste en intercalaciones metapelíticas y granulitas cuarzo-feldespáticas (Restrepo et. al., 1997) (Fig. 2).

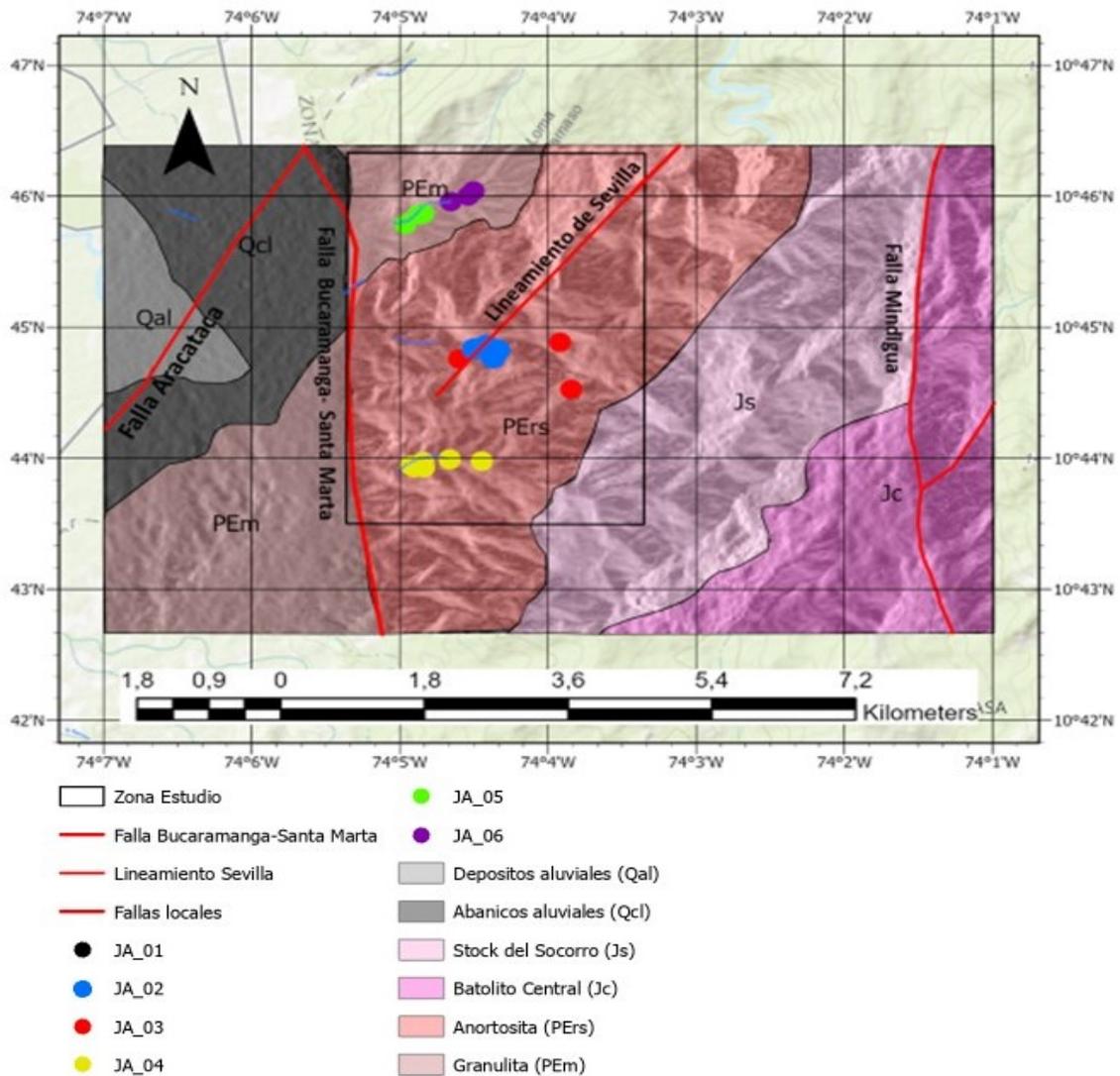


Figura 2. Mapa geológico regional. El polígono negro representa la zona de estudio y los puntos las estaciones realizadas durante la campaña de campo.

### 2.3.1. Precámbrico

#### 2.3.1.1. Granulita de Los Mangos (PEm)

El termino "Granulita de Los Mangos" fue usado originalmente Tschanz et al. (1969) para describir una serie de rocas metamórficas de alto grado, con variaciones composicionales que van desde máficas a félsicas (Alvarado & Solano, 1995); generalmente presentan

texturas granoblástica y bandeamientos de espesores variables. McDonald & Hurley (1969) definen una serie de secuencias como Neis de Don Diego y Neis de Dibulla, las cuales también son incluidas en la denominación de Granulita de Los Mangos.

Esta unidad está conformada por una secuencia de rocas metamórficas bandeadas, con textura granoblástica, presenta tonalidades grises a negras en las rocas de composición máficas, y colores claros en las rocas de composición intermedias. Tschanz et al. (1969) hace una clasificación de estas según las características petrográficas dividiéndolas en: (1) cuarzo pelíticas (2) de composición intermedia, (3) máficas, (4) calcáreas, (5) ultramáficas y (6) ricas en granate.

En la zona de estudio, en el río Sevilla, afloran una serie de Neises cuarzo micáceos, con bandas claras compuestas de cuarzo, y bandas oscuras de color marrón claro, constituidas por biotita y cuarzo (Cortes, 2013).

Se encuentra en contacto fallado con la unidad Neises Anortosíticos asociado al Sistema de Falla de Sevilla (Tschanz et al., 1969), lo que genera el desarrollo de texturas como la augen en los porfidoblastos.

#### 2.3.1. 2. Neises Anortosíticos (PErs):

Descritas por Tschanz et al. (1969) quienes las denominaron como “Anortosita del Río Sevilla” ( $P\epsilon a$ ), “Anortosita de Río Frío” ( $P\epsilon a$ ), “Anortosita de Niyula” ( $P\epsilon a$ ), “Anortosita de Orihueca” ( $P\epsilon ag$ ) y “Anortosita de Don Dieguito” ( $P\epsilon am$ ). Este mismo autor reconoce 3 tipos de Neis de acuerdo con su composición mineralógica (1) neises anortosíticos con andesina ( $P\epsilon a$ ), (2) neises anortosíticos con granate accesorio ( $P\epsilon ag$ ) y (3) neises anortosíticos con magnetita accesorio ( $P\epsilon am$ ).

Afloran en la parte occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. en la zona de estudio se encuentra a lo largo de la carretera que conecta los municipios de San José de Kennedy y el Palmor.

Son rocas de tonalidades blancas bandeadas, de grano que van desde medio a grueso, y textura granoblástica, compuesta principalmente de feldespato(plagioclasa); las bandas leucocráticas están compuestas predominantes de plagioclasa y en menor proporción cuarzo, micas y anfíboles, las bandas melanocráticas están oxidadas y cloritizadas por alteración.

### 2.3.2. Pérmico

#### 2.3.2.1 Batolito Central (Jc):

Definido por Tschanz et al. (1969) al cuerpo ígneo compuesto por varios plutones ligeramente diferentes y divididos en tres facies, la mas externa de composición cuarzodiorítica, la facies intermedia de composición diorítica, y la facies interna de composición granodiorítica.

Aflora entre los limites de los departamentos de Magdalena y Guajira, extendiéndose desde el corregimiento de Bellavista hasta la vereda El Palmor

Compuesto por rocas plutónicas félsicas, intermedias y máficas las cuales se encuentran en contacto fallado con las rocas volcánicas y volcanoclásticas Jurásicas y las rocas sedimentarias del Neógeno (Tschanz et al., 1969)

### 2.3.2. Mesozoico

#### 2.3.2.1. Stock del Socorro (Js):

Nombrado por Tschanz et al. (1969) a un cuerpo ígneo, de composición granodiorítica, que se emplazó a lo largo de del lineamiento de Sevilla.

Este cuerpo ígneo aflora en los alrededores del corregimiento el Palmor, más exactamente el Cerro El Socorro, en el Río Cherua y por la vía a El Palmor - La Bodega.

Corresponde a una roca intrusiva de composición granodiorítica con textura fanerítica de color gris con tonalidades levemente rosadas; localmente la roca presenta cristales de hornblenda con tamaños de (1mm-5mm). Debido al tectonismo que sufrió la zona en la roca se puede observar texturas cataclásticas y orientación de minerales (Cortes, 2013).

Esta unidad se encuentra en contacto fallado con la denominada granulita de los Mangos, evidenciado por el cizallamiento y desarrollo de milonitas a lo largo de la carretera que conduce hacia el Palmor (Cortes, 2013)

### 2.3.3. Depósitos cuaternarios

#### 2.3.3.1 Depósitos coluviales y abanicos aluviales (Qcl):

Son de poca extensión areal, ya que se encuentran suprayacidos por depósitos de llanura aluvial y depósitos fluviolacustres más recientes. Están formados, principalmente, por gravas subredondeadas y bloques hasta de 1 metro derivadas de rocas ígneas y metamórficas de la Sierra Nevada como neises, granulitas, dioritas y gabros, en una matriz arenosa

#### 2.3.3.2 Depósitos aluviales (Qal):

Corresponden a depósitos de topografía suave y baja no consolidados, con tamaños que van de gravas hasta bloques de rocas ígneas plutónicas con plagioclasa, micas, cuarzo, rocas ígneas volcánicas, rocas metamórficas y en menor proporción rocas sedimentarias, registrando la erosión de todas las unidades geológicas de la SNSM. (Cortes, 2013)

## 2.4. Marco estructural

El marco estructural de La SNSM, se expresa geomorfológicamente por un triángulo tectónico limitado al norte por la Falla de Oca, al occidente por la Falla de Santa Marta, perteneciente al Sistema de Fallas de Santa Marta - Bucaramanga y al este por la Cuenca del Cesar – Ranchería (Fig. 3). En general, la zona se encuentra controlada por fallas inversas y rumbo deslizantes con tendencia principal al noreste y este-oeste, con rumbos noreste y con vergencias al norte y al sur (Cortes, 2013).

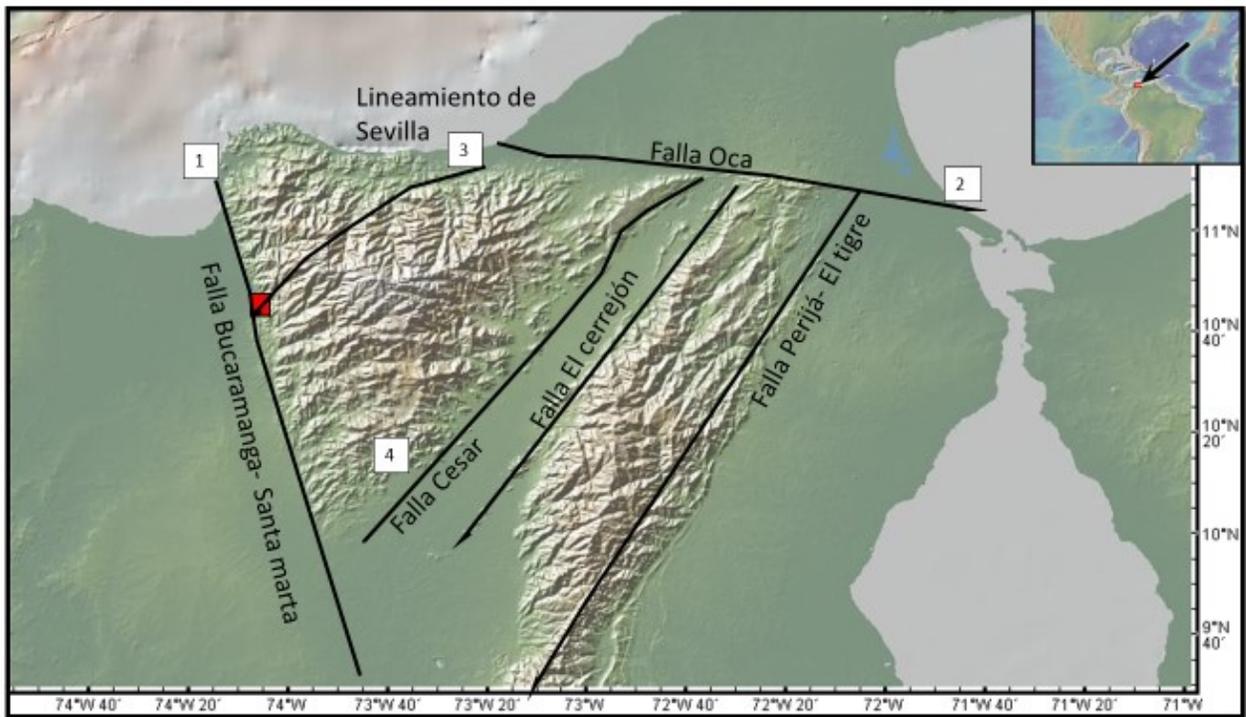


Figura 3. Mapa estructural mostrando los principales sistemas de falla de la SNSM. 1) Fallas de Sta. Marta – Bucaramanga, 2) Falla de Oca, 3) Lineamiento de Sevilla y 4) Falla Cesar. El polígono en rojo representa la zona de estudio.

Los principales sistemas de falla del área de estudio son la Falla Bucaramanga- Santa Marta, Lineamiento de Sevilla, Falla de Oca y Falla Cesar (Fig. 3):

#### 2.4.1. Falla Bucaramanga- Santa Marta

Se localiza en el sector oriental de SNSM, como una estructura recta de gran longitud en dirección NW – SE con algunas variaciones en su dirección a lo largo de su traza (Cortes, 2013).

Campbell (1965), describe el sistema de Falla Bucaramanga -Santa Marta como una falla de rumbo con movimiento sinistral y calcula pudo tener un desplazamiento de 110 km aproximadamente.

Según Arias & Morales (1999), es un sistema de fallas con rumbo NNW, orientado en dirección N17° W, con variaciones locales en su dirección, que se extiende regionalmente

desde el sur en Soápaga (Boyacá) hasta la costa Atlántica en la ciudad de Santa Marta con longitud aproximada de 600 km

Royero et al. (2000), con base en observaciones realizadas en campo, describen para el sector NW de la falla, un buzamiento elevado hacia el este del plano de falla y una dirección aproximada N20-35°W, y consideran que es de tipo inverso, con una componente de rumbo sinestral.

Según Vargas & Niño (1992) la Falla Santa Marta - Bucaramanga es aún activa y muestra evidencias neotectónicas en afloramientos fallados y planos de fricción en el Cuaternario al norte de Bucaramanga.

En el área de estudio se expresa como una estructura de primer orden, marcando un contraste topográfico entre la SNSM y los depósitos de Ciénaga. Esta falla se encarga de poner contacto rocas cristalinas del Paleozoico con depósitos fluviolacustres del Cuaternario (Fig. 4).

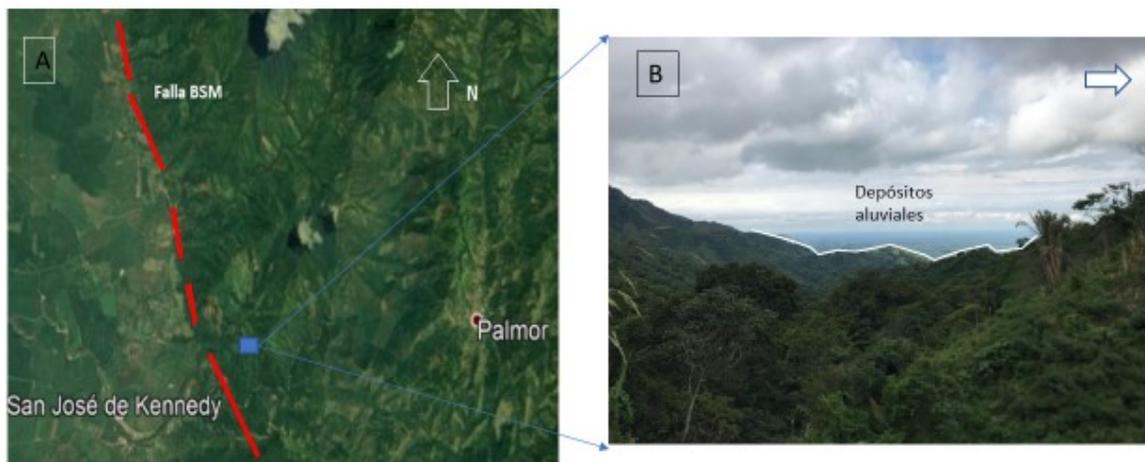


Figura 4. Aspectos geomorfológicos de la Falla Bucaramanga Santa Marta. A) Es posible distinguir la traza de la estructura y el cambio textural entre la SNSM (margen derecho) y los depósitos fluviolacustres (margen izquierdo). B) Se Puede apreciar al fondo de la imagen el contraste topográfico entre el pie de monte de la SNSM y los depósitos de Ciénaga Grande

#### 2.4.2. Falla de Oca

Rodríguez y Londoño (2002) describen esta estructura como la falla más importante del sistema con direcciones E-W a NW, constituyendo el límite entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la depresión de la Baja Guajira, su extensión es de aproximadamente 300 km desde el extremo noroccidental de la Sierra, donde se cruza con la Falla Santa Marta - Bucaramanga, hasta la Isla de Toas y posiblemente, se prolonga hasta su intersección con la Falla Boconó en Venezuela.

