

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOQUÍMICO DE LAS ANORTOSITAS TITANÍFERAS DEL CERRO SAN QUINTÍN, YUMARE, ESTADO YARACUY, VENEZUELA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Guerrero S., Ernesto
Para optar al título
De Ingeniero Geólogo

Caracas, 2023

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOQUÍMICO DE LAS ANORTOSITAS TITANÍFERAS DEL CERRO SAN QUINTÍN, YUMARE, ESTADO YARACUY, VENEZUELA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Eduard Linares

COTUTOR ACADÉMICO: Ing. Prof. Jesús Monsalve

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Guerrero S., Ernesto
Para optar al título
De Ingeniero Geólogo

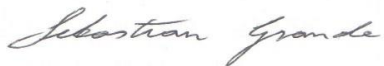
Caracas, 2023

Caracas, 29 de Mayo de 2023

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller Ernesto Guerrero Szymanska, titulado:

**“ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
ANORTOSITAS TITANÍFERAS DEL CERRO SAN QUINTÍN,
YUMARE, ESTADO YARACUY, VENEZUELA”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Geólogo, y sin que esto signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran **APROBADO**



Prof. Sebastián Grande
Jurado



Prof. Santiago Marrero
Jurado



Prof. Eduard Linares
Tutor Académico



Ing. Jesús Monsalve
Tutor Industrial

DEDICATORIA

A mis padres que siempre han creído en mí y me han apoyado a lo largo de todo este largo trayecto, sin ellos esto no hubiera sido posible.

A mis padrinos y mis amigos que me han impulsado a seguir y no me han dejado caer, siempre con sus ánimos y su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre Ricardo Guerrero, que siempre estuviste conmigo para guiarme y apoyarme cuando tenía ganas de abandonar, que siempre me impulsaste a seguir y que me indicaba el camino correcto a seguir, muchas gracias por haberme llevado a campo de niño y haberme inculcado el amor por la naturaleza y muchas gracias por todas las enseñanzas de vida y las grandes lecciones morales. Te amo papá.

A mi madre Bárbara Szymánska, siempre estuviste ahí en todo momento impulsándome a seguir y apoyando como podías, siempre detrás de mí para apoyarme cuando me caía y ayudándome a seguir cada día, que me has enseñado tantas cosas y que siempre me has llenado de amor cuando más lo necesitaba, jamás me cansaré de agradecerte tantas cosas. Te amo mamá.

A mi gran amigo y tutor Eduard Linares, que me has ayudado siempre y has estado conmigo en las buenas y en las malas y hasta el final, hasta esa tesis que se hizo eterna me has ayudado y por algo eres mi mejor amigo, muchas gracias.

A mis grandes y únicas Yelaine y Elaine Guerra, mis hermanitas de corazón, muchas gracias por siempre motivarme a seguir adelante y apoyarme con todo lo que podían, tantos años de amistad y se los agradezco de todo corazón.

A mis padrinos Giovanni y Nidia Yudice, son mis segundos padres y siempre han estado ahí para apoyarme y darme animos, les agradezco infinitamente tantos años de apoyo, felicidad y grandes momentos.

A los profesores de la Escuela de Geología, muchas gracias por sus enseñanzas y que siempre han estado dispuestos a enseñar aun cuando no fueran fáciles las circunstancias, sus conocimientos siempre perdurarán.

A todas aquellas personas que ya no están conmigo en el plano terrenal pero que siempre llevaré en el corazón, muchas gracias y siempre los recordaré.

GUERRERO S., ERNESTO

**ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
ANORTOSITAS TITANÍFERAS DEL CERRO SAN QUINTÍN,
YUMARE, ESTADO YARACUY, VENEZUELA**

Tutor académico: Eduard Linares

Cotutor: Jesús Monsalve

Tesis. Caracas. UCV. Facultad de Ingeniería

Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2023. 133 p.

Palabras claves: Anortositas, Titanio - depósitos, sensores remotos, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Modelado geológico - geoquímico - San Quintín – Yaracuy (Estado).

RESUMEN

El tema central de esta investigación consistió en realizar un trabajo de integración a partir de datos geológicos y geoquímicos tomados de varios estudios realizados en una zona ubicada al norte del estado Yaracuy, Venezuela. Para ello se trabajó con un conjunto de recopilaciones bibliográficas, siendo fundamental el trabajo realizado por Rodríguez y Añez en 1978, que sirvió de base para generar los modelos geológicos propuestos en esta investigación. En tal sentido, este trabajo de investigación fue realizado en tres etapas, siendo la primera de investigación y recopilación bibliográfica. La siguiente etapa consistió en el procesamiento de imágenes satelitales usando herramientas de interpretación satelital y herramientas de sistema de información geográficas, las cuales permitieron generar mapas de sombras, mapas de lineamientos estructurales y otros mapas. También, en esta etapa se trabajó con los datos de concentraciones químicas para ver cuáles eran las zonas de mayor interés. La última etapa de esta investigación fue el modelado e interpretación de los mismos. Para ello se partió de los datos de perforaciones del trabajo de Rodríguez y Añez (1978) y se crearon distintos tipos de modelos como las correlaciones laterales entre pozos, mapas de profundidades y modelados en 3D de la zona, con el fin de ubicar la zona con mayor potencial de acuerdo con lo obtenido en el subsuelo. Finalmente, se integraron todos los datos obtenidos, especialmente en geología y geoquímica para ubicar la zona con mayor potencial para su explotación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
I.2 JUSTIFICACIÓN	4
I.3 ALCANCES Y LIMITACIONES	4
I.4 OBJETIVO GENERAL	5
I.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
I.6 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	5
I.6.1 Vías de acceso	6
I.7 ANTECEDENTES	6
II. MARCO TEÓRICO	11
II.1 ANORTOSITAS	11
II.1.1 Clasificación de las anortositas	11
II.1.2 Plutones de anortosita	13
II.1.3 Composición de las anortositas	13
II.1.4 Suite anortosita-mangerita-charnockita-granito (AMCG)	14
II.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	17
II.3 DATOS DE PERCEPCIÓN REMOTA	19
II.4 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN	21
II.4.1 Kriging	22
II.4.2 Kriging simple	23
II.4.3 Kriging ordinario	23
II.4.4 Validación del Kriging	24
II.4.5 Kriging en Rockworks 16	25
II.5 LINEAMIENTOS ESTRUCTURALES	26
III. MARCO GEOLÓGICO	28
III.1 EVOLUCIÓN TECTÓNICA	29
III.1.1 Evolución de la Placa del Caribe	29
III.1.2 Evolución de la Placa Suramericana	32
III.1.3 Cuenca de Falcón	33

III.1.4 Orogénesis Grenvilliana en Venezuela	38
III.2 ESTRATIGRAFÍA	39
III.3 GEOLOGÍA REGIONAL	42
III.3.1 Complejo Yumare (Neoproterozóico)	42
III.3.2 Formación San Quintín (Cretácico Temprano).....	45
III.4 PETROLOGÍA DEL COMPLEJO SAN QUINTÍN	48
III.5 GEOFÍSICA	50
IV. MARCO METODOLÓGICO	58
IV.1 FASE I - RECOPIACIÓN DE DATOS	59
IV.2 FASE II - DIGITALIZACIÓN Y VALIDACIÓN	60
IV.2.1 Datos geológicos a partir de percepción remota	60
IV.2.2 Preparación e incorporación de data en el SIG y procesamiento digital de imágenes.....	62
IV.2.3 Preprocesamiento de imágenes de percepción remota con ENVI 5.3	62
IV.2.4 Procesamiento de imágenes usando QGIS 3.24	64
IV.2.4.1 Modelo Digital de Iluminación y Sombra o HillShade	66
IV.2.4.2 Dirección de los drenajes	67
IV.2.4.3 Capa de Pendientes de las laderas.....	70
IV.2.4.4 Lineamientos estructurales	71
IV.2.4.5 Geofísica.....	73
IV.2.4.6 Localización de las muestras	73
IV.2.4.7 Geoquímica	73
IV.3 FASE 3 - PROCESAMIENTO DE LOS PERFILES DE SONDEO Y REALIZACIÓN DE MODELOS.....	74
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	81
V.1 RECOPIACIÓN DE DATOS	81
V.2 COMBINACIÓN DE BANDAS USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL CON ENVI.....	81
IV.3 IMÁGENES OBTENIDAS LUEGO DEL PROCESAMIENTO DEL DEM EN QGIS	84
IV.3.1 Mapa de sombras o Hillshade	84
IV.3.2 Drenajes	87
IV.3.3 Mapa de pendientes	88

IV.3.4 Lineamientos estructurales	89
IV.4 GEOFÍSICA EN SAN QUINTÍN	95
IV.4.1 Análisis de los datos geofísicos	96
IV.5 LOCALIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ROCAS	97
IV.6 MINERALOGÍA DE LOZANO Y MUSSARI (2007) Y GRANDE (2014)	99
VI.7 GEOQUÍMICA	99
VI.7.1 Sodio	102
VI.7.2 Potasio.....	103
VI.7.3 Calcio	104
VI.7.4 Magnesio.....	106
VI.7.5 Silicio	107
VI.7.6 Hierro	108
VI.7.7 Titanio.....	109
VI.7.8 Análisis	110
IV.8. PERFILES Y MODELOS PROPUESTOS.....	110
IV.8.1. Perfiles de sondeos.....	110
IV.8.2 Modelos propuestos	118
IV.8.3 Análisis de los resultados de los datos de las perforaciones hechas por Rodríguez y Añez (1978).	123
VI.9 INTEGRACIÓN DE DATOS.....	123
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	127
VII.1 CONCLUSIONES	127
VII.2 RECOMENDACIONES.....	128
VIII. BIBLIOGRAFÍA	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Ubicación del área de estudio.....	6
Figura 2.- Elementos que forman el sistema SIG.....	18
Figura 3.- Mapa geológico del Complejo Yumare.....	28
Figura 4.- Esquema evolutivo de la región Caribe.....	31
Figura 5.- Reconstrucción geodinámica del límite suroeste de la placa Caribe durante el Paleoceno Eoceno temprano (60-50 Ma).	35
Figura 6.- Modelo de generación Grande (2012a) para Cuencas de Falcón oriental (Yaracuybare) y Falcón central.	36
Figura 7.- Modelo propuesto por Grande para explicar el emplazamiento de los xenolitos.	38
Figura 8.- Columna de las unidades estratigráficas de la cuenca de Falcón y de algunas zonas vecinas.....	41
Figura 9.- Mapa de concentraciones de TiO_2 , basado en las muestras recolectadas por Rodríguez y Añez (1978) y Rodríguez (2020).	48
Figura 10.- Mapa residual de Anomalía de Bouguer realizado por el método de continuación analítica del campo 10000 m hacia arriba.	51
Figura 11.- Mapa de ubicación en profundidad de las posibles fuentes gravimétricas obtenido por el método de deconvolución de Euler.	53
Figura 12.- Mapa residual de la Intensidad Magnética Total a una altura de 2000 m s.n.m. realizado por el método de continuación analítica del campo 10000 m hacia arriba.....	54
Figura 13.- Mapa de ubicación en profundidad de las posibles fuentes magnéticas obtenido por el método de deconvolución de Euler.	55
Figura 14.- Modelo geológico del perfil gravimétrico-magnético B-B'.	56
Figura 15.- Representación tridimensional de los valores de la segunda derivada vertical del campo magnético total (a partir de las curvas de isointensidades).	57
Figura 16.- Esquema metodológico	59
Figura 17.- Portal de la U.S Geological Survey o Servicio Geológico de Estados Unidos	61
Figura 18.- Portal del ASF Data Search.....	62
Figura 19.- Imagen Flaash de San Quintín usando las bandas 4-3-2.....	64
Figura 20.- Pantalla para la selección de datos para la eliminación de depresiones ..	65
Figura 21.- Creación de Hillshade con la opción sombreado combinado.....	66
Figura 22.- Creación de Flow Directions usando Fill sinks (Wang & Liu)	67