La cinemática de este sistema de fallas ha sido muy discutida. Gran número de autores coinciden en definirla como una estructura transcurrente de movimiento dextral, con una importante componente de desplazamiento vertical (Cortes, 2013)

Hernández et al., (2002), describe geomorfológicamente la falla Oca como un trazo rectilíneo con ligeras flexiones de muy bajo ángulo y corta extensión

#### 2.4.3. Lineamiento de Sevilla

Tschanz et al. (1974), describe a esta estructura como una importante geosutura que se encarga de separar dos provincias geotectónicas, la de Sevilla y Sierra Nevada de Santa Marta. Este autor define la cinemática y dirección de esta estructura como una falla inversa con vergencia al Occidente. Radelli (1962) en el Esquema Geológico-Petrográfico del Macizo de Santa Marta dibuja una falla de dirección NE-SO que arranca desde aproximadamente la población de Guacamayal y se dirige con el rumbo anotado hacia el Mar Caribe; coincide aproximadamente con el Lineamiento Sevilla, y traslada hacia el Nordeste el bloque Norte del Macizo de Santa Marta, es decir, el sector de Guacamayal-Ciénaga-Santa Marta, a la vez que desplaza en sentido nordeste la Falla de Santa Marta a la altura de Guacamayal.

Cortes (2013) describe que en la zona de estudio el trazo del lineamiento se hace evidente por el alto fracturamiento, cizallamiento y desarrollo de milonitas en la zona de contacto de la unidad Granulita de Los Mangos con los neises anortosíticos y la Granulita de Los Mangos con el Stock del Socorro.

#### 2.4.4. Falla Cesar

Es una estructura regional en dirección NNE-SSO que se encarga de limitar de manera tajante el bloque de la SNSM y los valles de Cesar y Ranchería. La zona de fallamiento hacia los valles de los ríos Cesar y Ranchería es poco notoria ya que todo el bloque buza hacia el SE. Sin embargo, su expresión geomorfológica se hace notoria con el contraste topográfico entre la SNSM y los depósitos cuaternarios de los valles (Hernández et al., 2002).

Tschanz et al. (1974), define a esta estructura regional como una geo sutura que cumple un papel importante al igual que el Lineamiento de Sevilla

### 2.5. Marco teórico

A continuación, se presentan los conceptos teóricos utilizados para la caracterización geoquímica y estructural de los depósitos de hierro del sector El Palmor. Para ello se usaron fundamentos estructurales (método de diedros rectos, análisis numérico dinámico NDA e indicadores cinemáticos), fluorescencia de rayos X y bases teóricas sobre la clasificación, diagénesis de rocas anortosíticas y mineralizaciones asociadas.

#### 2.5.1. Rocas Anortosíticas

El término anortosita fue introducido por Hunt (1857), para diferenciar este tipo de rocas de gabros y noritas. Las anortositas se definen como rocas ígneas plutónicas con más del 90 % de plagioclasa cálcica a intermedia, con bajo contenido de minerales ferromagnesianos y con óxidos de Fe y Ti como minerales accesorios (ilmenita, magnetita y rutilo).

##### 2.5.1.1. Mineralogía y texturas

Los cuerpos anortosíticos se caracterizan texturalmente por presentarse de forma masiva, su composición mineralógica se basa principalmente en plagioclasa  $\pm$  piroxeno  $\pm$  espinela ( $MgAl_2O_4$ )  $\pm$  apatito [ $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ ]. Los cristales de plagioclasa suelen presentarse de forma euhedral a subhedral con una textura masiva. Sin embargo, en

ciertas ocasiones es posible diferenciarlos con una textura de macla deformada y con cierta alineación. Estos minerales presentan gran variabilidad en su tamaño, donde en ciertas ocasiones llegan a alcanzar hasta 1.8 m de longitud (Ashwal, 1993).

Dentro de estas rocas plutónicas, también es posible encontrar depósitos de óxidos de titanio y hierro (Fig. 5), generalmente se muestran con la siguiente asociación mineralógica: ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) + hemo-ilmenita (ilmenita con lamelas de exsolución de hematita)  $\pm$  titanomagnetita  $\pm$  magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), los cuales en ciertos casos conforman más del 10% del conjunto mineral (Ashwal, 1993).

Los depósitos minerales con mayor contenido de ilmenita o hemo-ilmenita y en menor proporción magnetita ocurren principalmente en anortositas con plagioclasa de composición andesina; mientras que los cuerpos con alto porcentaje de titanomagnetita y baja cantidad de ilmenita son asociados a anortositas con plagioclasa de composición sódico-cálcica como la labradorita (Ashwal, 1993).

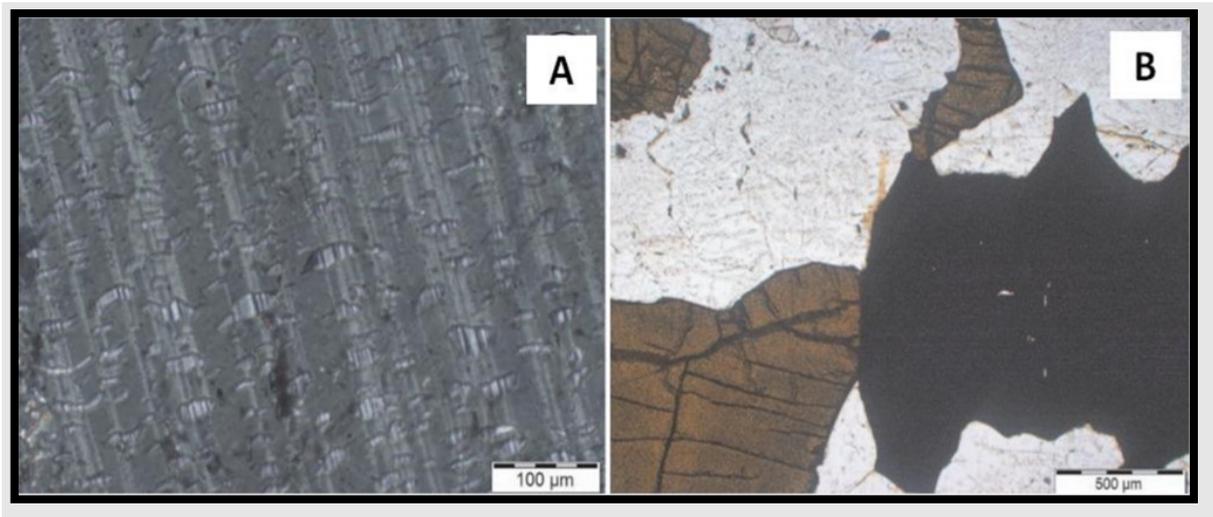


Figura 5. A) Sección delgada perteneciente a las anortositas de Roseland (U.S.A) Textura antiperfítica donde se destacan las maclas tipo albita. B) Foto en nicols paralelos donde se evidencia el contacto entre ilmenita (negro) y rutilo (marrón). Tomada de Owens y Dymek (2016).

### 2.5.1.2. Morfología de complejos anortosíticos y mineralizaciones asociadas

Los cuerpos de anortosita presentan morfologías muy diversas a lo largo de todo el mundo. Sin embargo, se ha logrado definir dos formas particulares en las cuales estos cuerpos suelen ocurrir de manera más frecuente. El primero hace referencia a complejos estratiformes, elongados y deformados (Sills o lopolitos), que se encuentran confinados entre capas con composiciones fuertemente contrastantes, como en el Complejo de Bushveld en Suráfrica; El segundo grupo define a cuerpos plutónicos masivos con gran variedad de tamaño, logrando abarcar desde plutones (1 a 10 km<sup>2</sup>) hasta batolitos (10000 a 20000 km<sup>2</sup>). Los complejos anortosíticos más grandes ocurren en forma dómica, suprayaciendo rocas de alto grado metamórfico (Ashwal, 1993).

Las rocas anortosíticas suelen encontrarse asociadas a cuerpos mineralizados de óxidos de Fe y Ti, que generalmente ocurren de forma estratiforme, diseminada, vetiforme o en lentes con mineral masivo. Las mineralizaciones discordantes presentan contactos marcados con la roca encajante que simplifica su delimitación por el contraste composicional y textural (Fig. 6).



Figura 6. Veta discontinua de titanomagnetita y hemo-ilmenita en el Cape Caribou River allochthon. La veta, se encuentra contenida en cuerpos anortosíticos masivos pertenecientes a una Provincia Genvilliana. Se presenta con un espesor variable entre 3 a 30 cm. Tomada y editada de Valvasori et al. (2015)

### 2.5.1.3. Ambiente tectónico

Existe una gran discusión acerca de los ambientes tectónicos característicos de las anortositas, debido a que algunos autores difieren en brindar un ambiente único para cierto tipo de anortosita. Sin embargo, la gran mayoría coincide en definir una clasificación a dos grupos principalmente. El primero consiste en rocas del Arqueano que se pudieron generar en condiciones cratogénicamente estables que permitieron el emplazamiento de estos cuerpos. Muchas de estas anortositas fueron emplazadas en niveles relativamente someros como sills elongados dentro de lavas máficas, tobas y/o rocas gabroideas hipoabisales (Ashwal 1993); El otro grupo hace referencia a anortositas proterozoicas que se pudieron generar en un entorno de arco de tipo andino, este entorno explica la larga duración del magmatismo derivado del manto, el emplazamiento en la corteza continental profunda de edad variable y la disposición común en cinturones lineales (Ashwal y Bybee, 2017). Dicho entorno de margen continental permitió la acumulación de plagioclasa en cámaras magmáticas, la interacción y contaminación con la corteza continental y su posterior emplazamiento en la corteza. Los procesos activos de margen convergente propiciaron el comienzo de un largo proceso de diferenciación y un lento ascenso de masas viscosas de plagioclasa, produciendo un retraso temporal entre el inicio del magmatismo y el emplazamiento final en la corteza media. Cuando el arco activo se apagó dominó el colapso gravitatorio y las fuerzas extensionales, facilitando el ascenso de las anortositas hasta sus niveles finales de emplazamiento (Ashwal y Bybee, 2017).

Reconstrucciones paleogeográficas muestran que las ubicaciones de muchos cuerpos anortosíticos se concentran en cinturones lineales en zonas de subducción para el caso de las anortositas del Proterozoico y en zonas cratónicas estables para el caso de las anortositas Arqueanas (Fig. 7).

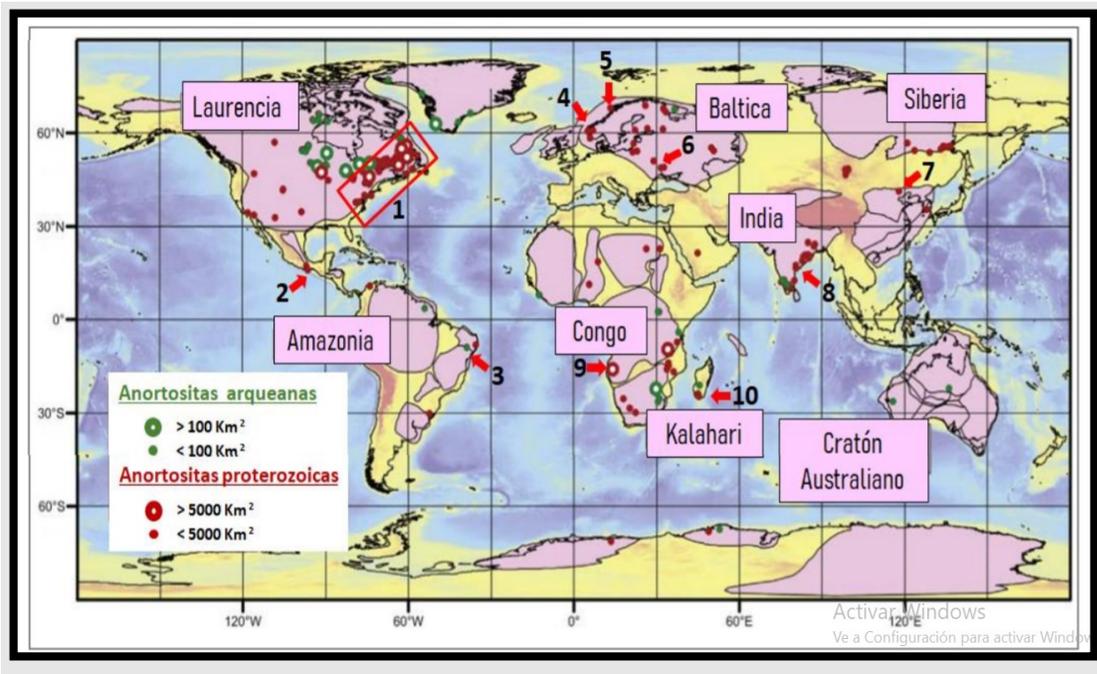


Figura 7. Mapa global de la distribución de cuerpos anortosíticos. Los puntos verdes a lo largo de los márgenes continentales hacen referencia a las anortositas masivas del proterozoico, cuya extensión abarca un área promedio de 1,087 km<sup>2</sup>; Los puntos de tonalidad rosada indican a los macizos anortosíticos Arqueanos cuya distribución se asocia principalmente a áreas cratónicas identificadas con el color rosa. Estos cuerpos presentan globalmente una menor extensión que los proterozoicos y en promedio abarcan ~ 90 km. Los números indican algunas provincias anortosíticas con recursos probados o potenciales de Fe-Ti y minerales de Cu-Ni asociados: 1) Provincia Grenvilliana (Norte América), 2) Complejo Oaxaqueño (México), 3) Complejo Caraiba (Brasil), 4) Rogaland (Noruega), 5) Lofoten (Noruega), 6) Korosten (Ucrania), 7) Damiao (China), 8) Cinturón de Ghats del Este (India), 9) Complejo Kunene (Namibia), 10) Anortositas Madagascar (Madagascar). Tomada y modificada de Ashwal y Bybee (2017).

#### 2.5.1.4. Clasificación anortositas

Ashwal (1993) divide las anortositas de acuerdo a su composición, sus características texturales, rocas asociadas y al ambiente tectónico en cinco (5) tipos: anortositas Arqueanas megacrystalinas, anortositas Proterozoicas de tipo masivo, anortositas en intrusiones máficas y ultramáficas bandeadas, oceánicas e inclusiones en otras rocas ígneas (xenolitos)

- Anortositas megacristalinas Arqueanas: Estas rocas conservan texturas primarias características de este tipo de anortositas, presentando mega cristales de plagioclasa cálcica (An80) con más de 30 cm de diámetro, en conjunto de una matriz compuesta por minerales máficos. Estos cuerpos se encuentran asociados con rocas supracorticales que fueron emplazados en niveles relativamente someros como sills elongados dentro de lavas máficas, tobas y rocas máficas hipoabisales (Ashwal, 1993), también se pueden ser relacionados con cinturones dioríticos (Windley ,1973), y leucogabros metamorfoseados que van desde facies esquisto verde hasta granulita. (Ashwal,1993).
- Anortosíticos proterozoicos (Massif-Type): Este tipo de anortositas es el más abundante en la corteza terrestre. Se evidencian como plutones con miles de km<sup>2</sup> de extensión constituidos por varias masas faneríticas individuales. Entre los cuales se incluyen anortositas, leuconoritas, leucogabros y/o leucotroctolitas. Composicional y texturalmente presentan plagioclasa intermedia (An 50 ±10) y cristales gruesos a muy gruesos con formas prismáticas a tabulares. Como minerales accesorios se encuentran megacristales de piroxenos ricos en aluminio, olivinos, óxidos de Fe-Ti y apatito. En ciertas ocasiones las anortositas masivas son relacionadas como rocas ricas en óxidos de Fe-Ti, capaces de formar depósitos con gran tamaño de ilmenita y magnetita (Fig. 8) (Ashwal 1993).
- Anortositas en Intrusiones máficas y ultramáficas bandeadas: Se presentan como pequeños cuerpos bandeados con dimensiones de pocos centímetros de espesor hasta 100 m, su frecuencia de aparición y dimensión son menores a comparación de las anortositas masivas y megacristalinas. Texturalmente presenta variaciones dependiendo de su ambiente genético. En intrusiones ígneas se evidencia con cristales de plagioclasa primitivos tabulares a acumulaciones de cristales de este mismo mineral con formas poligonales iguales. (Ashwal 1993)
- Anortositas de corteza oceánica: se trata de delgados horizontes de anortositas, con espesores menores a 1 metro, dentro de secuencias de capas de gabros. Este tipo de anortositas se presenta en muchos complejos ofiolíticos. La plagioclasa

típicamente varía entre An79 An-90. Se han reportado edades que van desde el Cámbrico tardío hasta el Eoceno temprano. (Ashwall, 1993)

- Inclusiones pequeñas en otros tipos de rocas (Xenolitos e inclusiones): pueden ocurrir como inclusiones dentro de rocas con rango composicional de Kimberlitas, granitoides, hasta basaltos. Se pueden presentar como xenolitos incorporados durante el ascenso de los magmas. Otras son congénitas y representan acumulaciones de plagioclasa provenientes de su magma huésped, presentando texturas granulares con cristales gruesos y orientados al azar, no zonados, con plagioclasas con un componente An 59 – 62, laminares con cristales tabulares zonados, donde la plagioclasa varía entre An 63 – 65, con foliación bien desarrollada y megagranulares con cristales entre 1 a 38 cm, generalmente euhedrales, con un componente de An 35 – 65. (Ashwal 1993).

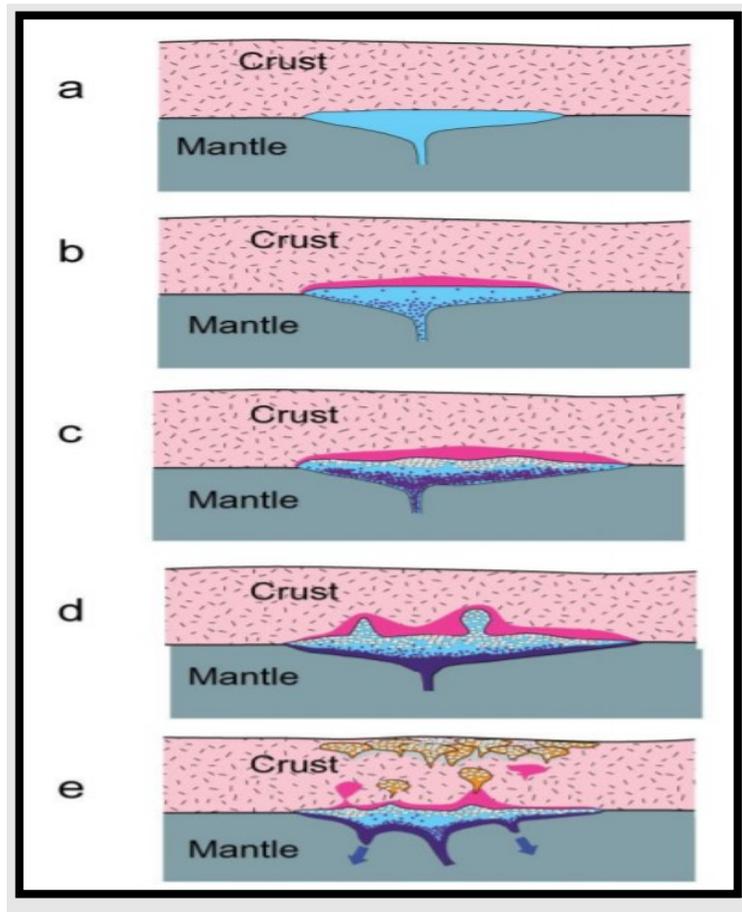


Figura 8. Modelo para la generación de anortositas de tipo masivo. Donde es posible distinguir las distintas fases de formación: a) Magma derivado del manto, que por su alta densidad, se equilibra por debajo de la corteza; b) Cristalización de fases máficas con hundimiento y fusión parcial de la corteza inferior. El fundido es rico en Al y Fe/Mg; c) La plagioclasa se acumula en el tope de la cámara, mientras se hunden los minerales máficos; d) Las acumulaciones se vuelven menos densas y ascienden; e) La coalescencia de plutones forma macizos anortosíticos. Los cumulátos máficos permanecen en profundidad. Tomado de Ashwall (1993). (Cortes, 2013)

### 2.5.2. Mineralizaciones asociadas a las rocas anortosíticas

Los óxidos de Fe y Ti que normalmente se asocian a las anortositas son principalmente la ilmenita, magnetita, hematita, ulvoespinela y en menor cantidad el rutilo. Actualmente, algunos cuerpos anortosíticos mineralizados son utilizados como menas de Fe, Ti, V y P, este es el caso de los depósitos de Lac Tio (Quebec, Canadá), Tellnes (suroeste de Noruega) y Damiao (China), entre otros. Recalcando la importancia que tiene ilmenita

como una de las principales menas de titanio solventando aproximadamente el 89% del consumo mundial. (Ashwal y Bybee, 2017) .

Los tipos de rocas anortosíticas que han estado más relacionadas con la ocurrencia de depósitos de óxidos de Fe y Ti son las de tipo masivo del Proterozoico e intrusiones máficas o ultramáficas bandeadas. El primer grupo de rocas se encuentra muy asociado con los principales depósitos de titanio a nivel global, que geocronológicamente se restringen al Proterozoico y a la ocurrencia de terrenos metamórficos de medio a alto grado en facies de anfibolita a granulita. De los depósitos de Fe y Ti, se diferencian dos categorías de ensamblajes mineralógicos. El de labradorita con concentraciones de titanomagnetita y de andesita con menas de hemo-ilmenita. Los principales depósitos de ilmenita del mundo se encuentran asociados a esta última. Sin embargo, existe una tercera categoría poco usual que corresponde a las anortositas alcalinas, asociadas a depósitos de rutilo e ilmenita como los que se encuentran en Roseland, Virginia; Pluma Hidalgo, Oaxaca y St. Urbain, Quebec. (Ashwal y Bybee, 2017) .

El segundo grupo de rocas anortosíticas ligadas con mineralizaciones de Fe y Ti, son las cumúláticas formadas en las partes superiores de intrusiones bandeadas máfico-ultramáficas, su génesis se encuentra relacionada a procesos de diferenciación in situ, causados por la acumulación de minerales máficos por efecto de la gravedad y posterior cristalización. Estos depósitos no muestran edades de emplazamiento restringidas, ya que abarcan edades desde el Arqueano. Composicional y texturalmente diferencian por presentar un bandeamiento rítmico, textura de cumúlítica y una plagioclasa en el rango bitownita a anortita. Por otra parte, representan un gran valor económico, ya que albergan minerales como magnetita e ilmenita, de los cuales se extrae hierro, titanio y en algunos casos cantidades económicamente importantes de vanadio, como ocurre en la parte superior de la zona principal del Complejo de Bushveld (Ashwal y Bybee, 2017) .

#### 2.5.2.1. Génesis de los yacimientos

Los depósitos de Fe y Ti presentes en rocas anortosíticas son atribuidos al proceso de fraccionamiento in situ, el cual toma lugar a partir de la cristalización fraccionada de un

magma básico, donde los silicatos ferromagnesianos y feldespatos cálcicos cristalizan primero, de modo que el magma residual se va enriqueciendo progresivamente en óxidos de hierro y titanio. A medida que avanza la cristalización se tendrá una malla de cristales de silicato en contacto y líquido intersticial enriquecido en óxidos, donde los minerales ferromagnesianos tenderán a hundirse y los feldespatos cálcicos permanecen suspendidos. Para que se forme un depósito económico, se requiere que las gotas de líquido ricas en óxidos que se encuentran dispersas se concentren, lo cual puede ocurrir mediante un fenómeno conocido como filter-pressing. La presión aplicada por el peso de los cristales superpuestos o por fuerzas externas puede forzar a el líquido más móvil fuera de la malla de cristal y al mismo tiempo puede fracturar o aplastar los cristales restantes, así las gotas de magma se juntan e inyectan en otras partes del cuerpo principal o incluso fuera de él, dando origen así a los cuerpos discordantes masivos como los que conforman los cuerpos de titanomagnetita (Fig. 6) (Bateman, 1951).

Bateman (1951), menciona otro mecanismo por el cual pueden formarse concentraciones de óxidos de Fe y Ti. Este fenómeno toma lugar en el fraccionamiento in situ, cuando los líquidos inmiscibles enriquecidos en óxidos son movilizados por filter-pressing. En este caso no se da esta presión, causando que los óxidos de Fe-Ti tiendan a acumularse y hundirse por su mayor densidad, formando así capas diseminadas de menor ley (Fig. 9).

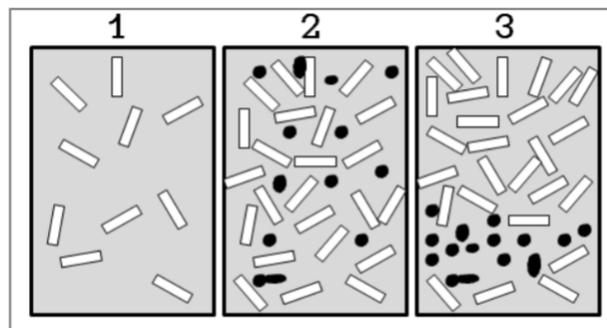


Figura 9. Formación de depósitos diseminados de óxidos de Fe y Ti. 1) cristalización de plagioclasa, 2) maya de cristales de silicato y líquido residual enriquecido en óxidos entre los intersticios de los cristales, 3) hundimiento de los óxidos de Fe-Ti. (Ashwal y Bybee, 2017)

### 2.5.3. Fundamentos estructurales

#### 2.5.3.1 Zona de cizalla:

Se refiere a una zona de deformación de forma tabular en la corteza terrestre, que se genera bajo condiciones frágiles o dúctiles. Los mecanismos de deformación que actúan dentro de la zona de cizalla dependen tanto de la mineralogía como de la textura de la roca y además de las condiciones físicas que prevalecieron durante la formación (Davis y Reynolds, 1996).

- Zona frágil: Se forma en la zona superficial de la corteza terrestre, regularmente hasta los 10-15 km de profundidad, donde la deformación se da de forma frágil. Esta zona está caracterizada por la formación de gouge de falla, diaclasas, fracturas subsidiarias; el fallamiento y fracturamiento en esta zona, resulta en márgenes discontinuas que marcan desplazamientos.
- Zona dúctil: ocurre entre 15-40 km en profundidad, donde predomina la deformación plástica a semiplástica. Bajo estos regímenes se desarrollan un amplio rango de rocas.

#### 2.5.3.2 Orientación de líneas y planos

Los elementos estructurales que se miden en campo son principalmente líneas y planos, la manipulación de estos de estos permite visualizar y analizar estructuras geológicas en tres dimensiones; por convención, la orientación de un plano se expresa como su rumbo(strike) y buzamiento (dip), mientras que la orientación de una línea es expresa como dirección (trend) e inmersión (plunge) (Rowland et al, 2009)

Los siguientes términos son usados para describir la orientación de líneas y planos:

- Rumbo (strike): dirección (respecto al Norte magnético) de una línea horizontal contenida en un plano geológico

- Buzamiento (dip): Corresponde al ángulo que forma la línea de máxima pendiente con respecto a un plano horizontal. También se le conoce como manteo, echado.
- Dirección (trend): es la dirección de la línea formada por la intersección de la característica plana con la superficie del suelo
- Inclinación (plunge): es el ángulo vertical entre el plano horizontal y el eje o línea de máxima elongación de un elemento

Existen diversas maneras para describir el rumbo y buzamiento:

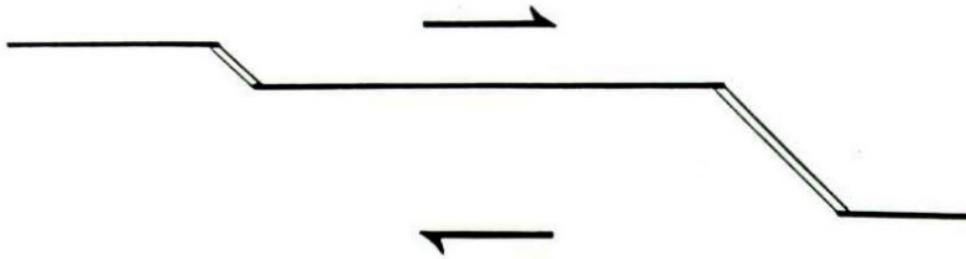
- Cuadrantes: el rumbo se da en un ángulo (en grados) hacia el este u oeste con respecto al norte o al sur. Se indica el ángulo de buzamiento y la dirección en que este cae, teniendo presente que existe un rango de cuatro cuadrantes posibles (NE, SE, NW y SW)
- Azimutal: todas las posibles direcciones están en un círculo de 360°

#### 2.5.4. Cinemática de fluidos en zonas de falla

Sibson (1990) ha descrito de manera muy detallada los condicionantes que llevan a la precipitación de mineralizaciones hidrotermales en zonas profundas (mesotermiales) y someras (epitermales) que se presentan en sistemas de fallas activos. La capacidad de ruptura por la actividad sísmica induce abruptamente el movimiento de fluidos en una falla y por ende, la precipitación de su carga metálica en zonas estructuralmente favorables (en extensión) donde se crean las condiciones físicas necesarias para la precipitación y formación de minerales. De acuerdo con Sibson (1990), existen dos mecanismos que permiten la formación de mineralizaciones a partir de estas estructuras:

- La bomba de succión (suction-pump): es aplicable a las mineralizaciones epitermales activadas por rupturas sísmicas. Las estructuras formadas a rellenar son de carácter extensional y presentan morfologías tales como en echelon y cola de caballo. La apertura forzada sísmicamente de la estructura a velocidades más rápidas a la que migran los fluidos genera un desequilibrio de presiones lo que produce una succión (Fig. 10)

(a) PRE-RUPTURA: PRESIONES DE FLUIDO UNIFORMES



(b) POST-RUPTURA: ENTRADA DE FLUIDOS EN LOS JOGS EXTENSIONALES

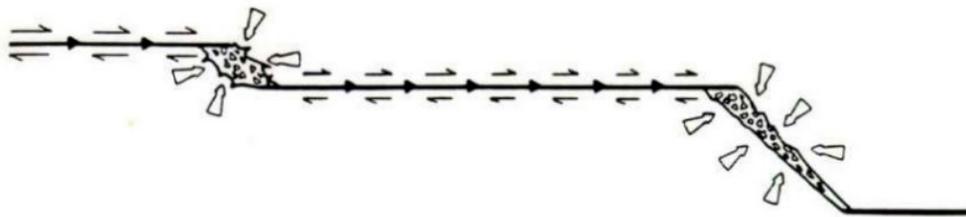


Figura 10. Sistema tipo bomba de succión. (Sibson, 1990).