Figura 23. Direcciones de flujos.	68
Figura 24.- Creación de las flechas de dirección	68
Figura 25.- Parámetros para colocar en el campo de expresión	69
Figura 26.- Seleccionando la rotación de las flechas	70
Figura 27.- Procedimiento para crear la pendiente de la zona	71
Figura 28.- Base de datos con los datos de perforación	75
Figura 29.- Creación de la base de datos en el programa.....	75
Figura 30.- Procedimiento para la creación de los perfiles de las secciones	76
Figura 31.- Ubicación de la herramienta Fence Diagram	77
Figura 32.- Creación de secciones siguiendo el patrón de los perfiles con direcciones NW-SE.....	77
Figura 33.- Creación de un modelo	78
Figura 34.- Creación del mapa isópaco de anortosita	79
Figura 35.- Creación del mapa estructural en 3D.....	80
Figura 36.- Creación del mapa estructural en 2D.....	80
Figura 37.- Combinación de bandas en Landsat 8, R-G-B: 5-4-3.....	82
Figura 38.- Combinación de bandas en Landsat 8, R-G-B: 7-5-3.....	83
Figura 39.- Mapa de sombras con sombreado combinado.....	85
Figura 40.- Mapa de relieve de San Quintín.	86
Figura 41.- Drenajes y dirección de los mismos	88
Figura 42.- Pendientes observadas en el Cerro San Quintín partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).	89
Figura 43.- Lineamientos estructurales obtenidos a partir de un Mapa de Sombras. 90	
Figura 44.- Diagrama de rosa generado mediante la orientación de los lineamientos obtenidas.....	91
Figura 45.- Diagrama de Rosa a partir de las fallas registradas por Lozano y Mussari.	94
Figura 46.- Mapa residual de Anomalía de Bouguer, realizado por el método de continuación analítica del campo 10000 m hacia arriba, en combinación con el Hillshade.....	95
Figura 47.- Mapa residual de la Intensidad Magnética Total, a una altura de 2000 m s.n.m. realizado por el método de continuación analítica del campo 10000 m hacia arriba, combinado con el Hillshade	96
Figura 48.- Lugares donde se han tomado muestras de rocas en distintas campañas. 98	

Figura 49.- Diagramas de variación de Na ₂ O en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al ₂ O ₃	103
Figura 50.- Diagramas de variación de K ₂ O en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al ₂ O ₃	104
Figura 51.- Diagramas de variación de CaO en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al ₂ O ₃	105
Figura 52.- Diagramas de variación de MgO en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al ₂ O ₃	106
Figura 53.- Diagramas de variación de SiO ₂ en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al ₂ O ₃	107
Figura 54.- Diagramas de variación de Fe ₂ O ₃ en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al ₂ O ₃	108
Figura 55.- Diagramas de variación de TiO ₂ en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al ₂ O ₃	109
Figura 56.- Localización en plano de los sondeos realizados por Rodríguez y Añez (1978) y la dirección en la que se realizaron las correlaciones.	112
Figura 57.- Ubicación de los sondeos y las líneas que representan las variaciones laterales.....	114
Figura 58.- Línea de sondeo F que incluye las perforaciones 3, 4 y 5	115
Figura 59.- Línea de sondeo E1 que incluye las perforaciones 7, 8, 9 y 10.....	115
Figura 60.- Línea de sondeo E que incluye las perforaciones 11, 12, 13, 14, 15 y 16... ..	116
Figura 61.- Línea de sondeo O1 que incluye las perforaciones 17, 18, 19, 20 y 21	116
Figura 62.- Línea de sondeo O que incluye las perforaciones 22, 23, 24, 25 y 26 ..	117
Figura 63.- Línea de sondeo D1 que incluye las perforaciones 27, 28, 29 y 30	117
Figura 64.- Línea de sondeo D que incluye las perforaciones 31, 32 y 33	118
Figura 65.- Modelos basados en la sección proyectada	119
Figura 66.- Modelo mostrando las capas de Saprolito (verde), Anortosita (azul) y roca fresca (rojo)	120
Figura 67.- Mapa isópaco 3D de la capa de Anortosita con vistas desde los 4 puntos cardinales.....	121
Figura 68.- Mapa estructural en 3D de la capa de Anortositas.	121
Figura 69.- Mapa estructural en 2D de la capa de Anortositas.	122
Figura 70.- Mapa con las ubicaciones de las zonas con las concentraciones de titanio en la muestras de Rodríguez y Añez (1978)	125
Figura 71. Mapa con las ubicaciones de las perforaciones realizadas por Rodríguez y Añez (1978).	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de los distintos tipos de anortositas. Tomado y modificado de Ashwal (1988).....	12
Tabla 2: Composición química de las Anortositas Arqueanas de Bad Vermilion Lake Complex de Canadá. Tomado de Ashwal et al (1983).....	14
Tabla 3: composición química promedio de una suite AMCG.....	16
Tabla 4: Nomenclatura de las rocas charnockíticas	17
Tabla 5: Características de las rocas encontradas en el Cerro San Quintín. Tomado de Grande (2013)	49
Tabla 6.1: Concentraciones químicas de las muestras obtenidas por Rodríguez (1978)	100
Tabla 6.2: Concentraciones químicas de las muestras obtenidas por Rodríguez (1978)	101
Tabla 7: Espesores de las capas y concentración de TiO ₂ por capa	113

I. INTRODUCCIÓN

El titanio (Ti), es el noveno elemento más abundante en la corteza terrestre (aproximadamente 0.86% en peso) y el cuarto de los metales estructurales, después del aluminio, hierro y magnesio (Bolzoni, 2011). Es un metal duro y resistente a la corrosión, ya que soporta el ataque de ácidos inorgánicos, aunque reacciona rápidamente frente al oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y carbono (Gil Mur, 2001). Posee una alta conductividad, densidad de 4.51 g/cm^3 , es maleable y ligero, así como también presenta una buena resistencia específica y un elevado punto de fusión (1667°C). (Bolzoni, 2011). Se usa principalmente en la industria aeroespacial y en la industria química y petroquímica, pero también se utiliza su dióxido para crear pinturas, se usa en prótesis médicas, para crear equipos deportivos, y muchos usos más (Bolzoni, 2011).

En la naturaleza, el titanio es un elemento que no se encuentra libre, encontrándose presente en cerca de 45 minerales (Valderrama, 2008). Generalmente este elemento está asociado a rocas ígneas y es posible encontrarlo en minerales como la anatasa, la ilmenita, la brookita, el rutilo, la perovskita o la titanita (Pérez del Pino, 2003). Teóricamente, la ilmenita (FeTiO_3) contiene un máximo de 52.65 % de TiO_2 y el rutilo (TiO_2) 100 %. Otros minerales que contienen titanio, tales como la anatasa, el leucóxeno y la brookita, se asocian con la ilmenita y el rutilo para formar parte de los concentrados comerciales de titanio (Rodríguez, 1978).

Por otra parte, el titanio es encontrado igualmente en meteoritos y en rocas lunares, pero también en la corteza terrestre se encuentra combinado generalmente con oxígeno y hierro (Valderrama, 2008). Este elemento metálico también se puede extraer a partir de productos de meteorización, se puede encontrar en arenas negras, tanto en ríos como en playas, por lo que, el Ti se explota en la mayoría de los casos en yacimientos de placer. (Lugo, 2020). Entre las fuentes principales de titanio en la

naturaleza se encuentran las anortositas, que son un tipo de rocas ígneas plutónicas, que según Ashwal (2010), poseen hasta un 90% o más de plagioclasas y el resto son minerales de óxidos de hierro o titanio, o silicatos máficos; y según su origen, estas rocas se pueden clasificar en 6 distintos tipos.

En Venezuela, en la zona de Yumare, en el estado Yaracuy, autores tales como Rodríguez y Añez (1978), Lozano y Mussari (2007), Gómez y Sandoval (2008), Grande (2013), Lugo (2020) y Rodríguez (2020), han reportado la presencia de anortositas. El origen de estas rocas se debe a la presencia de un basamento de alto grado al noroeste de Venezuela, denominada Terreno Falconia, que estaría asociada a la megasutura Rodiniana, ocurrida durante la orogénesis Grenvilliana (Grande, 2007). Este evento causó el emplazamiento de una suite anortosita-mangerita-charnockita-granito (AMCG) y, por tanto, la presencia de anortositas en esta zona.

Rodríguez y Añez (1978), en su estudio lograron delimitar el yacimiento y hacer un cálculo de reservas; Lozano y Mussari (2007) realizaron un estudio sobre la petrología de las rocas en la zona de Yumare. Gómez y Sandoval (2008) hicieron estudios geofísicos en la zona y lograron ubicar en San Quintín zonas de alta magnetometría y una anomalía de Bouguer alta en respuesta a cuerpos ígneo-metamórficos. Grande (2013) hizo un estudio mineralógico completo sobre las anortositas de la zona, así como proponer que el emplazamiento de estas anortositas durante la orogénesis Grenvilliano como producto de movimientos tectónicos en el ajuste de la placa Caribe con la placa suramericana, que emplazó al Terreno Falconia como bloque alóctono en el NO de Suramérica.

Urbani en (2014) realiza una actualización sobre la estratigrafía en la zona y propone más estudios en la zona. Lugo (2020) hace un estudio de la meteorización de las anortositas y propone 2 lugares para su exploración, en la zona central y hacia el norte. Finalmente, Rodríguez (2020) realizó una caracterización geoquímica de la

anortosita e igualmente señala 2 áreas de posible interés prospectivo, una en el centro este y otra hacia el norte del cerro.

I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A pesar de que se han realizado algunos estudios geológicos y geoquímicos en superficie, en el Cerro San Quintín, Rodríguez y Añez (1978), Lozano y Mussari (2007), Gómez y Sandoval (2008), Grande (2013), Urbani (2014), Lugo (2020) y Rodríguez (2020), aún no se ha realizado un estudio del depósito tomando en consideración relaciones espaciales, haciendo la integración de características geológicas y geoquímicas, ni de estimación de las zonas de mayor concentración de titanio en toda la zona del depósito, salvo en la zona central donde se han basado en parámetros geoquímicos únicamente, y es un depósito que puede tener un gran potencial desde el punto de vista del interés económico.

En base a la situación planteada, surge la necesidad de realizar este Trabajo Especial de Grado, a fin de elaborar una reinterpretación de los datos que se poseen del depósito mineral y generar un modelo espacial piloto del mismo tomando en consideración aspectos geológicos y geoquímicos del depósito de San Quintín. Para ello, se parte de los datos obtenidos por parte de Rodríguez y Añez (1978), quienes realizaron 29 sondeos e incluso llegaron a estimar 5.408.392 toneladas de TiO_2 con una ley promedio de 5.78%. A su vez, se analizaron algunos trabajos más recientes, en donde se realizaron estudios petrográficos completos, se dio un posible origen a estas anortositas, y se estudió la meteorización y la geoquímica del Cerro San Quintín, así como la caracterización geoquímica de la anortosita.

I.2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el uso del titanio lo ha convertido en un elemento crítico para las actividades del parque industrial, en consecuencia, el estudio de rocas anortosíticas con potencial para la explotación, y la realización estudios que permitan la identificación de zonas con mayor concentración de titanio, empleando representaciones espaciales de superficie y subsuelo, ayuda a garantizar una correcta inversión a la hora de explotar el depósito, y estas condiciones hacen que este proyecto tenga una alta importancia y sea la base para futuras investigaciones.

Basándose en toda la información obtenida previamente por diversos autores, se realizó en este trabajo un nuevo enfoque integrador de los aspectos geológicos, mineralógicos, petrográficos, geoquímicos y geofísicos, que aporta nueva información relevante, así como estudios estadísticos y una caracterización de las anortositas, con lo cual se espera ayude a futuras campañas de exploración minera del mismo con vistas a la explotación de este importante depósito titanífero.

I.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Los resultados de este estudio pueden ser usados como referencia para futuras fases de exploración de esta importante acumulación titanífera, así como para otros estudios más detallados con fases de trabajo de campo. Además, se plantea que el modelo sugerido pueda apoyar en las futuras etapas de explotación de los recursos minerales presentes.

Sin embargo, se contó con un conjunto de limitantes para el desarrollo del proyecto. La principal limitante radicó en que no se tienen muestras en físico para

realizar estudios de difracción de rayos X, u otros estudios mineralógicos. Así como no se contó con las muestras petrográficas, y la data geoquímica y geofísica del subsuelo es limitada.

I.4 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio geológico y geoquímico en las anortositas titaníferas del Cerro San Quintín, Yumare, Estado Yaracuy, Venezuela, empleando datos de superficie y de subsuelo para la identificación de zonas con ocurrencias anómalas de titanio.

I.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Integrar datos geológicos, geoquímicos y geofísicos preexistentes en el área de estudio, para la elaboración de un modelo de distribución espacial de titanio.
- Determinar las variaciones de las concentraciones del titanio por medio de datos de sondeos realizados en el área San Quintín.
- Establecer áreas de interés mediante la identificación de anomalías geoquímicas de titanio.

I.6 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está ubicada en el estado Yaracuy, dentro del municipio Manuel Monge, a 45 km al noreste de San Felipe y al norte de la población Yumare (Figura 1), en una zona de gran desarrollo ganadero y agrícola.

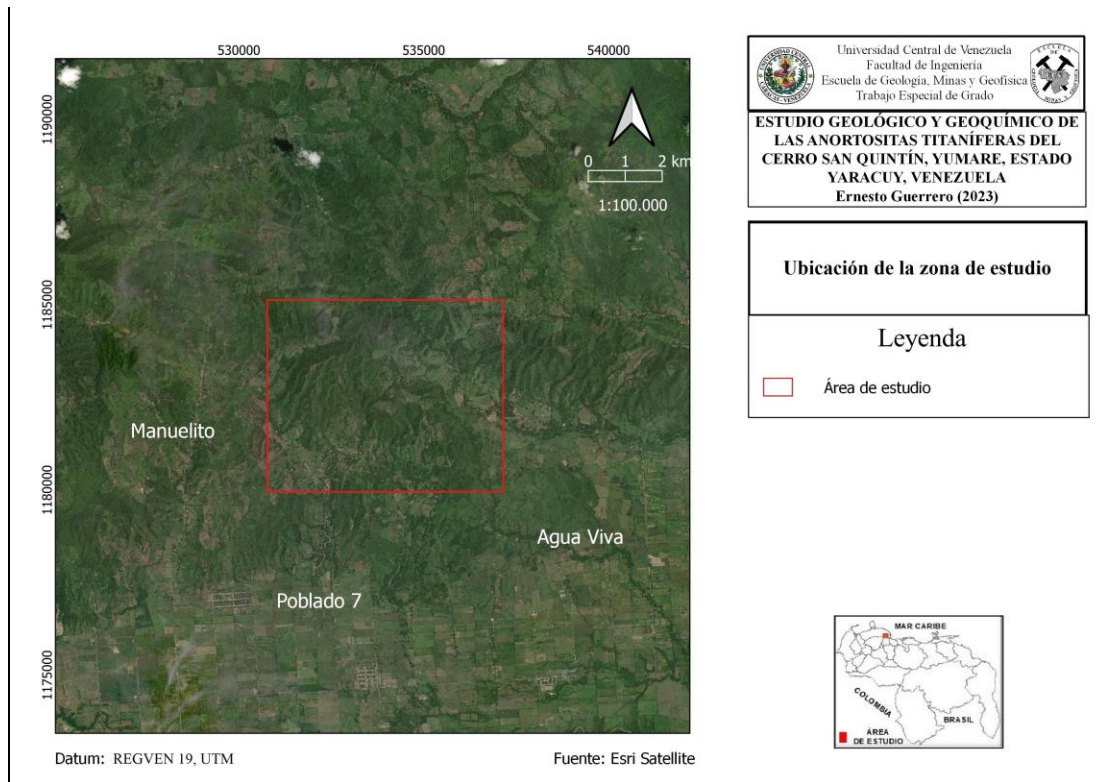


Figura 1.- Ubicación del área de estudio.

I.6.1 Vías de acceso

El principal acceso es por la autopista Cimarrón Andresote, en el estado Yaracuy hasta la salida del pueblo de Marín, posterior a esto se toma la carretera de Marín-Yumare. En el pueblo de Yumare se toma dirección norte y se recorre por las distintas carreteras de la colonia agrícola hasta los macizos ígneo-metamórficos (Lozano y Mussari, 2007).

I.7 ANTECEDENTES

En esta zona de Yumare, se han realizado algunos trabajos geológicos previos realizados por distintos autores, principalmente en superficie, y gracias a uno de ellos

es que se puede inferir el subsuelo y realizar así un modelado más preciso del depósito mineral. Entre estos estudios se encuentran los siguientes:

Bellizzia A., Rodríguez G. (1976), en su trabajo llamado “Geología del estado Yaracuy”, realizan una campaña de cartografía geológica del estado Yaracuy, utilizan el nombre Complejo Yumare, para las rocas metaígneas plutónicas que afloran en los macizos San Quintín, La Zurda y Salsipuedes, siendo San Quintín el cerro principal del presente estudio, y señalan “uno de los hechos más resaltantes de esta investigación es el descubrimiento de un complejo de rocas de alto metamorfismo constituido por anortosita, granulita, gneis y anfibolita”.

Rodríguez, S. y Añez, G. (1978), publican el estudio “Los depósitos de mena titaníferas de San Quintín Central, estado Yaracuy, génesis, caracteres geológicos y estimación de reservas”, donde realizan estudios exhaustivos en las anortositas de San Quintín y lograron definir los reservorios enriquecidos en ilmenita-hematita-magnetita. Determinan que este depósito mineral está asociado directamente a las anortositas, aunque también hay otras rocas como gabros, gneises anfibolíticos, granulitas y anfibolitas. Además, realizaron estudios petrográficos y geofísicos, así como un posible modelo del subsuelo. Durante el estudio se llegaron a realizar 29 sondeos y hubo una recuperación de testigos, logrando así establecer 5.78% de ley promedio.

Lozano, F., Mussari, A. (2007), en su trabajo especial de grado “Geología de los macizos ígneo-metamórficos del norte de Yumare, estados Yaracuy Y Falcón”, realizaron un estudio geológico en las formaciones ígneo-metamórficas al norte de la zona de Yumare en los cerros Salsipuedes, La Zurda, San Quintín y Tarana. Entre los resultados obtenidos durante este trabajo, se encuentran los metagabros anortosíticos aflorantes en San Quintín, La Zurda y Salsipuedes. En el Cerro San Quintín

obtuvieron que la litología está dominada por rocas máficas como el metagabro, metamonzogabro y meta-cuarzo-gabro, por rocas ultramáficas como la metahornblendita y por rocas félsicas como la metatrondhjemita y la metaanortosita.

Grande, S. et al (2007), publican “Presencia de un Basamento Grenvilliano en el Noroccidente de Venezuela”, donde realizan un estudio en el que se plantea la presencia de un basamento de alto grado al noroeste de Venezuela, denominado Terreno Falconia, que estaría asociada a la megasutura Rodiniana, ocurrida en la orogénesis Grenvilliana entre 1200 y 850 Ma en el Proterozoico tardío.

Gomes, F., Sandoval, R. (2008), en su trabajo especial de grado “Estudio geofísico integrado en la zona de Yumare-Aroa, estados Yaracuy y Falcón”, realizaron un estudio geofísico en la zona de Aroa y Yumare. Observaron en los macizos de San Quintín, La Zurda y Salsipuedes, el Metagabro Anortosítico de Yumare como un bloque continuo que aflora en profundidad por la acción de un conjunto de fallas de alto ángulo y que alcanza los mayores espesores hacia el oeste. Además, se encuentra un cuerpo ígneo-metamórfico, emplazado y aflorando en el Macizo La Zurda, cuya profundidad esta entre 3000 y 6500 m., lo que podría concordar con lo descrito por Grande (2007), que estableció que estos cuerpos podrían pertenecer a un bloque continuo o a fragmentos de un basamento de edad Proterozoico al norte de Venezuela, denominado Terreno Falconia.

Grande, S. (2013), publica “Petrología de las rocas de alto grado metamórfico presentes en el noroccidente de Venezuela”, donde estudió la petrología en el noroccidente de Venezuela. En la zona de Yumare afirma que afloran tres unidades litodémicas distintas, El Complejo Yumare, integrado mayoritariamente por anortositas, aunque también charnockitas, mangeritas y enderbitas, y

minoritariamente posiblemente, por ortopiroxenita. Las Volcanosedimentarias de San Quintín, que consisten en una secuencia tectonizada y desmembrada, no metamorfizada, de lavas andesíticas y basálticas, tobas andesíticas líticas y cristalinas, limolitas carbonáticas, pelitas epiclásticas y conglomerados o aglomerados volcánicos, y El Metagabro de La Zurda, una napa emplazada por encima de la secuencia volcanosedimentaria anterior.

Urbani *et al* (2014), publican “Geología de la región septentrional de los estados Lara y Yaracuy”, actualizan la cartografía del norte de los estados Lara y Yaracuy a escala 1:25.000, haciendo una cartografía geológica detallada en las regiones de Siquisique y Yumare, debido a que afloran tipos de rocas ígneo-metamórficas únicas en el país. En este mismo trabajo menciona que el Complejo Yumare, está integrado por rocas anortosíticas, habiéndose hallado una sola muestra de ortopiroxenita; ambos tipos de rocas tienen evidencias de textura de adcumulado. En una localidad se observa un dique de basalto toleítico que intruciona la anortosita.