-válvula activada (fluid-activated valve): es aplicable a las grandes zonas de cizalla en régimen dúctil-frágil. Para que el modelo se cumpla la zona de cizalla debe cortar a través de un gradiente de presión que excede las condiciones puramente hidrostáticas. Los gradientes suprahidrostáticos pueden desarrollarse en vastas zonas o concentrarse en las vecindades de una falla, cuando por ejemplo esta corta una barrera impermeable (evaporitas, lutitas, rocas cristalinas). La acción de la válvula se inicia cuando se produce una rotura sísmica en el sistema, que permite a los fluidos superar la barrera. La descarga hacia arriba se mantiene hasta que el gradiente de presión pasa a hidrostático en la barrera (equilibrio). El proceso se ve favorecido en fallas de gran ángulo, en particular, en aquellas de tipo inverso (Sibson, 1990) (Fig. 11)

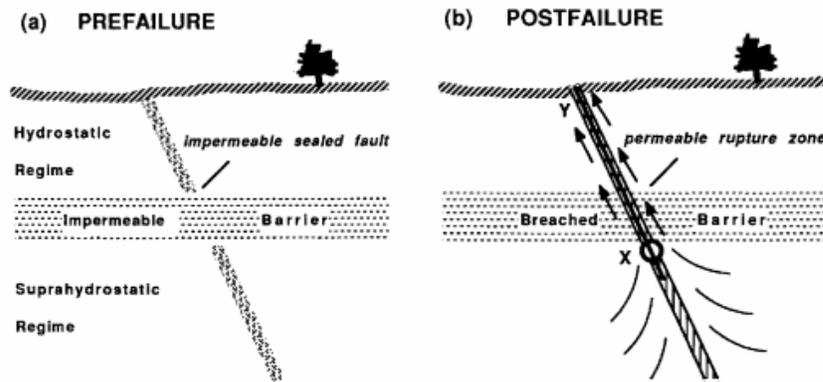


Figura 11. Sistema tipo válvula activada. A) Barrera impermeable separando regímenes de presión litostática e hidrostática. B) Ruptura de la barrera e inyección de fluidos. (Sibson, 1990)

#### 2.5.5. Difracción de rayos X – XRD:

La difracción de rayos X es una técnica de análisis de la fase cristalina de un material, ya sea natural o sintético, que se basa en los patrones únicos de los rayos difractada de los diferentes materiales.

Wolf (1980) describe que la difracción es un fenómeno de dispersión de rayos X en respuesta al ordenamiento de los átomos en una estructura cristalina. debido a este ordenamiento los rayos dispersados entre los diferentes átomos llevan un cierto desfase, generando una interferencia en sus trayectorias, la cual provoca que la mayoría de ellos se extingan por su diferencia de fase  $\Delta\lambda = n\lambda$  ( $n = 1,2,3 \dots$ ), y solo en algunas direcciones, donde las diferencias de fases son  $\Delta\lambda = n \lambda$  se forman rayos difractados por interferencia constructiva.

Las condiciones para que se genere la interferencia constructiva entre ondas diferentes, se cumple únicamente cuando:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

n: número entero denominado orden de difracción

$\lambda$ : longitud de onda del haz incidente de rayos X

d: distancia entre los planos difractantes, es decir, la distancia entre los planos reticulares sobre el cual incide la radiación.

$\theta$ : ángulo de incidencia (ángulo de Bragg) medido entre los planos en consideración y el haz incidente.

Esta ecuación es llamada ley de BRAGGY y es la base fundamental de la difracción de rayos X.

Wolf (1980) concluye que la difracción de rayos X en una muestra cristalina produce un campo de interferencias de RX, es decir, un campo de rayos difractados, y que este campo se compone de todas las interferencias producidas por los grupos de planos reticulares que se encuentran en la muestra, caracterizado por la distribución o ubicación de las interferencias frente al haz incidente y las intensidades de dichas interferencias.

Al momento de realizar una difracción de rayos X existen diferentes métodos que se pueden emplear, dependiendo de las características del material al que se requiera aplicarle la técnica. Cano (2014) hace una descripción detallada de los diferentes métodos que cumplen con la ley de Bragg

1. Método de Laue: Consiste en hacer incidir radiación continua de rayos X, en un monocristal, sin cambiar el Angulo de incidencia. El patrón de difracción generado queda registrado en una placa fotográfica
2. Método del cristal rotario: Este método utiliza radiación característica de rayos X (longitud de onda fija), el monocristal se coloca en el centro de una cavidad cilíndrica, sobre una plataforma que rota axialmente. Al incidir la radiación proveniente de la fuente (monocromática), en el monocristal, se producen los rayos X difractados Estos haces difractados generan un patrón de difracción en la placa fotográfica
3. Método del polvo: Este método se utiliza para determinar la composición de elementos cristalinos, que no pueden ser analizados independientemente.  
El principio básico de esta técnica es una incidir radiación monocromática sobre un polvo, en donde la orientación de los cristales constituyentes está de forma

aleatoria generando así un difractograma, en el cual se reconocen las fases cristalinas presentes en el polvo.

Cada método descrito tiene su particularidad. El método de Laue es conveniente para determinar la orientación y las simetrías de un monocristal, El método de cristal rotatorio se utiliza en la determinación de la estructura cristalina de un monocristal. El método del polvo es utilizado de forma recurrente en trabajos de investigación, debido a que no requiere que las muestras (polvos) sean monocristales Cano (2014).

#### 2.5.6. Fluorescencia de rayos X por energía dispersiva

La fluorescencia de rayos X es un método cualitativo y cuantitativo que se basa en la medida del número de rayos X detectados por unidad de tiempo producidos por cada elemento que constituyen la muestra Cano (2014).

Los rayos X que son emitidos por medio de tubos o por alguna otra fuente, generan una excitación en los elementos constituyentes, los cuales, en respuesta a la excitación emiten líneas espectrales con energías características del elemento y cuya intensidad está relacionada con la concentración del elemento en la muestra (Boumans, 1989)

Cuando los átomos son excitados por medio de los rayos X, los electrones dejan los niveles internos del átomo, debido a esto, electrones de los niveles de energía mayores realizan un salto cuántico. Cada transición electrónica se ve reflejada en pérdida de energía para el electrón; esta energía que es característica y definida para cada uno de los elementos que componen la muestra es emitida en forma de fotón de rayos X (Boumans, 1989)

En resumen, el método consiste en tres pasos. Excitación de los elementos, dispersión de los rayos X característicos de cada elemento y detección de los rayos emitidos por los constituyentes de la muestra Cano (2014).

### **3. Metodología**

Las labores para el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo en las siguientes etapas (Fig. 12):

**3.1. Trabajo de Campo:** Se desarrollaron tres fases de trabajo para realizar la identificación, recolección y clasificación de los datos estructurales en campo correspondientes a las estructuras geológicas del sector El Palmor : 1) fase de pre-campo, 2) trabajo de campo, y 3) clasificación de datos.

- 1) Fase de pre- campo: Durante esta fase se realizó una recopilación bibliografía acerca de la geología de la zona de estudio y se realizó la identificación de estructuras geológicas de mayor escala, por medio de imágenes satelitales de Google Earth y uso de modelos de elevación digital correspondientes a la zona de estudio.

El modelo de elevación digital se obtuvo de manera digital por medio de ASTER GLOBAL DEM V003 (ASTER GDEM)

- 2) Trabajo de campo: Se realizaron 6 días de campo, en los cuales se cartografiaron las diferentes unidades litológicas y las estructuras presentes en la zona de estudio. Se adquirieron datos estructurales y se tomaron 4 muestras para los análisis geoquímicos y mineralógicos.
- 3) Clasificación de datos: A partir de los datos recopilados durante el trabajo de campo, se continuo con la clasificación de los mismos. Se realizó por medio de las plantillas de Excel, encargadas de separar las distintas estructuras: planos de falla, diaclasas, venas, diques y estratificaciones. Esto se efectuó para realizar un correcto procesamiento de los datos. También, se hizo una selección de las muestras de la mineralización para desarrollar un análisis mineralógico y geoquímico.

**3.2. Análisis de datos estructurales:** Para determinar las zonas y direcciones preferenciales de mineralización, se realizó un análisis espacial, geométrico y cinemático por medio del software Stereo 32, con el cual se construyeron diagramas rosa y estereogramas de los datos estructurales colectados en campo. Por medio de estos análisis se identifica la tendencia estructural de las mineralizaciones y su relación con

estructuras regionales que permitieron el emplazamiento de las mineralizaciones de hierro (Fig. 12).

**3.3. Análisis de Dispersión (DRX) y Fluorescencia (FRX) de Rayos X:** Con el fin de definir la composición química de los depósitos de hierro se seleccionaron 4 muestras, las cuales se utilizaron para desarrollar un análisis por Fluorescencia de Rayos X por Energía Dispersiva (ED-XRF), con los cuales se logró definir la composición de óxidos mayores y elementos menores. Del mismo modo, para determinar la composición mineralógica de la mineralización se seleccionó una muestra con la que se llevó a cabo un análisis por difracción de rayos X (DRX). Ambos análisis fueron desarrollados en los laboratorios de Inclay Geología Especializada en la ciudad de Bogotá (Fig. 12).

**3.4. Análisis de resultados:** a partir de los datos obtenidos en los análisis espaciales y cinemáticos se realizó un mapa estructural y geológico por medio del software ArcGIS Pro. Mediante los resultados obtenidos en el mapa, análisis mineralógico, geoquímico y recopilación bibliográfica se logró establecer las posibles relaciones genéticas y estructurales del depósito de hierro (Fig. 12).

## CONTRIBUCIÓN A LA CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y GEOQUÍMICA DE LAS MINERALIZACIONES DE HIERRO EN EL SECTOR EL PALMOR, MAGDALENA

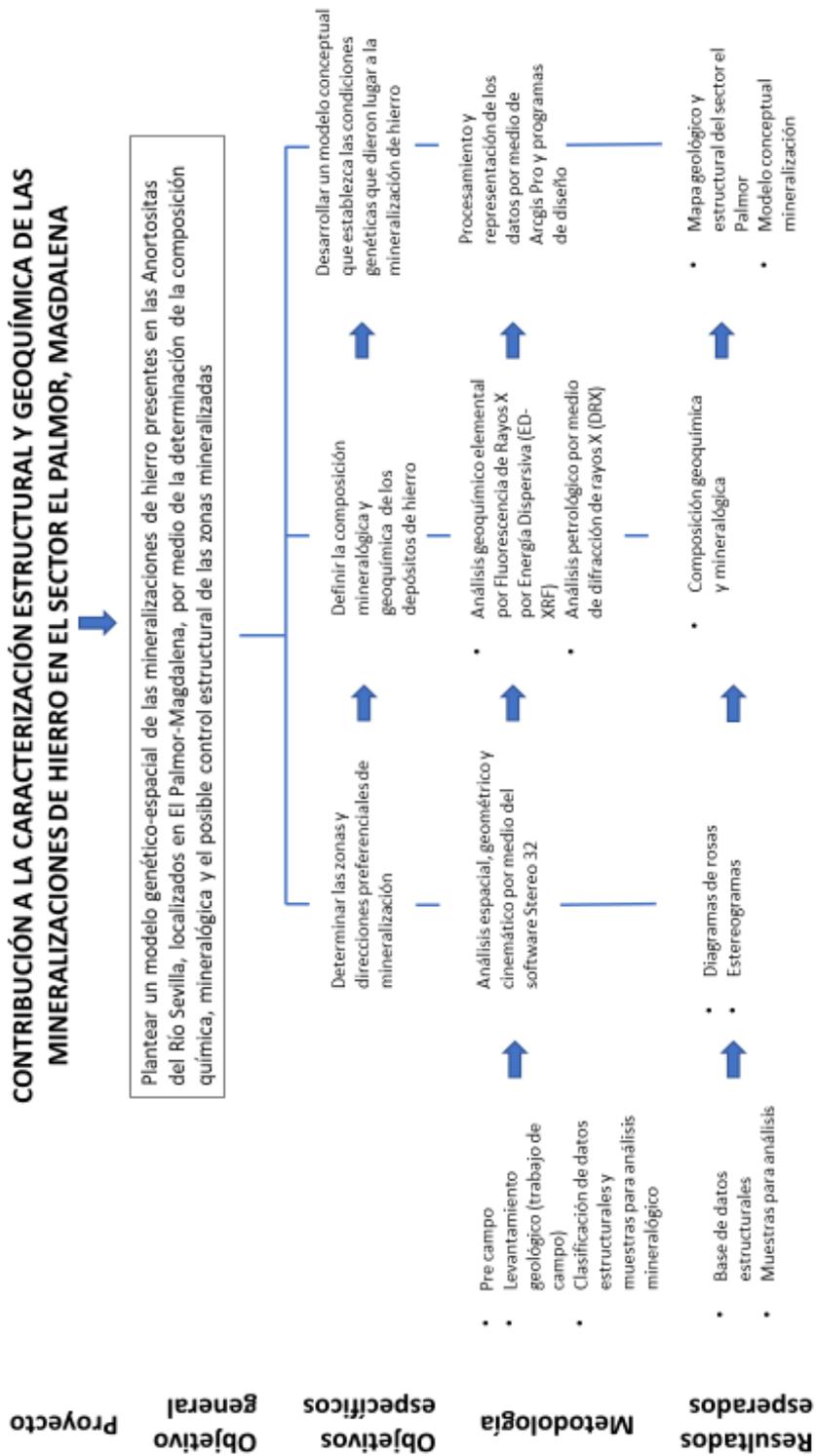


Figura 12. Modelo conceptual del proyecto.

## 4. Resultados

### 4.1 Geología local

La zona de estudio se encuentra compuesta en un 70 % por las rocas pertenecientes a la unidad Anortositas del rio Sevilla (PErs) (Ver figura 13), la cual se conforma por anortositas, neises anortosíticos y en menor cantidad anfibolitas; El 30 % restante del área de estudio se compone de la unidad Granulita de los Mangos (PEm), que se constituye principalmente de neises, y por el Stock del Socorro (Js) compuesto de rocas granodioríticas

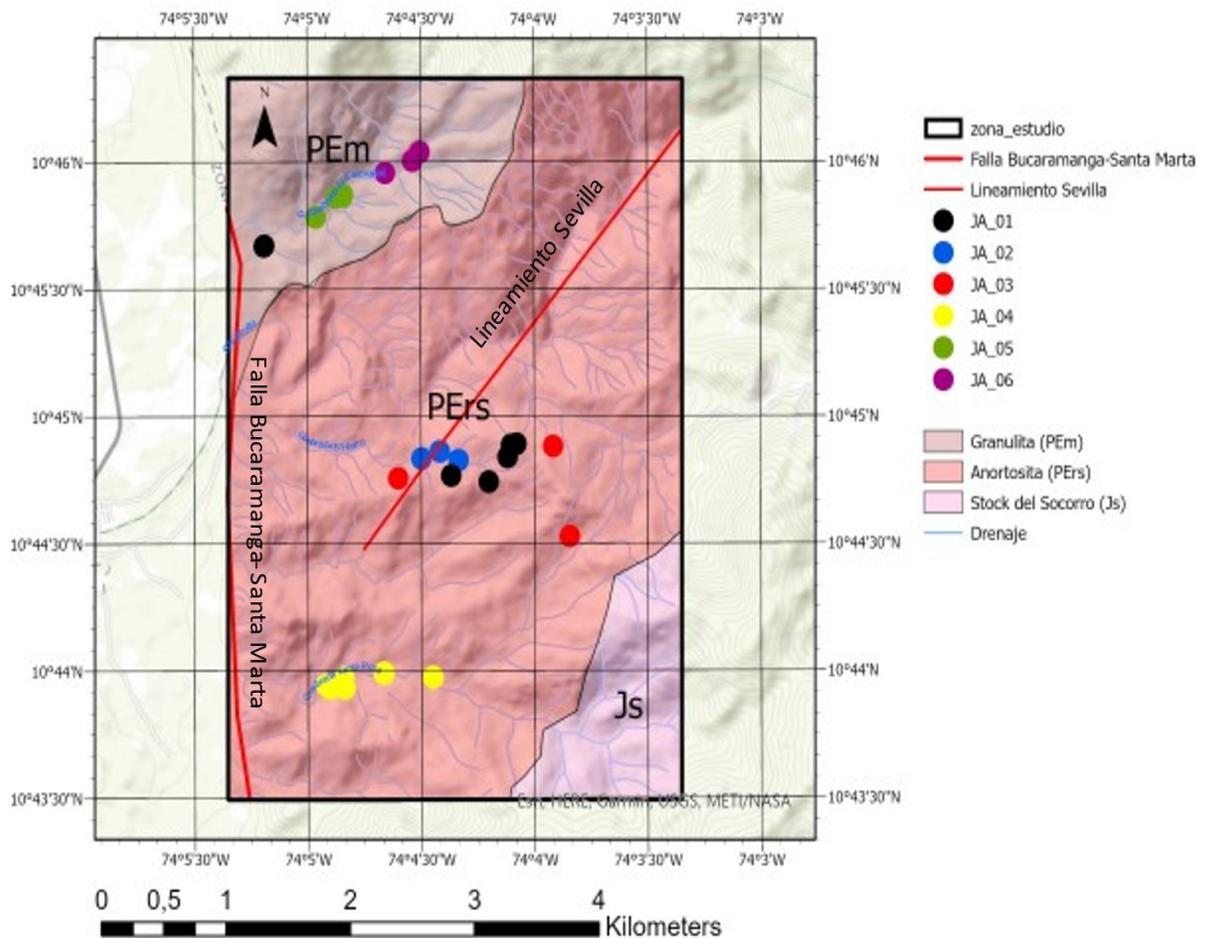


Figura 13. Mapa geológico local. El polígono negro representa la zona de estudio y los puntos las estaciones realizadas en campo en diferentes días.

#### 4.1.1. Granulita de los Mangos (PEm)

Esta unidad se encuentra distribuida hacia el sector noroeste de la zona de estudio, su mejor exposición se da lo largo de la quebrada Los cincuenta (Fig.13). Representada por rocas metamórficas bandeadas que varían de tonalidades grisáceo- verdosas a marrón - grisáceo.

Litológicamente, se describe como una secuencia de rocas en capas paralelas medias a gruesas con tendencia entre  $030^{\circ}$ - $268^{\circ}/60^{\circ}$ W, presentan una textura néisica compuesta por bandas claras y oscuras que varían su espesor entre 1 a 50 cm (Fig. 14 C y E). Las bandas melanocráticas se componen inicialmente por biotita y en una menor cantidad anfíboles, algunos cristales de biotita se encuentran oxidadas y presentan tonalidades naranja-rojizas; Las bandas leucocráticas se constituyen por cuarzo y plagioclasas.

La unidad localmente se encuentra cortada por diques máficos de tonalidad gris verdosa y textura afanítica, que mineralógicamente se constituyen por anfíboles y plagioclasa. Estas estructuras presentan una tendencia en rumbo entre N-NW con un buzamiento promedio de  $030^{\circ}$ W (Fig. 14 D y F). Por otra parte, también es posible distinguir plegamientos asimétricos que varían desde pocos centímetros hasta metros. Estas estructuras indican el posible metamorfismo regional al cual pudieron estar sometidas estas rocas (Fig.14 B)

Cortes (2013) por medio de un análisis petrológico determinó su composición por cuarzo (30%), plagioclasa (31%), Biotita (10%), granate (8%), circón y esfena como accesorios y menores cantidades de minerales secundarios como clorita y calcita. A partir de la mineralogía anteriormente descrita la definió como una roca metamórfica en facies anfibolita de protolito pelítico.

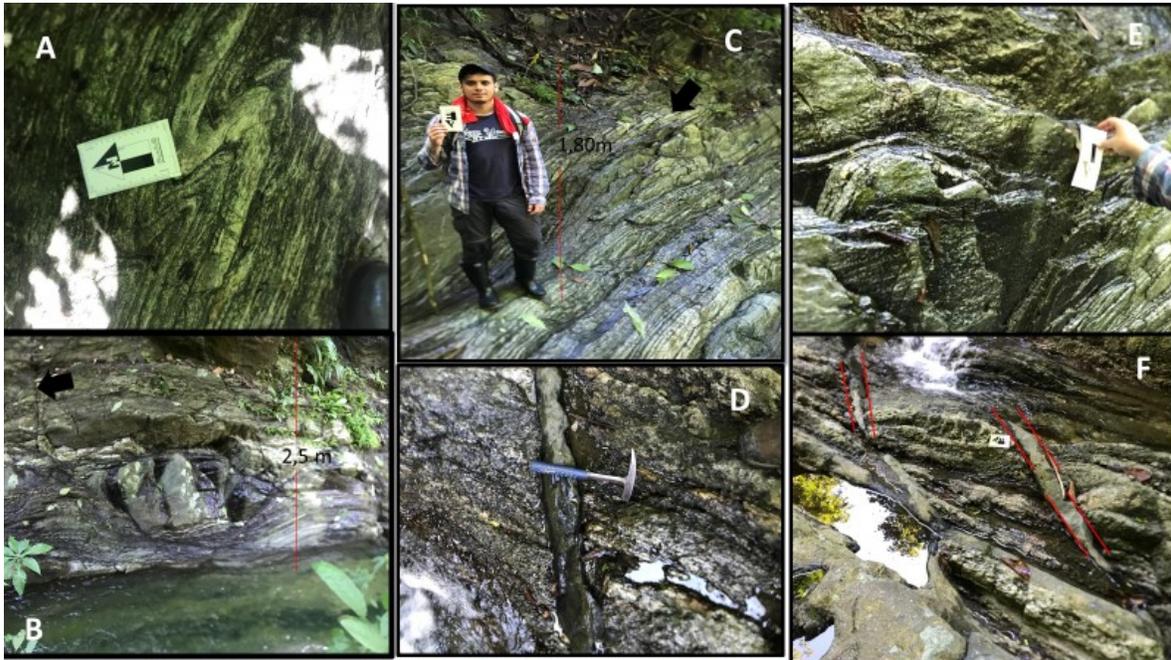


Figura 14. Granulita de los Mangos. A) Plegamientos en S que demuestran el metamorfismo regional de la zona; B) textura augen que indica a deformación dúctil de la zona; C) Estructura néisica de la roca; D Y F) Intrusiones locales de diques máficos; E) Foliación de la roca

#### 4.1.2 Anortositas de río Sevilla (PErs)

Esta unidad geológica abarca aproximadamente el 80% del área de estudio y se compone neises anortosíticos, anortositas y anfibolitas. Su mejor exposición se da sobre la carretera que conduce de San José de Kenedy a El Palmor y a lo largo de la quebrada Santa Rosa (Fig. 13).

##### 4.1.2.1. Anortositas

Se trata de paquetes de rocas ígneas que presentan tonalidades grises a blancas, que varían su espesor entre 30 cm a 1 m. Los mejores afloramientos de estas rocas se presentan en la quebrada Santa Rosa (Fig.13).

Litológicamente, se muestran como rocas plutónicas, faneríticas de grano medio, félsicas, leucocráticas; Su composición mineralógica se encuentra definida por plagioclasa en aproximadamente un 90% y minerales como cuarzo, mica y anfíboles en un 10%. En

ocasiones es posible distinguirlas en intercalación con cuerpos melanocráticos que varían su espesor entre 20 cm a 1 m de espesor (Fig. 15 B).

Localmente presentan algunas venas de cuarzo que se disponen  $286^{\circ}/54^{\circ}\text{NE}$

Cortes (2013), describe a estas rocas microscópicamente como holocristalinas, hipidiómorfas, constituidas mineralógicamente por plagioclasas (83%), anfíbol (15%), feldespato (1,3 %), cuarzo (0.6 %), circón y esfena como accesorios, y menores cantidades de minerales secundarios como, epidota clorita y calcita.

#### 4.1.2.2. Neises anortosíticos

Se constituyen por rocas metamórficas bandeadas de tonalidades blancas a grisáceas oscuras. Los afloramientos más representativos se dan a lo largo de la carretera que conduce el corregimiento de San José de Kenedy con El Palmor.

Litológicamente, se evidencia como una secuencia de rocas bandeadas, con presencia de bandas leucocráticas que varían entre 5 cm a 30 cm de espesor, compuestas esencialmente de plagioclasa y pequeñas trazas de cuarzo; Las bandas melanocráticas se presentan discontinuas en forma de augen y otras continuas con un grosor entre 2 y 15 cm. Estas se encuentran compuestas principalmente por anfíboles euhedrales con hábito tabular. Algunos se presentaban con tonalidad verdosa posiblemente por procesos de cloritización (Fig. 15 C y D).

Localmente estas secuencias se muestran altamente fracturados y fallados. Donde se lograron distinguir fallas de componente inverso y de rumbo, además algunos afloramientos presentaban venas de cuarzo que se disponían  $285^{\circ}/47^{\circ}\text{SE}$

#### 4.1.2.3. Anfibolitas

Se compone de rocas máficas que varían de tonalidad negras a negras verdosas. Estas se disponen en intercalación con cuerpos anortosíticos y neises anortosíticos. La zona de mejor representación de estas rocas se encuentra a lo largo de la quebrada Santa Rosa (Fig.13).

Litológicamente, se presenta en paquetes de rocas masivas con espesores entre 40 cm a 2 m, de grano medio a grueso y en ciertas ocasiones es posible distinguir estructura esquistosa. Mineralógicamente estas rocas se encuentran compuestas por más del 70% de anfíbol, plagioclasas, cuarzo, biotita. En general, las rocas masivas y esquistosas presentan una orientación de sus cristales y ciertos fragmentos de tonalidad verde por posible cloritización de los anfíboles (Fig.15 A).

Aguas debajo de la quebrada Santa Rosa es posible distinguir esta secuencia de rocas con un alto diaclasamiento, fracturamiento y cizallamiento.

Cortes (2013), las describe petrológicamente como una secuencia de rocas porfiroblásticas, inequigranulares con estructura definida por orientación subparalela de hornblenda y textura heteroblástica. Mineralógicamente la roca se compone por hornblenda (44%), plagioclasa (30%), clorita (19%) y epidota (5%), en menor proporción se encuentra cuarzo (1%) y trazas de esfena



Figura 15. Rocas anortosíticas, neises anortosíticos y anfibolitas A) Cuerpos anfibólicos bandeados en intercalación con anortositas, el espesor varía entre 30 y 60 cm; B) cuerpos anortosíticos con alto densidad de fracturamiento; C) Contacto entre cuerpos anortosíticos y neises anortosíticos, los espesores variaban entre 40 cm y 10 cm; D)

Neises anortosíticos con bandeamiento discontinuo y continuo, es posible distinguir una textura augen de los minerales máficos y mayor contenido de minerales leucocráticos.

#### 4.1.3. Stock del Socorro

Los cuerpos ígneos granodioríticos de la unidad del Stock El Socorro se encuentran al margen SE de la zona de estudio. Durante las estaciones realizadas en campo no fue posible identificar un afloramiento in situ de la roca. Sin embargo, hacia la zona de la quebrada Santa Rosa se encontraron algunos depósitos de vertiente de origen ígneo con características similares a los de la unidad (Fig.13).

Los bloques presentaban dimensiones entre 0,7 a 1 m de diámetro, mostraban formas angulosas y tonalidades blancas grisáceas (Fig. 16 B y D).

Litológicamente, se evidencian como cuerpos ígneos de composición félsica, cristalinos, faneríticos y equigranulares. Composicionalmente se constituyen por cristales de cuarzo con aproximadamente 0,5 cm de diámetro, plagioclasas y en poca cantidad biotitas con tonalidades rojizas por posibles oxidaciones (Fig.16 A).



Figura 16. Stock del Socorro. A) Bloque rodado, donde se pueden distinguir los cristales equigranulares de cuarzo de aproximadamente 0,5 cm de diámetro; B) Depósitos de

vertiente con bloques angulosos de diferentes dimensiones; C y D) Bloques de aproximadamente 1 m y 50 cm de diámetro.

#### **4.2. Geología de la mineralización**

Las mineralizaciones de hierro presentes en la zona de estudio se pueden clasificar en depósitos de placer (aluviales) y vetiformes. Siendo los primeros los que más destacables en dimensión y frecuencia (Fig. 17).

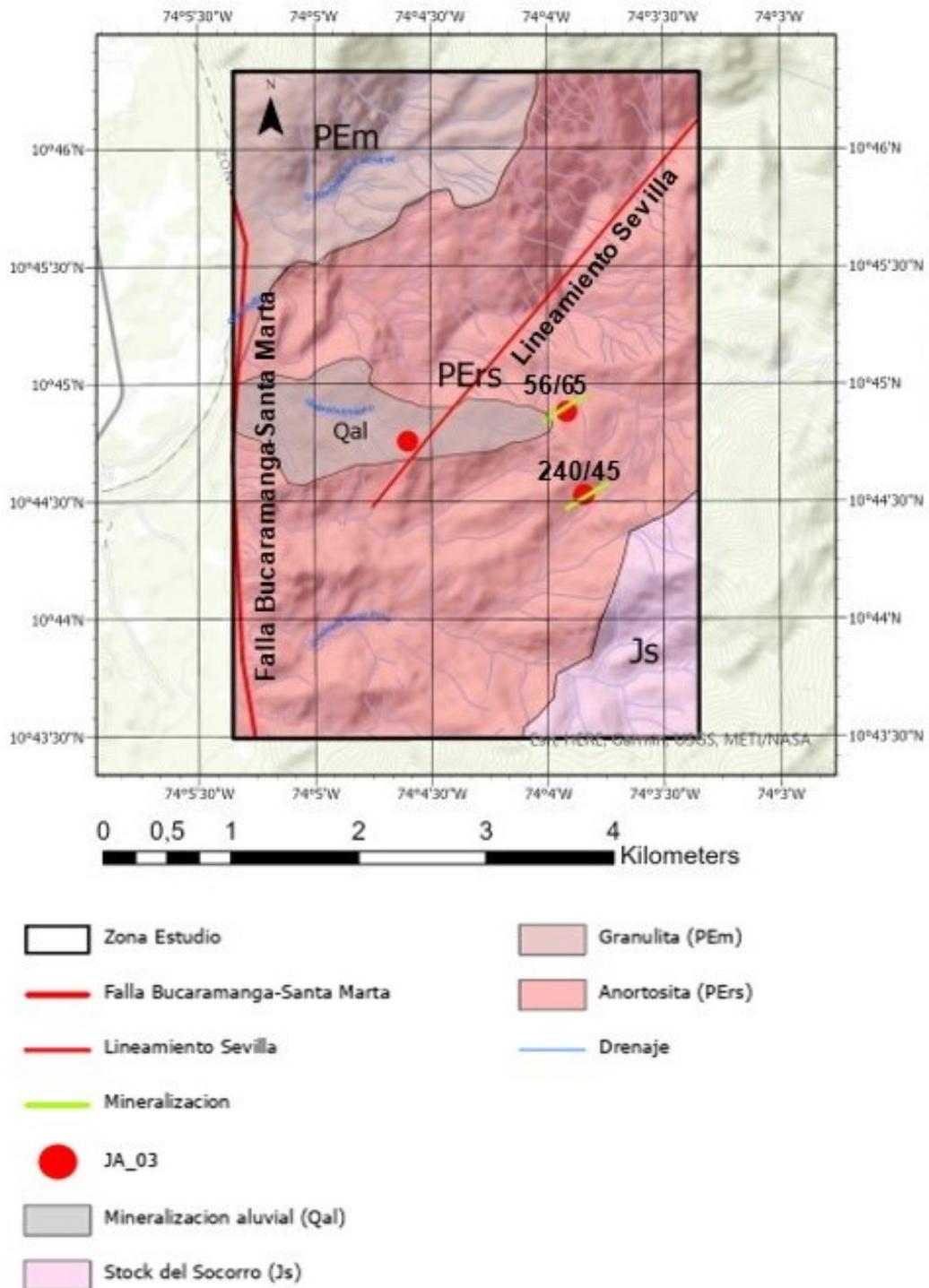


Figura 17. Mapa de mineralizaciones. Los puntos rojos con línea verde representan la dirección de rumbo de la veta mineralizada y la estación donde se encontró, el polígono gris indica el área en cual es posible encontrar depósitos aluviales de óxidos de hierro.

#### 4.2.1. Depósitos Aluviales:

La mejor exposición se puede evidenciar a lo largo del cauce de la quebrada El hierro, aunque también es posible encontrar algunos bloques rodados de menor dimensión sobre la carretera San José de kenedy - El Palmor (Fig. 17).

Consiste en bloques aluviales de tonalidades negras a rojizas, que varían sus dimensiones entre 5 a 100 cm de diámetro y se presentan sub redondeados a angulosos. Los bloques que presentan tonalidades rojizas pueden ser asociados a procesos de meteorización (Fig.18).

Los depósitos de bloques de minerales de hierro presentan tonalidades negras a marrones, con cristales que varían entre 1 a 3 cm, brillo metálico, magnetismo leve, alta densidad y habito cubico u octaédrico.