Lugo, R. (2020), en su trabajo especial de grado “Estudio geoquímico de los procesos de meteorización de la anortosita del Cerro San Quintín, estado Yaracuy-Venezuela”, hizo un estudio geoquímico de los productos de meteorización de la anortosita del Cerro San Quintín. Con los resultados de las 78 muestras obtenidas, llegó a los resultados de la mineralogía está compuesta por albita, cuarzo, anfíboles y esmectitas, lo que indica una hidrólisis incipiente. Así mismo, indica que los resultados de los diversos índices de meteorización evaluados (*CIA*, *Imob* y *LOI*) muestran que el grado de meteorización al cual ha sido sometida la anortosita corresponde a una meteorización intermedia. Finalmente, basándose en las concentraciones de titanio, plantea 2 zonas con posible interés económico, una en la zona centro sur y la otra en el norte del Cerro San Quintín.

Rodríguez, A. (2020), en su trabajo especial de grado “Caracterización geoquímica de la anortosita del Cerro San Quintín, Yumare, edo. Yaracuy–Venezuela” realizó una caracterización geoquímica de la anortosita del cerro San Quintín. Colectó y analizó dieciséis (16) muestras de roca fresca y una muestra de sedimentos. Consiguió dividir la zona según el cuerpo de roca, con una composición más anortosítica al oeste y más diorítica-anfibolítica al este, que cambia a monzonítica en el límite de falla este hacia el cerro La Zurda. Además estableció que la mena de titanio está compuesta de hemoilmenita, y los contenidos de TiO_2 son inusualmente altos en 2 muestras de roca, por lo que señala 2 áreas de posible interés prospectivo en el centro este y norte del cerro.

Rey-Moral *et al.* (2022), en su trabajo titulado “Recording the largest gabbro-anorthositic complex worldwide: The Kunene Complex (KC), SW Angola”, realizaron estudios geofísicos en las anortositas que afloran en este complejo. En el trabajo, los autores se basaron principalmente en el parámetro gravimétrico de las Anomalías de Bouguer, y encontraron que la máxima respuesta a estas anomalías se encontraba en zona en las que afloraban gabros anortosíticos, y realizaron varios mapas y modelos en donde se reflejan estas anomalías.

Sotiriou, P. y Polat, A. (2023), publican el trabajo titulado “Petrogenesis of anorthosites throughout Earth history”. En este trabajo hacen un estudio acerca de la evolución de las anortositas. Estudian todos los tipos de anortositas, haciendo un énfasis en las composiciones mineralógicas y la petrogénesis de cada tipo de anortosita, las ubicaciones de los complejos de anortositas alrededor del mundo, y describen las características principales de cada tipo.

II. MARCO TEÓRICO

Este trabajo está centrado en la realización de un estudio geológico, geoquímico y geofísico, así como representaciones espaciales de un depósito de anortositas titaníferas, por lo que a continuación se exponen conceptos y esquemas que ayudan a la fácil comprensión del estudio:

II.1 ANORTOSITAS

Las anortositas son “rocas ígneas plutónicas, formalmente definidas como aquellas que contienen 90% o más de plagioclasa y el remanente consiste en silicatos máficos y minerales de óxidos de Fe-Ti y/o sus equivalentes metamórficos” (Ashwal et al, 2017). Según Le Maitre (2002), la anortosita es una roca plutónica leucocrática que consiste principalmente de plagioclasa con pequeñas cantidades de piroxeno. Este tipo de rocas se han formado desde el Precámbrico hasta el Reciente.

II.1.1 Clasificación de las anortositas

Según Ashwal (2010), las anortositas se dividen en 6 tipos distintos:

- Anortositas del arqueano
- Anortositas del proterozoico (tipo masivas)
- Anortositas en complejos máficos estratificados
- Anortositas en ambientes oceánicos
- Inclusiones de anortositas en otros tipos de rocas
- Anortositas extraterrestres

A continuación, se presenta la tabla 1 que muestra las principales características de estos 6 tipos de anortositas existentes, con énfasis en las del proterozoico que son las encontradas en San Quintín:

Tabla 1: Características de los distintos tipos de anortositas. Tomado y modificado de Ashwal (1988)

Tipo	Textura	% An	Edad (Ga)	Depósitos minerales	Ejemplos
Extraterrestres	Adcumulado	95-98	-4.4	-	Corteza Lunar
Arqueano	Megacristales equidimensionales (hasta 30 cm de diámetro)	75-90	2.7-3.75	Cr, Fe-Ti	Complejo Windimurra en el Cratón Yilgarn, al oeste de Australia
Proterozoico	Cristales hasta 1m.	40-65	1.0-1.7	Fe-Ti	Complejo Saint-Jean de Quebec y el Complejo Kurene
Máficos estratificados	Variable	50-80	0.1-2.7	Cr, Pt, Fe-Ti, V	Stillwater, en Montana, y Dufek en la Antártida
Ambientes oceánicos	Adcumulado	68-75	0.44-0.04	-	Dorsal oceánica del Mar Caribe y los océanos Atlántico e Índico
En otro tipo de rocas	Variable	Variable	0.0-1.2	-	Diabasas proterozoicas del Complejo Beaver Bay

II.1.2 Plutones de anortosita

Son grandes masas de rocas anortosíticas y gabroides que se encuentran casi exclusivamente en terrenos proterozoicos. Contienen valiosos depósitos de segregación de óxidos de Fe-Ti. Son conocidos en todos los terrenos proterozoicos del mundo, pero su mayor expresión se encuentra en Canadá. Según la forma de los cuerpos mineralizados se distinguen los filones, los lentes o bolsadas, así como disseminaciones en forma de schlieren, en cintas e irregulares. La composición mineral de las menas se caracteriza por tres minerales principales: rutilo, ilmenita y Ti-magnetita. Además, puede contener anatasa, brookita, minerales del grupo de la ilmenita, así como magnetita, sulfuros de Fe-Cu y apatito. La mayoría de estos cuerpos se asocia a rocas de facies de granulitas, como charnockitas félsicas a intermedias, granulitas piroxénicas, etc. La textura de las menas puede ser maciza, bandeada, jaspeada o disseminada (Grande, 2000).

II.1.3 Composición de las anortositas

De acuerdo a Ashwal (2017), las anortositas están compuestas por 90% o más de plagioclasas y lo restante corresponde a silicatos máficos y minerales de óxidos de Hierro y titanio. Estas plagioclasas tienen una composición intermedia, con un rango global entre An_{30} y An_{70} , siendo la composición promedio An_{53} . Además, como característica general poseen una homogeneidad en su composición, aunque es posible encontrar zonaciones. En uno de sus trabajos, Ashwal (1983), realizó una tabla con la composición de 4 muestras de anortositas y es la que se presenta a continuación en la tabla 2:

Tabla 2: Composición química de las Anortositas Arqueanas de Bad Vermilion Lake Complex de Canadá. Tomado de Ashwal et al (1983)

Óxidos	133A	148B	130A	44B
SiO₂	48,70	49.17	47.57	46.62
TiO₂	0.04	0.11	0.07	0.19
Al₂O₃	29.50	30.13	31.06	29.99
Fe₂O₃	0.16	0.06	0.36	0.64
FeO	0.18	0.92	0.48	0.62
MnO	0.01	0.02	0.01	0.01
MgO	0.60	1.10	0.93	0.50
CaO	14.18	12.20	14.93	15.60
Na₂O	3.81	3.42	2.91	3.00
K₂O	0.29	0.83	0.12	0.21
P₂O₅	0.03	0.03	0.03	0.04
LOI	2.48	2.11	1.65	2.31
Total	99.98	100.10	100.12	99.73

II.1.4 Suite anortosita-mangerita-charnockita-granito (AMCG)

Varios autores han señalado que la distribución de las rocas graníticas del proterozoico sigue el cinturón de anortosita de Laurasia. Estos granitoides incluyen suites de mangerita-charnockita, así como granitos rapakivi, los cuales se puede demostrar que son comúnmente asociados con anortositas de tipo macizo, no solo espacialmente, si no también temporalmente. Colectivamente, esta asociación ha sido referida como la suite AMC o AMCG (anortosita-mangerita-charnockita-granito) (Ashwal, 1993).

Esta asociación bimodal es característica de marcos postectónicos proterozoicos al nivel mundial. La litología más conspicua es la anortosita con plagioclasa andesínica, en forma de megacristales no zonados, adcumulativos y

poligonalizados, asociada a rocas charnockíticas máficas, intermedias y félsicas (Grande, 2013).

La mangerita es una roca charnockítica cuarzo-monzonítica a cuarzo-sienítica, rica en plagioclasa, feldespato alcalino y cuarzo, mientras que la enderbita o charnockita máfica contiene plagioclasa, hipersteno y clinopiroxeno, donde el ortopiroxeno tiene color verde claro y leve pleocroísmo. Su asociación con menas de óxidos de Fe-Ti de origen magmático primario, lo asemeja a rocas similares, intensamente explotadas en la Provincia de Grenville, en el este de Canadá, donde macizos anortosíticos de tamaño batolítico son frecuentes (Grande, 2013).

El granito característico de esta asociación es el de textura rapakivi, que se halla en grandes cuerpos de tamaño batolítico en el golfo de Finlandia, pero no ha sido reportado ni en Canadá ni en el NO de Venezuela ni en ninguno de los macizos o bloques granulíticos en los Andes y la región del Caribe (Grande, 2013)

Las charnockitas ígneas se pueden denominar por ejemplo granito con ortopiroxeno y las de origen metamórfico se pueden clasificar como granulitas (Torres, 2004). Con frecuencia se asocian con noritas y anortositas y parecen estar restringidos a terrenos precámbricos. De acuerdo con los contenidos minerales, se han originado en un ambiente seco de facies de granulita. En muchas áreas, muestran fenómenos generalizados de deformación y recristalización, signos de sobreimpresión metamórfica. Las rocas charnockíticas se pueden nombrar agregando el calificativo hipersteno al nombre respectivo del sistema general. Sin embargo, algunos nombres especiales se utilizan con frecuencia en los artículos sobre la suite de roca charnokítica, que a muchos autores les gusta conservar (Streckeisen, 1976).

De acuerdo con Lugo (2020), la composición química promedio de una suite AMCG se puede apreciar en la tabla 3:

Tabla 3: composición química promedio de una suite AMCG

Óxidos	Anortosita	Leuconorita	Jotunita	Cuarzo-mangerita
SiO₂	52.61	51.11	48.00	68.60
TiO₂	0.14	1.50	3.30	1.00
Al₂O₃	28.71	24.21	10.90	13.10
Fe₂O₃*	0.63	5.06	16.90	4.60
MnO	0.01	0.06	0.10	0.10
MgO	0.27	3.17	3.70	0.70
CaO	11.66	10.10	9.10	2.80
Na₂O	3.48	3.08	2.20	3.10
K₂O	0.82	0.68	2.60	5.40
P₂O₅	0.06	0.05	2.50	0.30
Total	98.45	99.01	99.30	99.70

*Fe₂O₃: FeO + Fe₂O₃: Fe total

Estas rocas charnockíticas se pueden clasificar usando el esquema general de clasificación de rocas plutónicas según su contenido mineral, llamado triángulo QAPF, y se pueden nombrar añadiendo el calificativo hipersteno al nombre respectivo del sistema general; sin embargo algunos nombres especiales son utilizados para referirse a las rocas charnockíticas (Tabla 4) (Streckeisen, 1976).

Tabla 4: Nomenclatura de las rocas charnockíticas

Campo del diagrama QAPF	Termino General del diagrama QAPF	Nombre especial
2	Granito hipersténico alcalino-feldespático	Charnockita alcalina-feldespática
3	Granito hipersténico	Charnockita
4	Granitoide Hipersténico	Opdalita o Charno-enderbita
5	Tonalita hipersténica	Enderbita
6	Sienita hipersténica alcalina-feldespática	-
7	Sianita hipersténica	-
8	Monzonita hipersténica	Mangerita
9	Monzonorita (Monzonorita hipersténica)	Jotunita
10	Norita (Diorita hipersténica)	-

(-) No posee nombre especial

II.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Un SIG es un elemento que permite analizar, presentar e interpretar hechos relativos a la superficie terrestre. También se puede definir un SIG como un conjunto de *software* y *hardware* diseñado específicamente para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos (Olaya, 2014). Un SIG ha de permitir la realización las siguientes operaciones:

- Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí).
- Generación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, etc.

Una forma de entender el sistema SIG es como formado por una serie de subsistemas, cada uno de ellos encargado de una serie de funciones particulares. Es habitual citar tres subsistemas fundamentales:

- Subsistema de datos. Se encarga de las operaciones de entrada y salida de datos, y la gestión de estos dentro del SIG. Permite a los otros subsistemas tener acceso a los datos y realizar sus funciones en base a ellos.
- Subsistema de visualización y creación cartográfica. Crea representaciones a partir de los datos (mapas, leyendas, etc.), permitiendo así la interacción con ellos. Entre otras, incorpora también las funcionalidades de edición.
- Subsistema de análisis. Contiene métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos.

Para que un SIG pueda considerarse una herramienta útil y válida con carácter general, debe incorporar estos tres subsistemas en cierta medida. Otra forma distinta de ver el sistema SIG es atendiendo a los elementos básicos que lo componen (Olaya, 2014). Cinco son los elementos principales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto (figura 2).

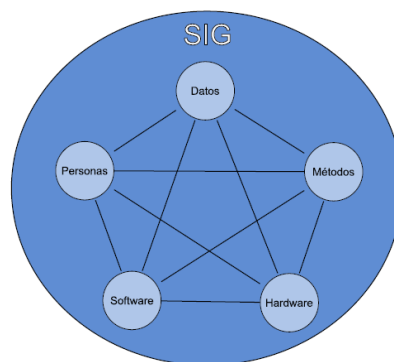


Figura 2.- Elementos que forman el sistema SIG. Tomado de Olaya (2014)

Dentro del grupo de los SIGs existen diversos tipos, sin embargo, para este trabajo de investigación solo se utilizará uno de ellos, QGIS debido a que es un software libre. QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License y proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos.

II.3 DATOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

La teledetección es una técnica que permite obtener información digital de los objetos situados sobre la superficie terrestre, sin necesidad de tener contacto directo con ellos. Para esto, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción, tal como, el flujo energético proveniente de la energía emitida por el propio sensor; o bien, la reflexión de la luz solar en la superficie terrestre. De esta forma, es posible adquirir información de las cubiertas u objetos por medio de reflexión, emisión o por emisión-reflexión (Chuvieco, 2008).

Las imágenes de satélite se han aplicado con mucho éxito en la geología estructural, los mosaicos de estas permiten la detección de grandes rasgos lineales, la banda del infrarrojo cercano es la más utilizada para esta tarea porque proporciona mayor información debido a la respuesta espectral de determinadas litologías en este rango de la longitud de onda. En los últimos años la aparición de una serie de sensores multispectrales e hiperspectrales, han permitido discriminar entre distintos tipos de litológica, identificar minerales como la alunita, illita, clorita, caolinita, epidota, óxidos, entre otros. Las bandas más usadas para el mapeo de minerales son las correspondientes al espectro visible e infrarrojo. Para el caso de los silicatos de utiliza las bandas del infrarrojo térmico (Vargas, s.f.).

Las imágenes satelitales también son utilizadas en la elaboración de mapas geomorfológicos, actualización de cartas geológicas. Las imágenes más utilizadas en la exploración geológica – minera son: LANDSAT, ASTER, ALI, QUICKBIRD, SPOT, HYPERION y los aerotransportados: GEOSCAN, MASTER, AVIRIS, HYPMAP, entre otros (Vargas, s.f.).

Los satélites LANDSAT han capturado imágenes de la tierra desde 1972, es un sensor multiespectral que capta imágenes multiespectrales de mediana resolución por desde 1972, por esto LANDSAT posee un archivo histórico incomparable en calidad, detalle, cobertura y duración. Poseen 7 bandas espectrales:

- Banda 1 (Azul): Usada para el mapeo de aguas costeras, mapeo de tipo de forestación o agricultura y la identificación de los centros poblados.
- Banda 2 (Verde): Corresponde a la reflectancia del verde de la vegetación vigorosa o saludable. También es usada para la identificación de centros poblados.
- Banda 3 (Rojo): Es usada para la discriminación de especies de plantas, la determinación de límites de suelos y delineaciones geológicas, así como modelos culturales.
- Banda 4 (Infrarrojo Reflectivo): Determina la cantidad de biomasa presente en un área, enfatiza el contraste de zonas de agua-tierra, suelo-vegetación.
- Banda 5 (Infrarrojo Medio): Es sensible a la cantidad de agua en las plantas. Usada en análisis de las mismas, tanto en época de sequía como cuando es saludable. También es una de las pocas bandas que pueden ser usadas para la discriminación de nubes, nieve y hielos.
- Banda 6 (Termal): Para la vegetación y detección de la vegetación que se encuentra enferma, intensidad de calor, aplicaciones de insecticidas, para localizar la polución termal, ubicar la actividad geotermal, actividad volcánica, etc.
- Banda 7 (Infrarrojo medio): Es importante para la discriminación de tipos de rocas y suelos, así como el contenido de humedad entre suelo y vegetación.

II.4 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

La interpolación es un proceso matemático utilizado para predecir valores de un atributo en una locación precisa a partir de valores del atributo obtenidos de puntos vecinos ubicados al interior de la misma región (Ferreira, 2006).

Estos análisis son usados para transformar un número finito de muestras, obtenidas en un espacio continuo, de tal forma que el patrón espacial obtenido de las muestras pueda ser comparado con los patrones espaciales de otras variables que se están tomando en cuenta. También se puede usar para estimar los datos esparcidos irregularmente y así poder construir un mapa de contorno o superficie de contorno, que no son más que una representación bidimensional y tridimensional respectivamente de un área. Para ambos casos es indispensable usar un grid o cuadrícula, y que corresponde a una serie de valores. (Ferreira, 2006).

Ferreira (2006) en su trabajo menciona que las etapas para realizar un modelado de superficies en geología, es necesario realizar los siguientes pasos:

- 1.- Calcular los valores en los vértices de la grid, a través de interpolaciones de los valores conocidos en los puntos de control.
- 2.- Calcular los valores de la superficie en cualquier punto, a través de gráficas, cálculo de áreas y volúmenes, etc., y esto se realiza por las interpolaciones antes realizadas.
- 3.- Presentar gráficas tipo isolíneas, como curvas de nivel, perfiles, etc.
- 4.- Calcular sobre los valores en los vértices de la red las correcciones de la superficie, cálculo de áreas, volúmenes y reservas, etc.

Con respecto a los métodos de interpolación, hay varios distintos, pero según Ferreira (2006), estos son los principales:

- Inverso de la distancia (*Inverse Distance Weighting – IDW*).
- Krigeaje (*Kriging*).
- Regresión polinómica (*Polynomial Regression*).
- Promedios móviles (*Moving Average*).
- Curvatura mínima (*Minimum Curvature*).
- Vecino cercano (*Nearest Neighbor*).
- Funciones de base radial (*Radial Basis Function – RBF*).

Siendo los dos primeros los más importante, ya que son los más usados en geología, aunque cada uno difieren en sus propiedades, perspectiva local o global, además de naturaleza determinística o estocástica. Y para este estudio se utilizó el método Kriging para la realización de los modelos del depósito, ya que se consideró el mejor método para la creación de imágenes en 2D y 3D de la zona, debido a que arroja mejores resultados en cuanto a la estimación con los datos que se tienen.

II.4.1 Kriging

Kriging es un método de inferencia espacial, que permite estimar los valores de una variable en lugares no muestreados utilizando la información proporcionada por la muestra (Porrás, s.f.). El método da el mejor estimador lineal no sesgado con una varianza mínima. La interpolación por kriging implica usar el mejor estimador lineal insesgado de un conjunto de muchos posibles, en el sentido que el error de estimación tiene una esperanza nula (restricción de insesgo) y una varianza mínima (restricción de optimalidad). Sin embargo, presenta la limitación de tratar con solo una variable regionalizada, lo que no se ajusta a la necesidad de las operaciones mineras que consideran múltiples especies de valor (Navarro, 2020).

En esta técnica se quiere estimar una propiedad, denominada Z^* , en una ubicación sin medidas, o, basada en el conocimiento del valor de Z_i , sobre localidades x_i . El método de Kriging se basa en el uso de la siguiente función de interpolación (Ringrose, 2015):

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \omega_i Z_i$$

Donde ω_i son los pesos que se emplean en una función objetiva para minimizar la varianza. Es decir, se usa un conjunto de ponderaciones para obtener una varianza mínima esperada a partir de los puntos provenientes de datos conocidos (Ringrose, 2015).

II.4.2 Kriging simple

Es matemáticamente el método más sencillo, y tienen la condición de que la condición de asumir que la media y la distribución se conocen y son estadísticamente estacionarios (Ringrose, 2015). Este tipo de kriging se basa en la modelización de la siguiente ecuación:

$$Z(s) = m + \delta(s), s \in D$$

Donde m es una constante conocida, $\delta(\cdot)$ es una función aleatoria estacionaria de segundo orden de esperanza nula y de estructura de dependencia conocida (Baillargeon, 2005).

II.4.3 Kriging ordinario

Es la técnica de kriging más utilizada. Este tipo de kriging no requiere de una hipótesis estacionaria de segundo orden. Se desarrolla bajo la hipótesis más general de una estacionariedad intrínseca. Se basa en el siguiente enunciado:

$$Z(s) = \mu + \delta(s), s \in D$$

Con μ casi constante desconocida y $\delta(\cdot)$ una función aleatoria estacionaria intrínseca de espacio nulo y de estructura de dependencia conocida. El símbolo μ significa que la esperanza no está restringida a permanecer igual por todo el campo D (Baillargeon, 2005).

II.4.4 Validación del Kriging

Existen diferentes métodos para evaluar la bondad de ajustes del modelo de semivariograma elegido con respecto a los datos muestrales. El más empleado es el de la validación cruzada, que consiste en excluir la observación de uno de los n puntos muestrales y con los $n-1$ valores restante y el modelo de semivariograma escogido, predecir vía kriging el valor de la variable en estudio en la ubicación del punto que se excluyó. Se piensa que si el modelo de semivarianza elegido describe bien la estructura de autocorrelación espacial, entonces la diferencia entre el valor observado y el valor predicho debe ser pequeña. Este procedimiento se realiza en forma secuencial con cada uno de los puntos muestrales y así se obtiene un conjunto de n “errores de predicción” (Giraldo, s.f.).