Figura 18. Depósitos aluviales de óxidos de hierro. A) Bloques angulosos de óxidos de hierro con dimensiones entre 50 a 80 cm de diámetro; B) Hábito cubico; C) Textura que presentaban algunos de los bloques; D) Depósitos aluviales de óxidos de hierro de diversas dimensiones a lo largo del lecho de la quebrada El Hierro.

#### 4.2.2. Depósitos vetiformes

Se encontraron depósitos discordantes vetiformes hacia las laderas de la quebrada el Hierro aguas arriba (Fig. 17).

Consiste en vetas discontinuas e irregulares que variaban su espesor entre 2 m hasta 30 cm. La mayoría de estas se compone por óxidos de hierro que varían su tonalidad de marrón a negro grisáceo (Tabla. 1).

Las muestras macro presentan tonalidades marrones a negras, con cristales de aproximadamente 1 cm, brillo metálico, magnetismo leve, alta densidad y habito cubico u octaédrico (Fig. 19).



Figura 19. Depósitos vetiformes. A) cuerpo vetiforme de aproximadamente 1 m de altura y 45 cm de ancho. Las flechas indican la dirección de la veta; B) cuerpo vetiforme irregular y discontinuo de aproximadamente 15 cm de espesor, se localiza al margen derecho de la quebrada El hierro aguas abajo; C) Contacto entre la roca encanjante (neises anortosíticos) y mineralización de hierro. A la derecha de la foto y la mineralización de hierro al costado izquierdo

<b>Veta mineralizada</b>	<b>coordenadas</b>	<b>Descripción</b>
<b>Estación #9</b>	<b>74,0640560°W 10,7421070°N</b>	Consta de un bloque macizo de óxidos de hierro con tonalidades negras marrones, su dimensión es entre 1m de alto y 45 cm de ancho (Fig.19 A). Se dispone discordante a los neises anortosíticos en dirección y rumbo 240/45 NW. Esta veta se encuentra localizada en la estación hacia la parte alta de la quebrada El Hierro (Fig. 17).
<b>Estación #10</b>	<b>74,0652900°W 10,7480440°N</b>	Se constituye por fragmentos de óxidos de marrones, fracturados y angulosos de 3 a 10 cm de diámetro, que se disponen de manera discordante a los neises anortosíticos en dirección y buzamiento 56/65 (Fig.19 B). Esta mineralización se encuentra sobre la quebrada El Hierro en la estación (Fig. 17)

*Tabla 1. Descripción de vetas mineralizadas.*

#### **4.3. Difracción de rayos X (XRD):**

Con el fin de definir la composición mineralógica de los depósitos de hierro en el sector El Palmor, se optó por realizar un análisis de difracción de rayos X, llevado a cabo por el laboratorio Inclay geology, en la ciudad de Bogotá; para este ensayo se seleccionó la muestra #2 perteneciente a la veta de la estación #9

Los valores del análisis permiten determinar la estructura cristalina de las asociaciones minerales pertenecientes a la muestra, mediante el cual se obtuvo el siguiente difractograma (Fig. 20)

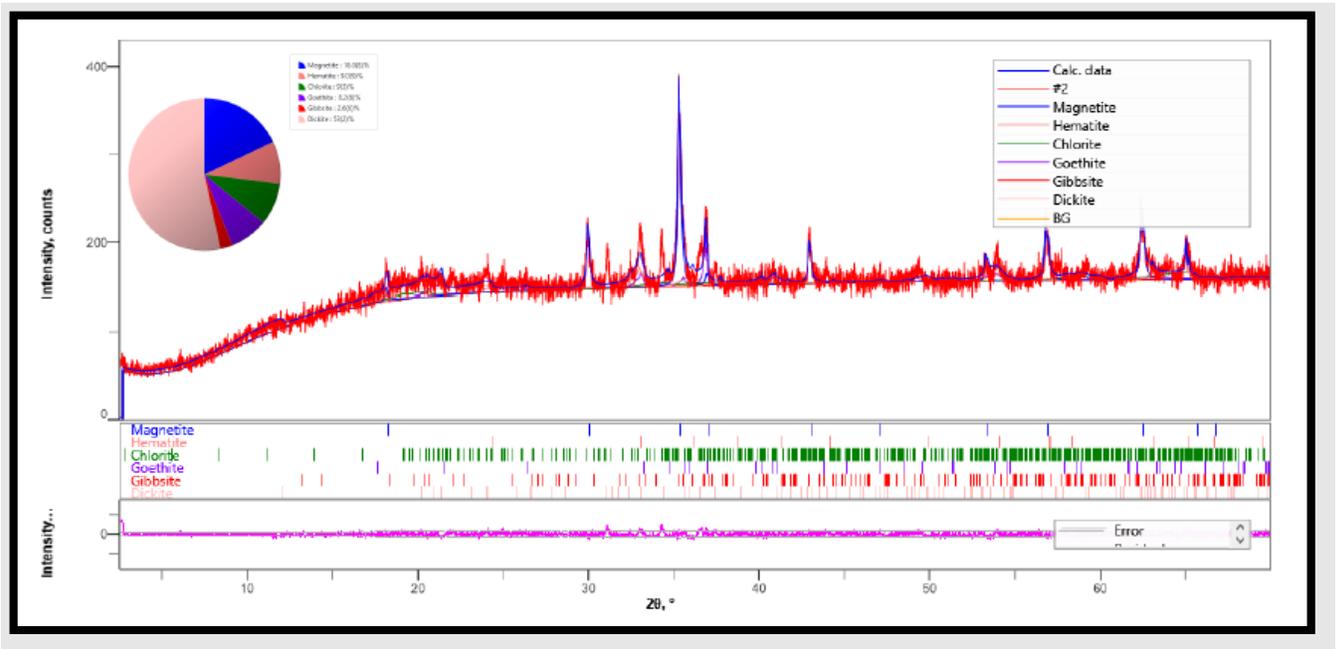


Figura 20. Difractograma muestra #2.

A partir del difractograma se pueden diferenciar seis picos de estructuras cristalinas pertenecientes a Magnetita, Hematita, Clorita, Goethita, Gibsita, y Dickita.

Es posible identificar anomalías de alta intensidad hacia el centro y el costado derecho de la figura 20. Estas anomalías obedecen al efecto de fluorescencia por hierro causada por el alto contenido de este elemento en fases cristalinas como la magnetita.

Por medio del análisis de difracción de rayos X se logró definir el contenido de fases cristalinas presentes en la muestra #2, donde se logró identificar un grupo mineral de filosilicatos compuesto por caolinita/dickita (53%) y clorita (9%), además se pudo determinar minerales adicionales como magnetita (18%), hematita (9%), goethita (8.2%) y gibsita (2.6%) (Tabla. 2).

Barcode	PHYLLOSILICATES (CLAY GROUP MINERALS)		ADDITIONAL MINERALS			
Number	Chlorite	Kaolinite/Dickite	Magnetite	Hematite	Gibbsite	Goethite
#2	9	53	18	9	2.6	8.2
TOTAL						
PHYLLOSILICATES	ADDITIONAL					
62	37.8					

Tabla 2. Resultados composición mineralogía por difracción de rayos X (XRD).

#### 4.4. Fluorescencia de rayos X:

Con el objetivo de establecer la concentración de óxidos mayores y elementos menores se realizó un análisis por fluorescencia de rayos X, este estudio fue llevado a cabo llevado a cabo por el laboratorio Inclay geology, en la ciudad de Bogotá, para este ensayo se seleccionaron cuatro muestras, dos pertenecientes a cuerpos vetiformes de la estación #9, estación #5 y dos pertenecientes a depósitos aluviales de hierro encontrados a lo largo de la quebrada El Hierro.

En los óxidos mayores se puede distinguir una alta concentración de  $Al_2O_3$  (26.6-22.5%),  $Fe_2O_3$  (17.4-16%) y medianamente alto para  $TiO_2$  (1.8-1.5%). Mientras que para el  $SiO_2$  (2.9-2.5%),  $CaO$ , (1.8-1.4%),  $MgO$  (1.8-0%),  $SO_3$ (0.5),  $MnO$ (0.2%) se puede observar una baja concentración y para el  $K_2O$  valores nulos (Tabla.3).

Para los elementos menores Ni, y Zn se identificaron altas concentraciones en ppm en comparación con Nb, Cr, Zr, As, Y, Cd los cuales presentan valores bajos de concentración (Ver tabla 3).

General Info				INCLAY ED-XRF Analysis								
ENERGIES	kV	µA	Time - sec	COMPANY	Juan Camilo Castro							
MAJOR	15	55	30	DATE	Abril 05 2021							
TRACE	40	5	30	MODE	GeoQuant Dual FP							
EQUIPMENT	Bruker Tracer GeoQuant - IV											
CONCENTRATION %												
File #	ID	Field1	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO3	K2O	CaO	TiO2	MnO	Fe2O3
170	#1		1.8	26.5	2.9	0.1	0.5	0.0	1.8	1.6	0.2	16.0
171	#2		0.0	22.3	1.3	0.1	0.5	0.0	1.6	1.8	0.2	17.2
172	#3		0.0	20.4	1.6	0.1	0.5	0.0	1.6	1.7	0.2	17.4
173	#4		0.0	22.5	2.5	0.1	0.5	0.0	1.4	1.5	0.2	16.9
ppm												
File #	ID	Field1	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
170	#1		0.0	300.0	61.0	781.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0
171	#2		0.0	297.0	40.0	692.0	0.0	3.0	1.0	0.0	0.0	0.0
172	#3		0.0	332.0	37.0	640.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0
173	#4		0.0	326.0	39.0	950.0	0.0	5.0	5.0	0.0	1.0	2.0
ppm												Balance
File #	ID	Field1	Mo	Cd	Ba	Ce	W	Pb	Th	U		
170	#1		8.0	0.0	677.0	2030.0	0.0	0.0	11.0	11.0	48.2	
171	#2		9.0	0.0	0.0	2200.0	0.0	312.0	3.0	0.0	54.5	
172	#3		10.0	0.0	0.0	2100.0	2080.0	0.0	0.0	3.0	56.1	
173	#4		8.0	0.0	0.0	1900.0	0.0	0.0	0.0	2.0	54.1	

Tabla 3. Resultados de la composición de óxidos mayores y elementos menores por fluorescencia de rayos X

#### 4.5 Geología estructural:

Con el fin de definir la geología estructural del área de estudio y las tendencias de las mineralizaciones de hierro, se desarrolló un análisis especial de la zona. En este se tuvo en cuenta datos de dirección y buzamiento de fallas, diaclasas, diques y vetas mineralizadas.

Para el procesamiento de los datos se dividió el área de estudio en tres zonas homogéneas. La zona 1 (centro) y zona 2 (sur), pertenecientes a la Formación Anortositas del río Sevilla (PErS). Mientas que, la zona 3 (norte), hace parte de la formación Granulita de los Mangos (PEm). Esta distribución se realizó teniendo en cuenta la cartografía geológica realizada en campo.

##### 4.5.1. Diaclasas

En los planos de diaclasa medidos para la unidad geológica de las Anortositas del Río Sevilla (Pers) se pudo identificar seis familias de diaclasas, con las siguientes tendencias de rumbo: La primera familia con tendencia al S, la segunda familia en sentido NE, la

tercera familia hacia el NNW, la cuarta con dirección SE, la quinta familia dispuesta al NE y la sexta con tendencia al NW. (Fig. 21).

Para la unidad geológica Granulita de los Mangos (PEm), se logró diferenciar cinco familias de diaclasas en la zona de estudio, con las siguientes tendencias: La primera familia con tendencia al SE, la segunda familia en sentido E, la tercera familia hacia el N, la cuarta con dirección NW y la quinta familia dispuesta al SW (Fig. 21).

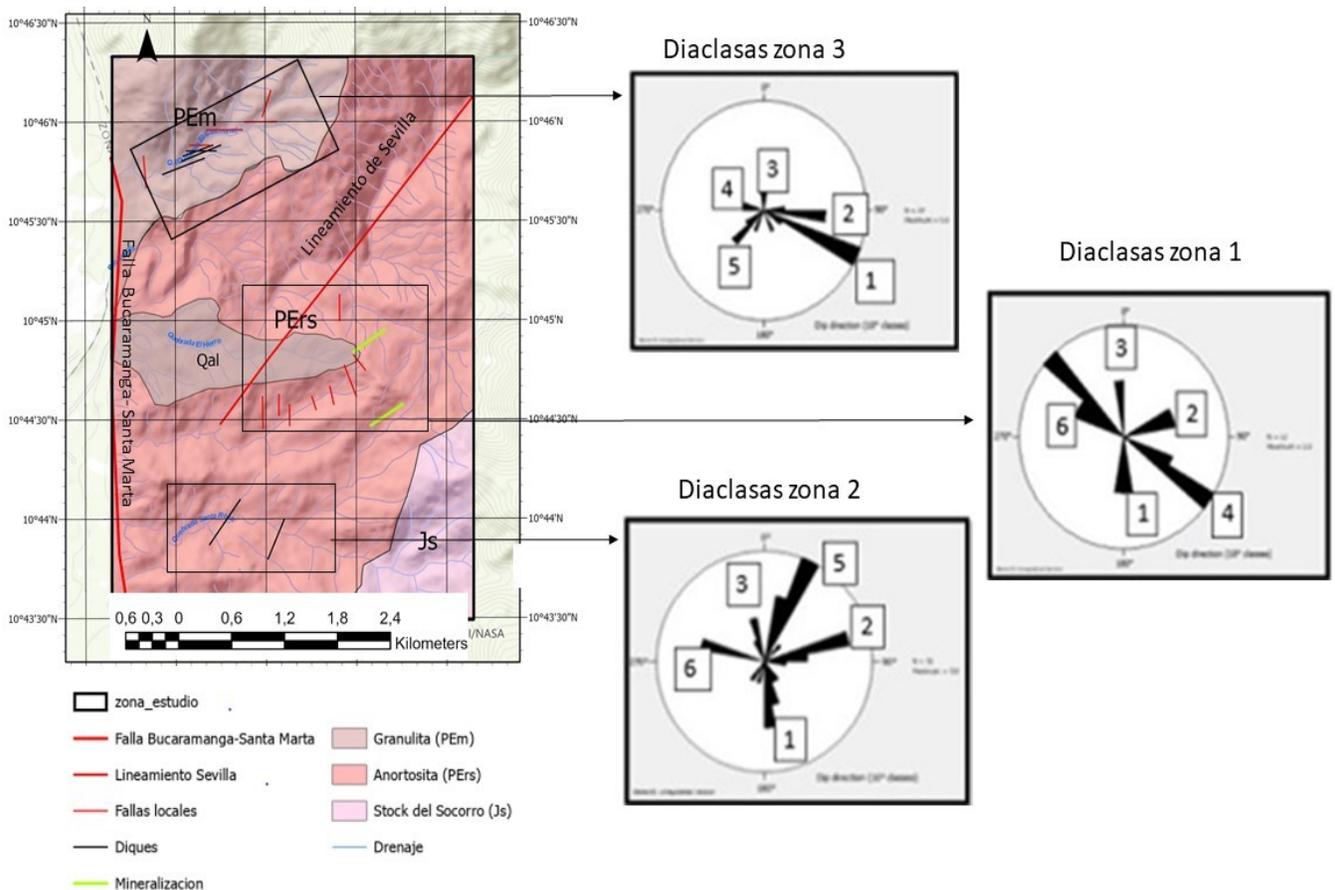


Figura 21. Mapa estructural y diagramas de rosas con los sistemas de diaclasas. Los números representan la cantidad de familias para cada unidad geológica.

#### 4.5.2. Diques

Durante el trabajo de campo se determinó la disposición de cuatro cuerpos ígneos de composición máfica presentes en la Granulita de los Mangos (PEm) en la zona 3, con dirección en rumbo promedio de  $255^{\circ}/54^{\circ}\text{NW}$  (Fig. 22).

En la zona dos, en el sector sur de la zona de estudio fue posible distinguir dos cuerpos tabulares de composición cuarzo-feldespática alojados en las Anortositas del río Sevilla (PErs) con dirección de rumbo hacia  $230^{\circ}-205^{\circ}/51-44^{\circ}\text{NW}$  (Fig. 22).

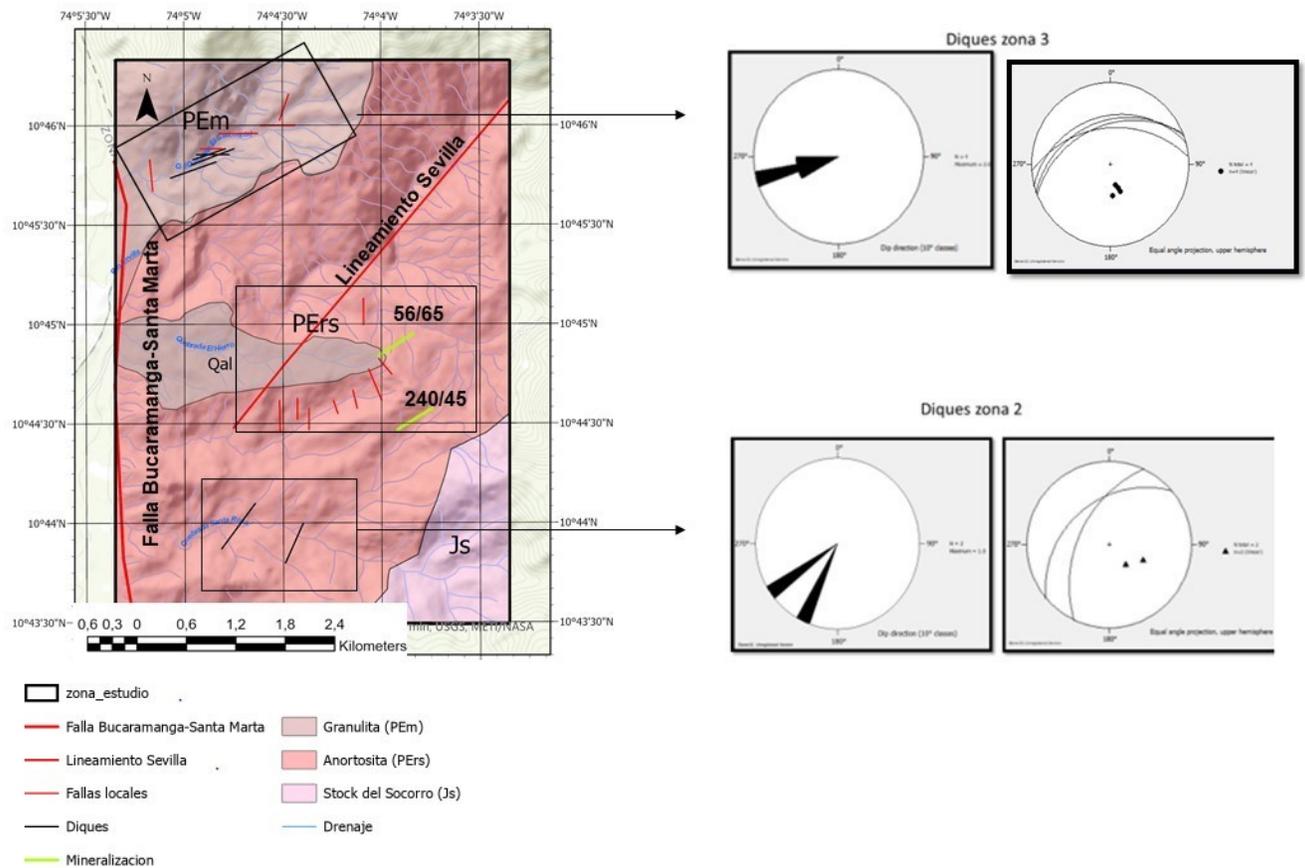


Figura 22. Mapa estructural, diagramas de rosas y estereogramas. Los diagramas señalan las direcciones de los diques. Mientras que, los de la derecha muestran el buzamiento. Las líneas de color negro en el mapa muestran la ubicación y dirección de los diques de la zona 1 y 2.

### 4.5.3. Fallas

Se identificaron planos fallados en la zona 1 perteneciente a las rocas Anortosíticas del río Sevilla (PErs) y en la zona 3 en las rocas de las Granulitas de los Mangos (PEm) (Fig. 23). Para definir su distribución espacial, se tomaron datos de dirección y buzamiento obteniendo los siguientes resultados:

Zona 1: direcciones de rumbo en sentido N-S y NW-SE con buzamiento en su mayoría hacia el E y en menor cantidad hacia el SW.

Zona 3: se identificaron planos de falla con direcciones de rumbo hacia el N, SW, W y NE con buzamientos hacia el S, SW y E (Fig. 23).

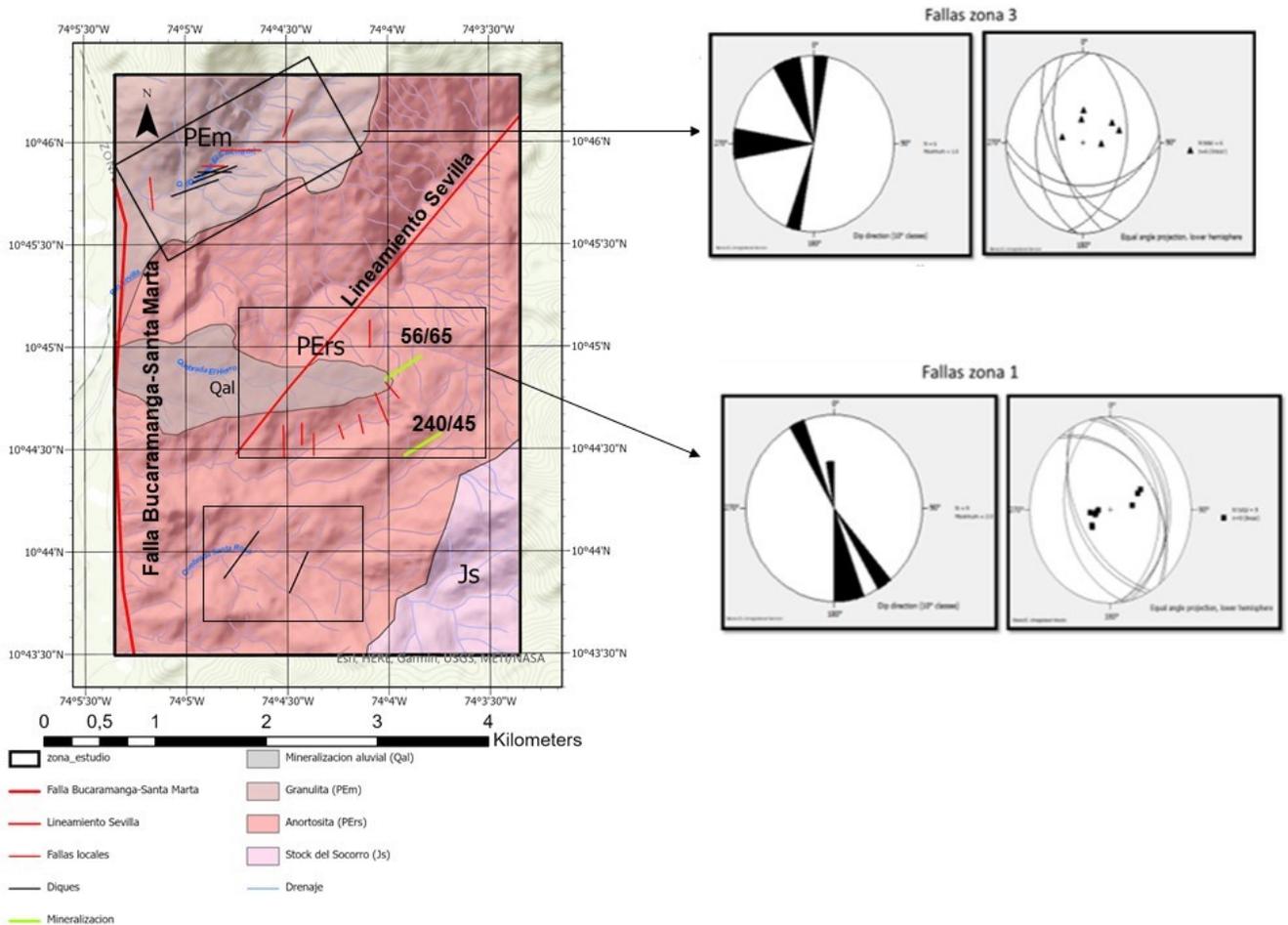


Figura 23. Mapa estructural, diagramas de rosas y estereogramas. Los diagramas a la izquierda señalan las direcciones de las fallas. Mientras que, los de la derecha

muestras el buzamiento. Las líneas de color rojo en el mapa muestran la ubicación y dirección de las fallas de la zona 1 y 3.

#### 4.5.4. Vetas mineralizadas

Los planos mineralizados fueron encontrados únicamente en la zona 1 perteneciente a las rocas anortosíticas del río Sevilla (PErs), donde se identificaron dos estructuras mineralizadas. La primera con dirección de rumbo hacia  $56^\circ/45^\circ\text{SE}$ ; La segunda muestra una dirección  $240^\circ/65^\circ\text{NW}$ . Ambas mineralizaciones se disponían discordantes a la dirección de foliación ( $159^\circ/17^\circ\text{SE}$ ) de la roca (Fig. 24).

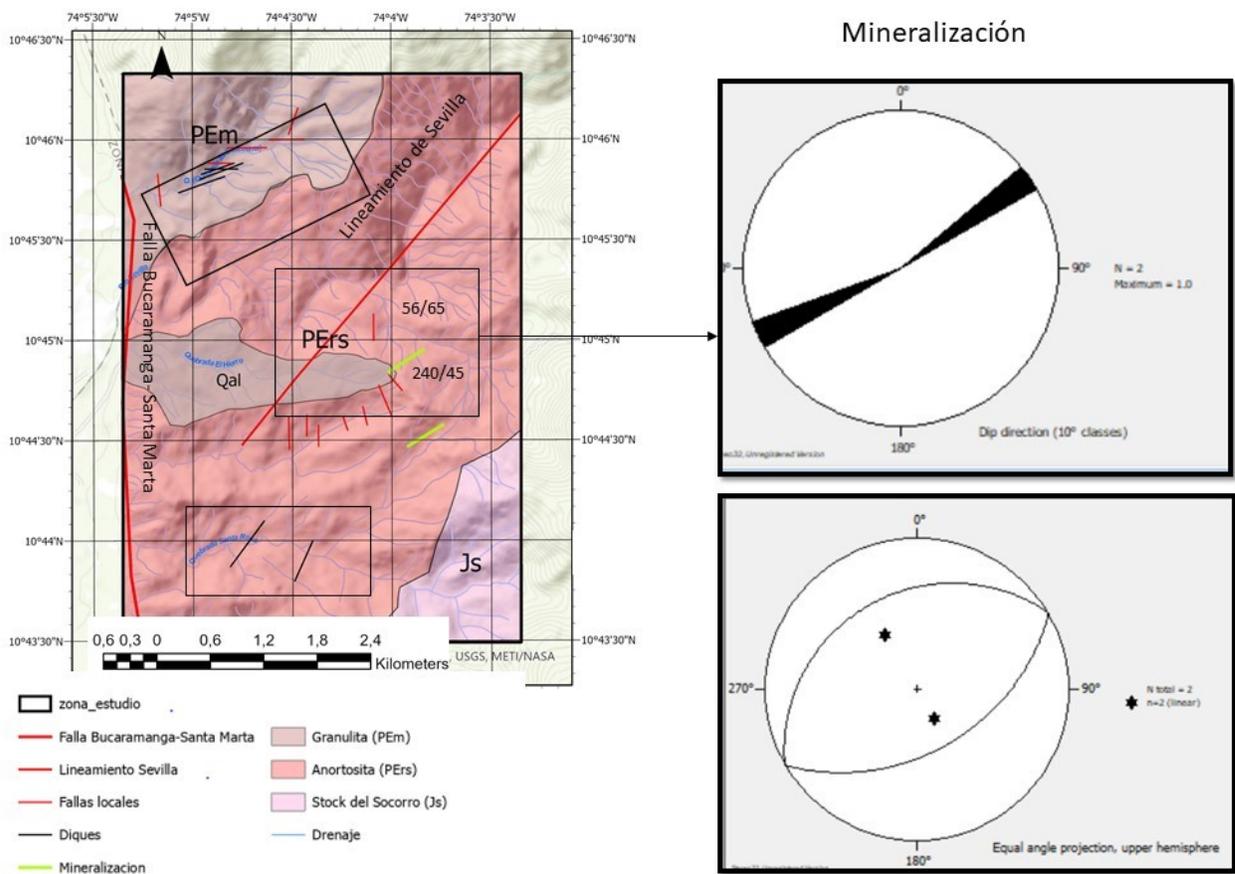


Figura 24. Mapa estructural, diagrama de rosas y estereograma. El diagrama en la parte superior señala las direcciones de las vetas mineralizadas. Mientras que, el de la parte inferior muestra el buzamiento. Las líneas de color verde en el mapa muestran la ubicación y dirección de las vetas presentes en la zona 1.

#### **4.6. Modelo conceptual génesis depósitos óxidos de Fe**

De acuerdo con la hipótesis planteada por Cortes (2013), sobre la clasificación de las anortositas del río Sevilla como cuerpos anortosíticos de tipo masivo. Se parte del modelo genético propuesto por Ashwal (1993), quien propone que estas rocas se formaron por el emplazamiento de un magma máfico en la base de la corteza continental. Durante este emplazamiento las fases máficas comienzan a acumularse en la base de la cámara magmática mientras se funde y asimila parte de la corteza continental, promoviendo así la cristalización de la plagioclasa cálcica (Fig. 25 A), las cuales debido a su baja densidad ascienden y se acumulan en el tope de la cámara magmática (Fig. 25 B). Posteriormente con la cristalización de plagioclasas y minerales ferromagnesianos el magma residual comienza a enriquecerse en óxidos de hierro y titanio, los cuales se presentan como una fase inmisible dentro del magma. La continua cristalización de plagioclasas causa que las masas acumuladas en el tope asciendan en formas de diapiros debido a su baja densidad, comenzando su etapa de emplazamiento como anortositas masivas (Fig. 25 C y D). Durante su asenso los cuerpos continúan cristalizando, resultando una malla cristalina de minerales silicatados en contacto líquido intersticial enriquecido en óxidos de Fe y Ti (Fig. 25 E), el cual durante las últimas fases de cristalización es acumulado por el fenómeno de filter pressing propuesto por Bateman (1951). La presión aplicada por el peso de los cristales superpuestos o por fuerzas externas (tectónica) puede forzar al líquido a migrar fuera de la malla de cristalina, así las gotas de óxidos de Fe y Ti se juntan e inyectan en otras partes del cuerpo principal o incluso fuera de él, dando origen a los cuerpos discordantes masivos (Fig. 25 F).