Una forma fácil de hacer la validación cruzada es mediante un gráfico de dispersión de los valores observados contra los valores predichos. En la medida en que la nube de puntos se ajuste más a una línea recta que pase por el origen, mejor será el modelo de semivariograma utilizado para realizar el kriging (Giraldo, s.f.).

II.4.5 Kriging en Rockworks 16

Este software utiliza el método kriging de estimación para crear un modelo de los datos. Kriging difiere de algunos de los otros métodos de cuadrícula al resaltar las influencias direccionales en sus datos. Kriging se basa en los siguientes supuestos:

- El valor de un punto desconocido se puede estimar a partir de puntos vecinos, pero que el punto desconocido no es necesariamente completamente dependiente de los valores de los puntos conocidos.
- La variabilidad en los valores z de un conjunto de datos es una función de dos factores: distancia y dirección. En general, los puntos cercanos tienden a mostrar menos variabilidad que los puntos muy separados, y en muchos casos, los puntos a lo largo de ciertos rodamientos mostrarán menos variabilidad que los puntos equidistantes a lo largo de un rodamiento diferente.

Esta relación de variabilidad versus distancia se puede mostrar gráficamente usando un "variograma", que traza la variabilidad de los valores Z para pares de puntos en función de la distancia entre los puntos. Los variogramas generados para pares de puntos en diferentes direcciones muestran diferentes tendencias de distancia versus varianza. Rockworks crea variogramas observados de sus datos y, a continuación, encuentra el modelo de variograma que ofrece el mejor ajuste, definiendo así la distancia y las relaciones direccionales en sus datos, y utiliza esa ecuación para interpolar el modelo de cuadrícula. Rockworks puede realizar este análisis de manera automática, encontrando los muestreos de puntos óptimos y el mejor modelo de variograma para usar. O, si se prefiere, puede establecer las variables manualmente y generar variogramas e informes detallados.

II.5 LINEAMIENTOS ESTRUCTURALES

Los lineamientos son características lineales o curvilíneas de la superficie, cuyas partes se alinean en una relación recta o ligeramente curva y pueden reflejar procesos más complejos en profundidad (Suarez y Candela, 2018). Se puede decir también que se forman como resultado de procesos genéticos de origen tectónico asociados con fallas geológicas, ejes axiales de pliegues, diaclasamiento y planos de debilidad. Si son de origen geomorfológico, están asociados con acantilados, mesas y crestas estructurales, terrazas, segmentos de valles y drenajes alineados (Gupta, 2013).

Generalmente presentan cambios de tonalidades, textura o de expresión topográfica. Estas estructuras pueden ser continuas, discontinuas o difusas, teniendo en cuenta que los trazos de sus recorridos que se manifiestan en valles, crestas o líneas separadores de distintos tipos de suelo o roca, o cambios de tono asociados a la presencia de humedad o de vegetación. La precisión de estos lineamientos se basa en la observación, escala y sensor con su resolución espacial (Tejada, 2019).

Para la obtención de rasgos lineares, las imágenes que se están trabajando no reflejan los rasgos característicos de la superficie terrestre, sino que se deben fundamentalmente a defectos del funcionamiento del sensor o variaciones en la plataforma a la que va incorporado. Debido a ello es necesario realizar correcciones geométricas antes del análisis respectivo, modificando sin embargo el aspecto de la imagen, de ahí que la selección del procedimiento adecuado en función de la rugosidad y morfología del área no sea uniforme; motivo por el cual se ha diseñado procedimientos que permitan resaltar lineamientos de mayor continuidad, como la aplicación de filtros suavizantes y direccionales para producir imágenes en que aparezcan rasgos lineares en direcciones preferentes (Tejada, 2019).

Las implicaciones genéticas de la característica extraída y su relación con la disposición de estructuras en el subsuelo, es una de las limitantes de las metodologías basadas en percepción remota. No obstante, es una capa temática relevante que al ser combinada con información geológica y datos geofísicos permite ser usada en estudios de amenazas geológicas, zonas de recargas de acuíferos, y exploración minera (Suarez y Candela, 2018).

III. MARCO GEOLÓGICO

En este apartado se desarrollan los elementos teóricos obtenidos a través de la revisión bibliográfica, que son el marco de referencia bajo el cual se desarrollan los resultados obtenidos, así como aspectos importantes de la zona de estudio. A continuación, se presenta el mapa geológico (Figura 3), modificado de Urbani (2014), en el cual se observan las formaciones, fallas, pliegues y drenajes.

Mapa geológico del Complejo Yumare

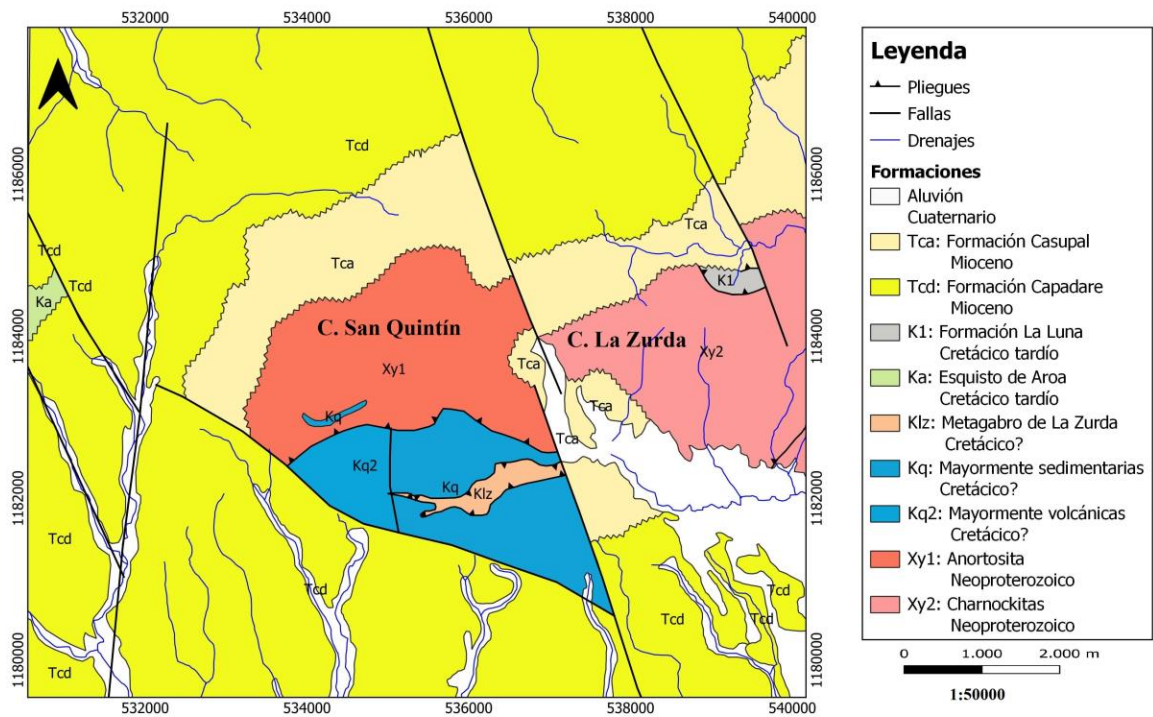


Figura 3.- Mapa geológico del Complejo Yumare. Modificado de Urbani (2014).

III.1 EVOLUCIÓN TECTÓNICA

La región de Yumare se encuentra en una zona tectónicamente compleja, ubicada entre las placas tectónicas del Caribe y Suramérica, asociado a la megasutura Rodiniana, ocurrida durante la orogénesis Grenvilliana, durante el Proterozoico tardío. Además de estas dos placas, hay evidencias del denominado Terreno Falconia con corteza continental que tiene afinidad Grenvilliana y se considera parte del basamento de la cuenca de Falcón. Seguidamente se mencionan las características de las placas y luego se explica la orogénesis Grenvilliana en Venezuela.

III.1.1 Evolución de la Placa del Caribe

El origen de la placa del caribe es cuestión de debate. Hay dos hipótesis: una del modelo “alóctono”, que establece que se formó durante el Cretácico superior en la región del Pacífico oriental y emigró hacia el este hasta su posición actual (Pindell *et al*, 2009, Escalona *et al*, 2010, entre otros). La otra hipótesis es la del modelo “autóctono”, la cual establece que la placa Caribe se formó “in situ” entre fragmentos de corteza oceánica y entre las dos Américas (Meschede *et al*, 1998).

La placa Caribe posee un movimiento continuo hacia el este con respecto a la placa Suramericana, de 20 mm/año (Escalona *et al*, 2010), con colisión oblicua, transpresión, transtensión, proceso de partición de las deformaciones, expulsión de bloques tectónicos, interacción de microplacas y emplazamiento de terrenos ofiolíticos dispersos y desmembrados dentro de la placa y en los bordes de la misma (Monsalve, 2019).

De acuerdo con Baquero (2015), existen cuatro eventos tectónicos-magmáticos diferentes en el noroccidente de Venezuela, y todos ellos asociados con la migración hacia el este de la placa Caribe, y que se ilustran en la figura 4:

1. Evento magmático, Paleoceno-Eoceno temprano (60-50 Ma), caracterizado por el desarrollo de un nuevo arco de isla, conocido hoy como las Antillas Menores.
2. Evento magmático intrusivo, ambiente de retro-arco, Falcón oriental, Eoceno medio-tardío (40-34 Ma), se inicia un evento extensional en la zona de Sanare, Falcón oriental, donde la Formación Cerro Misión es depositada, y luego intrusionada poco después por diques de leucobasalto subalcalino, de afinidad intraplaca y generado en una cuenca de retroarco, como así lo demuestran los datos geoquímicos.
3. Evento magmático arco inmaduro toleítico, Oligoceno tardío (28-26 Ma), este evento marca uno de los episodios más importante de la cuenca de Falcón, ya que es durante este corto período de tiempo se produce la subducción de la placa Caribe por debajo de la litósfera continental Suramericana en el noroccidente de Venezuela, dando lugar al desarrollo de un arco volcánico inmaduro toleítico, hoy día ubicado en el norte de la península de Paraguaná.
4. Evento magmático intrusivo, ambiente de retroarco, Falcón central, Oligoceno tardío a Mioceno medio (23-15 Ma), se inicia una nueva etapa de extensión, debido al posible desprendimiento de la placa proto-Caribe produciendo un ascenso astenosférico de mayor magnitud que la anterior (Falcón oriental), ocasionando el desarrollo de un graben de cresta de colapso en el centro de la cuenca, que causa un levantamiento local tanto al norte como al sur, posiblemente como respuesta isostática, donde se acumularon los depósitos arrecifales y de plataforma de las formaciones San Luís, al norte, y Churuguara, al sur, respectivamente.

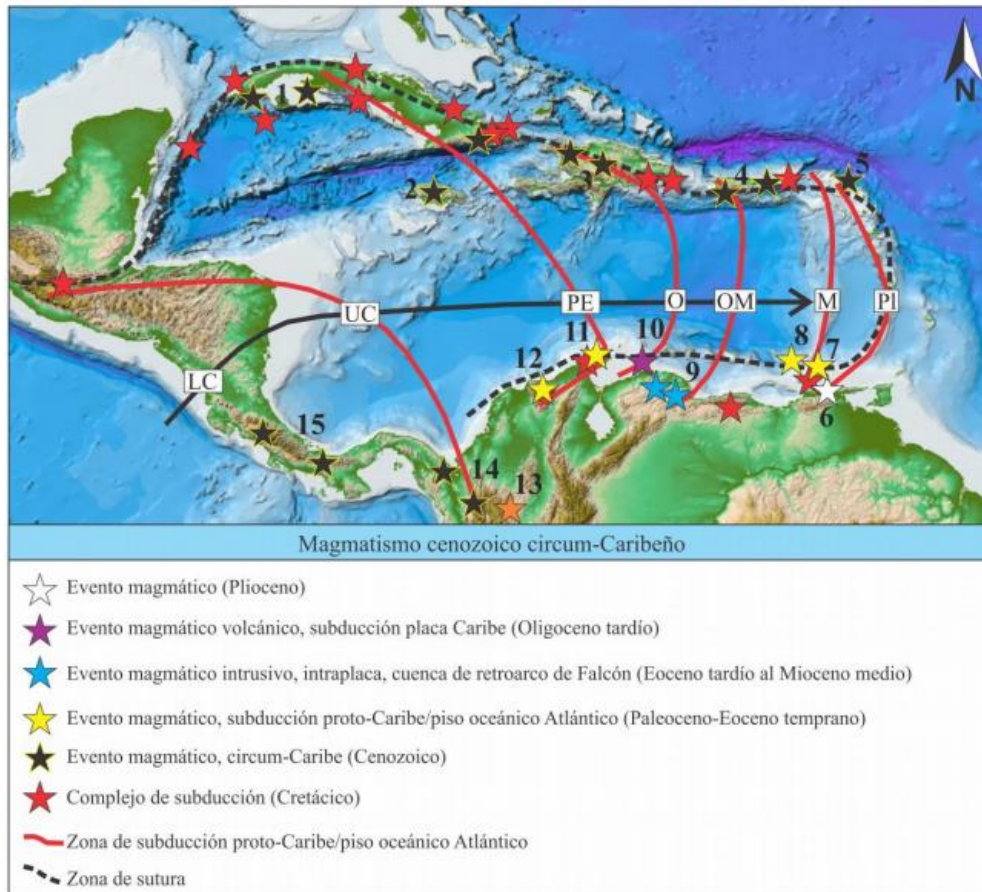


Figura 4.- Esquema evolutivo de la región Caribe. Se muestran las rocas plutónicas y volcánicas asociadas con la migración hacia el este de la placa Caribe a partir del Cretácico tardío. Además, de los complejos de subducción del Cretácico temprano. Nomenclatura: LC = Cretácico temprano; UC = Cretácico tardío; PE = Paleoceno-Eoceno temprano; O = Oligoceno; OM = Oligo-Mioceno; M = Mioceno; PI = Plioceno. 1) Cuba; 2) Jamaica; 3) La Española; 4) Puerto Rico; 5) San Martín; 6) Carúpano; 7) Isla Los Testigos; 8) Isla La Blanquilla; 9) cuenca de Falcón; 10) península de Paraguaná; 11) Guajira; 12) Santa Marta; 13) Cordillera Central; 14) Cordillera Occidental, y 15) Panamá. Tomado de Baquero (2015)

El límite entre las placas Caribe y Suramericana está constituido por una zona de deformación compleja de un centenar de kilómetros de ancho, a la cual se encuentra asociada lo esencial del volumen montañoso del norte de Venezuela (Audemard, 1997). No obstante, la transurrencia dextral entre ambas placas, en gran parte, parece estar acomodada por el sistema de fallas Boconó-San Sebastián-El Pilar.

III.1.2 Evolución de la Placa Suramericana

La placa Suramericana ha ido evolucionado debido a fases tectónicas, desde el Precámbrico hasta el Cenozoico, y durante este tiempo ha pasado por varios ciclos de Wilson y han sido amalgamados a ella bloques o microplacas de diferentes orígenes y edades (Monsalve, 2019). Según Baquero (2015), las correlaciones entre los diferentes terrenos desmembrados y acrecionados al margen norte de Suramérica son aún materia de debate, pero propone de manera general tres dominios geológicos:

1. Una provincia Precámbrica ubicada al sur de Venezuela conocida como el escudo de Guayana y constituida por la provincia de Imataca, provincia Maroni-Itacaiunas, y la provincia Ventuari-Tapajós. Esta provincia es constituida principalmente por plutones granitoides, granulitas y charnockitas, y reconoce que hay una extensión del basamento Precámbrico hacia el este de los estados Monagas y Anzoátegui conocido como Bloque Piara, siendo este cubierto por una espesa secuencia de rocas Cretácicas y Cenozoicas.

2. Un cinturón Paleozoico ubicado entre la serranía de Perijá y el margen oeste de la cuenca Barinas-Apure. Esta provincia está constituida principalmente por rocas graníticas, esquistos, gneises y metasedimentarias que son de edad Paleozoica y que se encuentran cubiertas por una secuencia sedimentaria cretácica o neógena en los Llanos centrales y occidentales. Dentro de este cinturón se ubica una cuenca cámblica no metamórfica que es considerada como una cuenca antepaís al sur del cinturón Paleozoico y que está representada por las formaciones Carrizal y Hato Viejo.

3. Un cinturón alóctono que está constituido por un complejo de rocas metaígneas, metasedimentarias, y metavolcánicas del Mesozoico-Cenozoico, el cual es reconocido en el margen norte de Venezuela y limitado al sur por un frente de

corrimiento en la zona centro-oriental (Guárico-Cantagallos). Los terrenos expuestos en el alóctono son el complejo ofiolítico de Paraguaná, complejo San Julián, complejo Caucagua-El Tinaco, complejo Yumare, complejo Villa de Cura, complejo Araya-Paria-Tobago, complejo Juan Griego, y los terrenos Ávila, Las Brisas y Las Mercedes.

Para este cinturón de deformación, tanto Grande (2012 b) como Baquero (2015), proponen la presencia de un bloque denominado Terreno Falconia. Este es un bloque alóctono de edad Neoproterozoico, de alto-medio grado metamórfico, de posible afinidad Grenvilliana, perteneciente originalmente al orógeno Putumayo el cual subyace el noroccidente de Venezuela y es el basamento metamórfico de la cuenca de Falcón y posiblemente otras cuencas del occidente del país, el cual además fue intrusionado durante la evolución Protocaribe-Caribe (Monsalve, 2019).

III.1.3 Cuenca de Falcón

La cuenca de Falcón está situada entre los límites de las placas Caribe y suramericana. Audemard (1995) propone que la parte central y oriental se encuentra sobre un bloque alóctono Caribe, con lo que concuerdan Grande (2012 b) y Baquero (2015) que indican evidencias del denominado Terreno Falconia con corteza continental, de alto-medio grado metamórfico y afinidad Grenvilliana. La evolución polifásica de la Cuenca de Falcón es resumida por Baquero (2015) en cuatro fases y algunos eventos magmáticos asociados. A continuación, se hace un resumen de ellas:

1. Evento magmático, Paleoceno-Eoceno temprano

Caracterizado por el desarrollo de un nuevo arco de isla, conocido hoy como las Antillas Menores. Durante esta fase se produce el emplazamiento de una serie de rocas granitoides en el noroccidente de Suramérica. El magmatismo corresponde a un evento magmático de aproximadamente unos 10 millones de años de duración, y el mismo habría ocurrido entre los 60-50 Ma. Las edades obtenidas sugieren una migración progresiva de la placa Caribe desde el noroeste de Colombia hasta el borde noroccidental de Venezuela.

La migración hacia el este de la placa Caribe, desarrolla en el noroccidente de Venezuela una cuenca antepaís y un sistema imbricado de cabalgamientos. Esta cuenca sería alimentada parcialmente desde el norte por diferentes dominios geológicos determinando así el carácter colisional en que se depositaron en dicha cuenca. A su vez, la migración del arco de isla Cenozoico dio origen a las cuencas de retro-arco de Grenada, Blanquilla, Bonaire y Falcón (figura 5), y a la separación de la Prominencia de Aves como parte del Arco de Grenada.

FASE SUBDUCCIÓN OBLICUA (60-50 Ma)

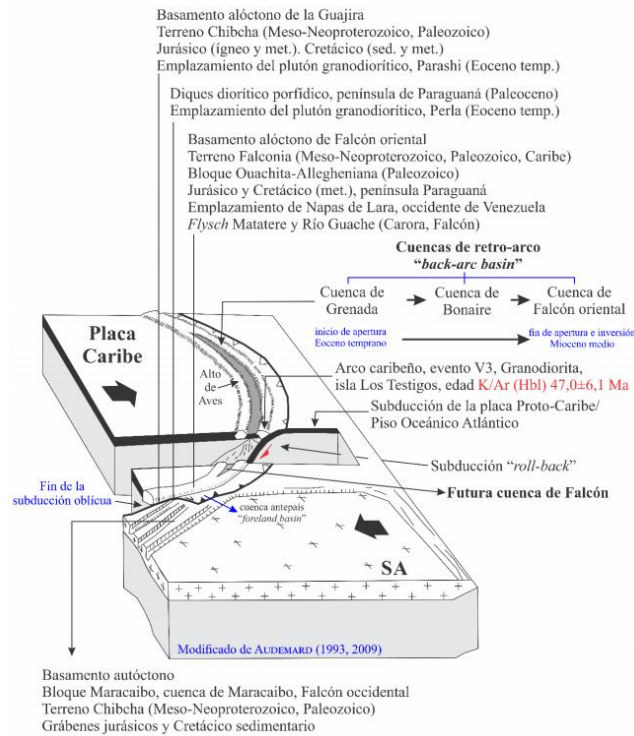


Figura 5.- Reconstrucción geodinámica del límite suroeste de la placa Caribe durante el Paleoceno-Eoceno temprano (60-50 Ma). Las cuencas de Grenada, Blanquilla, Bonaire y Falcón formaron parte de una única cuenca de tipo retro-arco "back-arc basin" asociado a la migración del Arco Caribeño Mesozoico y subducción del proto-Caribe por debajo del arco. Emplazamiento de las Napas de Lara. Tomado de Baquero (2015)

2. Evento magmático intrusivo, ambiente de retro-arco, Falcón oriental, Eoceno medio-tardío

Se inicia un evento extensional en la zona de Sanare, Falcón oriental, donde la Formación Cerro Misión es depositada, y luego intrusionada poco después por diques de leucobasalto subalcalino, de afinidad intraplaca y generado en una cuenca de retroarco. Un posible fenómeno de fracturamiento "slab breakoff" de un remanente de la placa del proto-Caribe o Piso Océánico Atlántico contigua a Suramérica y subducida parcialmente por debajo del bloque alóctono (Terreno Falconia) pudo aprovechar fracturas pre-existentes por donde diapiros astenosféricos se infiltraron y

se ubicaron por debajo de la litósfera continental del Terreno Falconia, adelgazándola parcialmente y sufriendo un moderado porcentaje de fusión parcial (Figura 6).