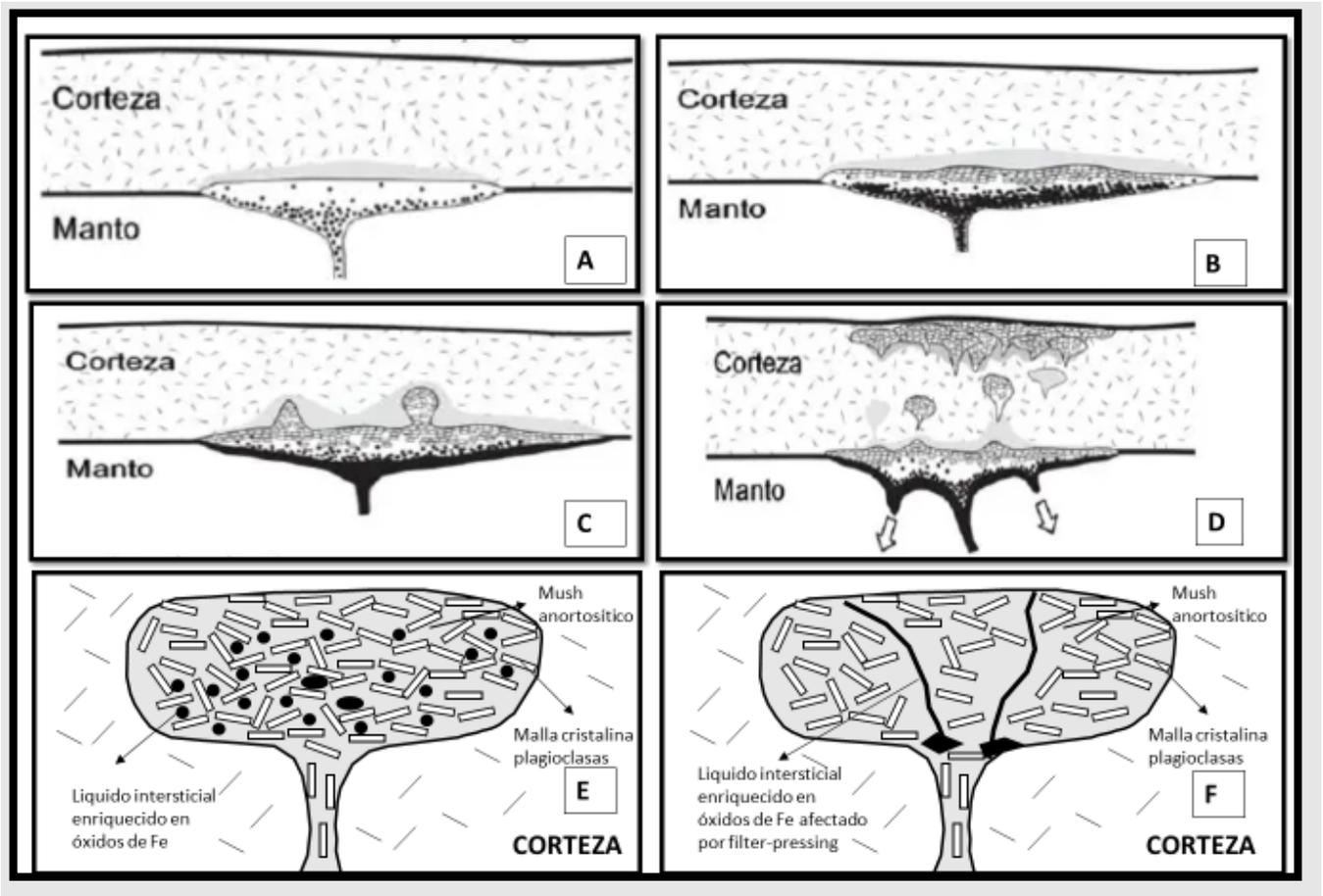


Figura 25. Modelo genético de los depósitos de hierro del sector El Palmor. Tomado y modificado de Ashwal (1993) y Chalier y Duchesne (2015).

## 5. Análisis de resultados

El análisis por DRX permitió corroborar la presencia de minerales de óxidos de hierro (Fig. 20), el espectro del DRX mostró la presencia de cantidades importantes de magnetita (18%) y de minerales secundarios con alto contenido de hierro generados a partir de la meteorización (oxidación). Este es el caso de la hematita (9%) y la goethita (8.2%) las cuales se favorecen por las condiciones climáticas (bosque seco tropical) presentes en la zona de estudio.

La presencia de minerales como la caolinita (53%) y la gibbsita (2.6) indican condiciones de acidez en el entorno que podrían asociarse a la presencia de fases minerales con

altos contenidos de óxidos, los cuales se encargan de la lixiviación parcial de la sílice, y subsecuente concentración de aluminio. El contenido de clorita (9%) puede ser atribuido igualmente a la meteorización de minerales ferromagnesianos.

Los resultados de los análisis de FRX muestran un contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en promedio de 17% para las cuatro muestras analizadas. Lo cual refleja una baja concentración de este elemento para poder ser catalogado como mena (Tabla. 4). Sin embargo, debido a la extensión que presentan los depósitos aluviales y a la fácil extracción de estos puede presentar un interés económico.

Concentración mínima de elementos metálicos para constituir yacimientos			
Elemento	Contenido promedio de la corteza	Ley promedio mínima explotable	Factor de concentración
Al	8%	30%	3,75
Fe	5%	25%	5
Cu	50 ppm	0,4%	80
Ni	70 ppm	0,5%	71
Zn	70 ppm	4,0%	571
Mn	900 ppm	35%	389
Sn	2 ppm	0,5%	2500
Cr	100 ppm	30%	3000
Pb	10 ppm	4,0%	4000
Au	4 ppb	1 g/t	250

Tabla 4. Concentración mínima de elementos metálicos para constituir yacimientos. La ley promedio hace referencia a la concentración mínima del elemento para ser explotable. (Ulloa, 2019)

Teniendo en cuenta el contexto tectónico, enmarcado por el margen de convergencia entre la placa del Caribe y el borde NW de Suramérica; los resultados petrológicos y geoquímicos presentados por Cortes (2013), donde se definen a las Anortositas del río Sevilla como cuerpos anortosíticos masivos; los conceptos teóricos propuestos por Ashwal (1983) para la generación de cuerpos anortosíticos masivos y los resultados estructurales, mineralógicos y geoquímicos obtenidos en el presente trabajo. Se propone que los cuerpos mineralizados de hierro del sector El Palmor, se generaron a partir de un

magma de composición básica, donde los feldespatos cálcicos y silicatos ferromagnesianos comienzan a cristalizar primero, de modo que el magma residual se va enriqueciendo gradualmente en óxidos de hierro y titanio. A medida que el magma cristaliza, se forma una malla de minerales silicatados que se encuentran en contacto con un líquido intersticial con alto contenido de óxidos de Fe y Ti (Ashwal, 1983).

Para la formación de depósitos discordantes como los presentes en la zona de estudio, es necesaria la acumulación de las gotas que se encuentran en los intersticios minerales, mediante el fenómeno de filter pressing, la presión aplicada por el peso de los cristales superpuestos o por fuerzas tectónicas externas puede forzar al líquido más móvil a migrar fuera de la malla de minerales silicatados, trasportándose a áreas de baja presión, donde puede inyectarse en otras partes del cuerpo principal o incluso fuera de él, dando origen así a los cuerpos discordantes masivos de magnetita (Bateman, 1951).

Comparamos los resultados de geoquímica del presente trabajo con depósitos similares a los de zona de estudio, como los descritos por Alfonso y González (1990) en el sector de Don Diego al norte de la SNSM (Tabla. 5). Se puede identificar que las mineralizaciones de El Palmor presentan una reducción en el contenido de elementos mayores como el Fe y Ti, además de un bajo contenido en elementos menores como el Mg, Nb, Cr y Zr. Este comportamiento según lo propuesto por Nerón (2012) para depósitos de óxido de Fe alojados en anortositas, se podría asociar con la cristalización temprana de Ilmenita, la cual podría generar líquido residual empobrecido en los elementos anteriormente mencionados. Para el área de estudio, teniendo en cuenta lo propuesto por Cortes (2013), donde sugiere una posible relación genética de las anortositas de Don Diego y el río Sevilla, es probable que las mineralizaciones de ilmenita al N de la SNSM hayan cristalizado primero enriqueciéndose en Fe, Ti y elementos menores

	%
TiO <sub>2</sub>	34,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	56,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,31
CaO	1,31
BaO	0,07
SrO	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06
MgO	1,20
MnO <sub>2</sub>	0,18
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01

Tabla 5. Contenidos de óxidos mayores mineralizaciones del sector Don Diego, tomado de Alfonso y González (1990).

El alto contenido de níquel en las muestras puede asociarse con proceso genético de los depósitos debido a la alta afinidad que presentan los elementos siderófilos con el hierro en las primeras fases de cristalización.

El levantamiento de datos estructurales y su respectivo análisis permitieron identificar una tendencia en el rumbo de las vetas mineralizadas hacia el NE, lo cual contrasta con la hipótesis planteada donde se hacía referencia a que la mineralización se podría encontrar controlada estructuralmente por la falla Bucaramanga-Santa Marta debido a su proximidad con la zona de estudio. Las direcciones de rumbo documentadas durante el trabajo de campo muestran tendencias subparalelas al lineamiento de Sevilla sugiriendo una posible relación de estas. Sin embargo, las edades propuestas por Ashwal (1993) para cuerpos anortosíticos de tipo masivo se restringen al proterozoico, mientras que el lineamiento de Sevilla aun no precisa una edad exacta, aunque Tschanz et al (1974) sugiere que esta estructura geológica podría ser la más antigua del sistema de fallas de la SNSM.

La falta de registros geocronológicos para la mineralización de óxidos de Fe, rocas anortosíticas del río Sevilla y del lineamiento de Sevilla impiden relacionarlas de manera precisa.

## 6. Conclusiones

- El análisis de difracción de rayos X (DRX) proporcionó información cualitativa y cuantitativa sobre la composición elemental, mediante el perfil de difracción y las fases cristalinas encontradas, determinando así que los constituyentes principales en las manifestaciones de hierro en sector de El Palmor son la, magnetita, hematita y goethita
- La fluorescencia de rayos X (FRX), mostró concentraciones de Fe de 17% reflejando un factor de empobrecimiento, dichas concentraciones definen a este depósito como de baja calidad. Sin embargo, la extensión de los depósitos aluviales de óxidos de hierro en la quebrada El Hierro y su fácil extracción, podría catalogarlo como un depósito de posible interés económico
- Las vetas de óxidos de hierro fueron encontradas en las Anortositas del rio Sevilla, con dirección preferencial NE-SW, lo cual indica una posible relación de estas estructuras con el lineamiento de Sevilla. Sin embargo, no existen evidencias geocronológicas que lo soporten.
- Las manifestaciones de hierro en el sector de El Palmor son asociadas a un origen magmático, causadas por el fraccionamiento in situ, de un magma máfico parental, encargado de generar líquidos inmiscibles enriquecidos en óxidos de hierro que pueden ser acumulados y movilizados por el fenómeno de filter pressing. Posteriormente por esfuerzos tectónicos estos pueden migrar a zonas de bajas presiones como el lineamiento Sevilla, generando depósitos discordantes como los presentes en el sector de El Palmor.

## 7. Recomendaciones

- Es importante realizar dataciones radiométricas a los cuerpos anortosíticos del río Sevilla y las mineralizaciones de óxidos de hierro, ya que permitirían establecer la relación geocronológica de los mismos, definir la posible relación con los depósitos de Ti y cuerpos anortosíticos del sector Don Diego al norte de SNSM y poder esclarecer la probable conexión genética de los depósitos y el lineamiento de Sevilla.
- Debido a las condiciones sociales que presenta el área de estudio no fue posible realizar una cartografía en zonas aledañas al corregimiento El Palmor, por lo cual se recomienda estudiar estos sectores con la finalidad de obtener una mayor información de mineralizaciones in situ.
- Sería de vital importancia desarrollar un estudio geofísico que permita entender la continuidad de las estructuras mineralizadas y su configuración en el subsuelo para una completa cartografía de las mismas.

## 8. Bibliografía

- Alfonso, R., González, L., 1990. Geología y evaluación económica de los prospectos de ilmenita, magnetita y apatito en el sector de Don Diego, Sierra Nevada de Santa Marta. Ingeominas. Bogotá, Colombia.
- Allègre, C., Poirier, J., Hulmer, E., Albrecht, W., 1995. The chemical composition of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters* 134 (1995) 515-526.
- Alvarado, L., Solano, F., 1995. Evaluación preliminar de las mineralizaciones entre los ríos Don Diego y Ancho, al norte de la Sierra Nevada de Santa Marta (departamentos de Magdalena y Guajira). Tesis de Grado. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia Ingeominas.
- Arias, A., Morales, C. J., 1999. Mapa geológico generalizado del Departamento del Cesar, memoria explicativa y mapa a escala 1: 250.000. Bogotá D.C.: INGEOMINAS
- Ashwal, L., 1993. Anorthosites. New York. Springer-Verlag. 108 fgs, 417 Pgs.
- Ashwal, L., Bybee, G., 2017. Crustal evolution and the temporality of anorthosites, *EarthScience Reviews*, 173, 307–330 p.
- Bateman, A., 1951. The formation of late magmatic oxide ores. *Economic Geology*, Vol.46, 404-426 p
- Boumans, P., 1989. Total reflection X-ray fluorescence spectrometry. Proc. of the Second Workshop on FRXT, Dortmund, 26-27 May, 1988. *Spectrochim. Acta*, 44B, 433.
- Campbell, C., 1965. Santa Wrench Fault of Colombia and its regional setting. *Inventario Minero Nacional Zona III - Bucaramanga*. 4 Caribbean Geol. Conf., Trinidad
- Cano, E., 2014. El método de Rietveld, Universitat Jaume. Segunda edición, LA Plana. Castelló, España
- Clout, J., Manuel, J., 2015. Mineralogical, chemical, and physical characteristics of iron ore. *ELSEVIER*, 66, 45-84
- Cortes, E., 2013. Análisis Petrogenético de las denominadas “Anortositas” aflorantes en la vertiente occidental de La Sierra Nevada de Santa Marta – Sector Rio Sevilla, El Palmor, (Colombia). Tesis de maestría en ciencias de la geología, Universidad nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Davis y Reynolds, 1996. *Structural geology of rocks and regions*. Wiley. 493 – 534 pp, Canada.
- González, L., 2000. Análisis financiero para mineralizaciones de ilmenita en la Sierra Nevada de Santa Marta. *Boletín Geológico*, 38(1-3), 1-8.

- Hernández, M., 2001. Geología de las planchas 11 Santa Marta y 18 Ciénaga Escala 1:100.000 Ingeominas. Bogotá, Colombia.
- Hunt, T., 1857. Report of progress for the years 1853, 1854, 1855, 1856. Geol. Surv. Can., Mere., 373 383.
- Néron, A., 2012. Caractérisation géochimiques des oxydes de Fe-Ti dans un dépôt de Fe-Ti-P associé à la suite anorthositique de Lac Saint Jean, Québec, Canada (secteur Lac à Paul) et intégration des données du secteur Lac à La Mine. Université du Québec à Chicoutimi, pp 39
- Owens, B., Dymek, R. 2016. Comparative petrology of the Montpelier and Roseland potassic anorthosites, Virginia, The Canadian Mineralogist, Vol. 54, 1563-1593 p
- Restrepo, P., Ruiz, J., Gehrels. G., Cosca. M., 1997. Geochronology and Nd isotopic data of Grenville-age rocks in the Colombian Andes: new constraints for Late Proterozoic-Early Paleozoic paleocontinental reconstructions of the Americas, Earth and Planetary Science Letters, Volume 150, Issues 3-4, August 1997, Pages 427-441
- Royero, G., Clavijo, J., 2001. Mapa geológico generalizado del Departamento de Santander. Escala 1: 400000. Memoria y mapa. Bogotá D.C. Ingeominas, 91 p.
- Rowland, S., Duebendorfer, E., Schiefelbein, I., 2009. Structural Analysis and Synthesis: a laboratory course in Structural Geology. John Wiley and Sons.
- Sibson, R., 1990. Faulting and fluid flow. In: Short Course on Fluids in Tectonically Active Regions of the Continental Crust (edited by Nesbitt, B. E.). Mineralogical Association of Canada Handbook 18, 93-13,
- Skinner, B.J., 1979. Earth resources. PNAS, 76, 412-417.
- Tschanz, C., Jimeno, A., Vesga, C., 1969. Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta Área (Colombia). Ministerio de Minas y Energía. Instituto de Investigaciones e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear. Ingeominas.
- Tschanz, C., M. Jimeno., Cruz, B., 1970. Recursos Minerales de la Sierra Nevada de Santa Marta. Boletín Geológico, Vol. XVIII, no. 1, 54 p., 3 Figuras, 3 mapas, 11 cuadros.
- Tschanz, C., Marvin, R., Cruz, J., Mehnert, H., Cebula, G., (1974): Geologic Evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. Geological Society of America Bulletin, V. 85, p. 273-284.
- UPME., 2018. Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035. CRU, Santiago de Chile
- Ulloa, C., 2019. Hierro. En: Recursos minerales de Colombia, vol. 2. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá, Colombia.

- Valvasori, A., Fonkwe, M., Piercey, S., Conliffe, J., (2015). Orthomagmatic Fe–Ti–V oxide mineralization hosted in Paleoproterozoic anorthosite in the Cape Caribou river allochthon, Grenville Province, southeast Labrador: Preliminary results, Geological Survey, Report 15(1), 125-138 p
- Wolf, D., 1980. La difracción de rayos x y su aplicación en la geología y el estudio de materias primas. El Ingeniero Geólogo, 6 – 9
- Zanetti, J., 2008. Sierra Grande, la mina de hierro subterránea más grande de Latinoamérica. SegemAR, San Martín – Buenos Aires