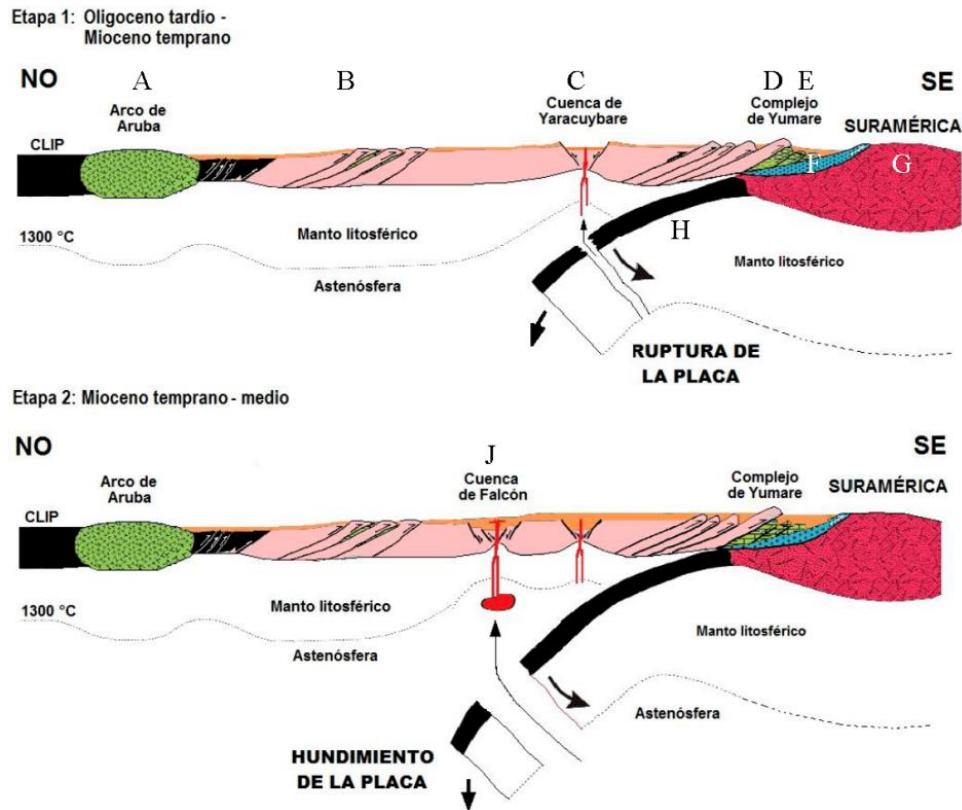


Figura 6.- Modelo de generación Grande (2012a) para Cuencas de Falcón oriental (Yaracuybare) y Falcón central. a) Ruptura inicial *slab break off* durante el Eoceno. b) Cuenca de Falcón central generada por *slab foundering* durante el Oligoceno. Tomado de Grande (2012a)

3. Evento magmático arco inmaduro toleítico, Oligoceno tardío

Durante este corto período de tiempo se produce la subducción de la placa Caribe por debajo de la litósfera continental Suramericana en el noroccidente de Venezuela, dando lugar al desarrollo de un arco volcánico inmaduro toleítico, hoy día ubicado en el norte de la península de Paraguaná. Sistemas de fallas transformantes dextrales debieron estar presente en el borde noroccidental de la placa Suramericana,

permitiendo la formación del surco de Urumaco, como producto del continuo avance de la placa Caribe hacia el este.

Durante esta fase se genera una discordancia, usualmente de gran angularidad y de extensión regional. Esta discordancia ocurre mayormente en el margen sur de la cuenca de Falcón, la cual ocurre a través de diversas formaciones geológicas que gradan lateralmente, representando diversos ambientes geológicos.

4. Evento magmático intrusivo, ambiente de retroarco, Falcón central, Oligoceno tardío a Mioceno medio.

Es una nueva etapa de extensión, debido al posible desprendimiento de la placa proto-Caribe produciendo un ascenso astenosférico y ocasionando el desarrollo de un graben de cresta de colapso en el centro de la cuenca, que causa un levantamiento local tanto al norte como al sur, posiblemente como respuesta isostática, donde se acumularon los depósitos arrecifales y de plataforma de las formaciones San Luís, al norte, y Churuguara, al sur, respectivamente. Se genera en la parte central una amplia zona de adelgazamiento cortical con una rápida subsidencia.

En el Mioceno temprano continua la colmatación de la cuenca con el depósito de la Formación Agua Clara, en un ambiente marino somero. Finalmente, la etapa post-extensión alcanza el Mioceno temprano tardío, con el depósito de la Formación Cerro Pelado, que de ambientes de frentes deltaicos pasan a ambientes más continentales.

III.1.4 Orogénesis Grenvilliana en Venezuela

Grande (2007) planteó la presencia de un basamento de alto grado al noroeste de Venezuela, el cual estaría asociado a la megasutura Rodiniana, que ocurrió durante la orogénesis Grenvilliana hace 1200 y 850 Ma, durante el Proterozoico tardío. Lozano y Mussari (2007) proponen que estos hallazgos parecen indicar, si no la presencia de un bloque continuo, de al menos grandes fragmentos de un basamento de estas rocas de alto grado de edad Proterozoico tardío y no relacionado con el Complejo de Imataca, muy parecidos pero mucho más joven. La principal correlación de estos cuerpos con la Orogénesis Grenvilliana es el mármol con forsterita, diópsido y flogopita asociado con rocas charnokíticas máficas y félsicas, gneis sillimanítico, anortosita y clinopiroxenita, por medio del cual Grande (2009), propone un modelo tentativo de formación de estos cuerpos (Figura 7).

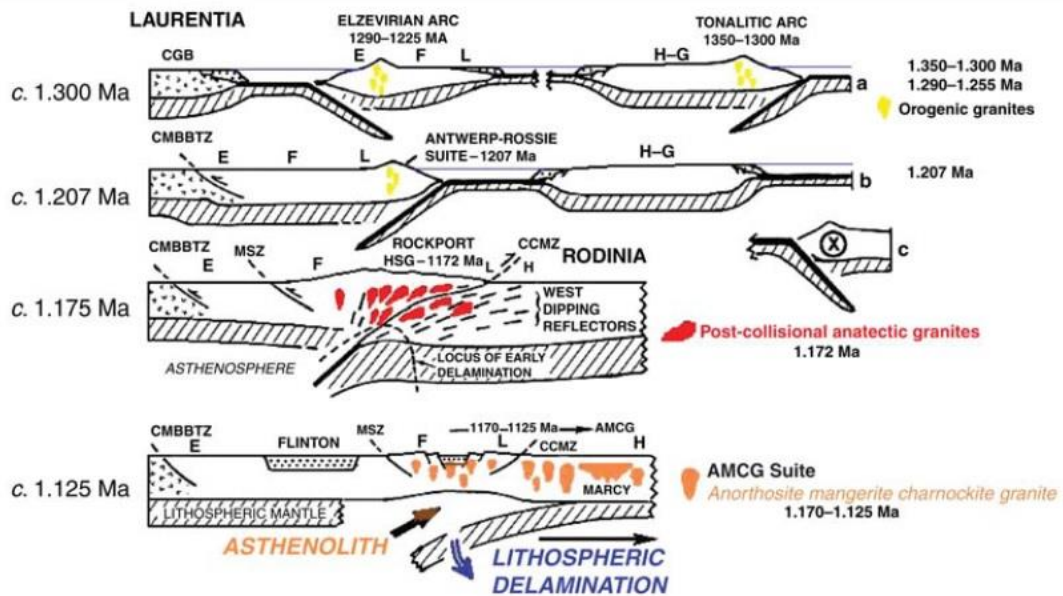


Figura 7.- Modelo propuesto por Grande para explicar el emplazamiento de los xenolitos. Tomado de Grande (2009)

Grande (2013), correlaciona la suite magmática AMCG, que ha sido reconocida en lugares tan apartados como Labrador y Québec, Ucrania, Noruega, India, Siberia, macizo de Oaxaca con el NO de Venezuela. Esta asociación Grenvilliana completa de mármol dolomítico, roca calco-silicatada, metaevaporita, metapelita, granulitas granatífera, félsica, máfica y ultramáfica, no había sido hallada con anterioridad en el país. Grande menciona que una íntima relación debe existir entre el Complejo Yumare y el basamento de la cuenca de Falcón, puesto que ambos contienen una suite AMGC desmembrada y deformada, con notables efectos hidrotermales y cataclásticos que han destruido parte de su mineralogía original. Sin embargo, el Complejo Yumare carece de las litologías metasedimentarias que caracterizan al Complejo El Guayabo y el basamento de la ensenada de La Vela, también presentes como peñones en conglomerados terciarios y cantos en la cuenca del río Bocoy, como mármoles dolomíticos, metaevaporitas y metasiliciclásticas.

III.2 ESTRATIGRAFÍA

La cuenca de Falcón está constituida por depósitos que abarcan desde el Eoceno hasta el Cuaternario, está instalada en su parte central y oriental sobre el alóctono Caribe sobrecorrido durante la fase compresiva Paleoceno-Eoceno, la cuenca es elongada en dirección este-oeste. Las facies cambian lateralmente y se hacen progresivamente más marinas hacia el este. Hay una evolución de depósitos marinos profundos a depósitos de plataforma continental y de zona litorales (Audemard, 1995). La existencia de tres discordancias de extensión regional permite subdividir la cuenca en cuatro conjuntos (figura 8) separadas en los límites plio-pleistoceno, mio-plioceno y mioceno medio-inferior:

1. **Conjunto oligoceno-mioceno inferior:** Los primeros depósitos de esta cuenca (Formación Cerro Misión) son de edad eoceno superior y están en el margen

sureste de la cuenca. El eje central de la cuenca fue una zona de fuerte subsidencia, donde se depositaron unidades marinas profundas. Hacia los bordes sur y oeste, facies marinas (Formación Pecaya) pasan progresivamente a depósitos de fuerte influencia terrígena (Formaciones Paraíso y Castillo) y a una unidad caracterizada por calizas de plataforma (Formación Churuguara). Hacia la isla de Paraguaná, al norte, la Formación Pecaya se interdigita con las calizas arrecifales de la Formación San Luis y sus facies peri-arrecifales.

El conjunto Oligo-mioceno inferior constituye la sedimentación de la cuenca de Falcón. La cuenca de Falcón se forma durante la fase de rifting de edad oligoceno y su colmatación es completada por la sedimentación de la Formación Agua Clara. La subsidencia tectónica concluye aproximadamente en el límite oligoceno-mioceno con las últimas intrusiones y coladas basálticas.

2. **Conjunto mioceno medio-superior:** Es globalmente menos marino que el conjunto subyacente. El eje de la sedimentación es desplazado hacia el norte del anticlinorio de Falcón, como consecuencia directa de la inversión tectónica del estrecho falconiano. El sector oriental de la cuenca de Falcón, donde el mar es más abierto, preservó su geometría de cuenca marina profunda hasta el mioceno superior tardío, permitiendo así la acumulación de una potente secuencia pelítica denominada Grupo Agua Salada. Este conjunto está representado por depósitos continentales hacia el oeste que progresivamente se hacen más marinos hacia el este.

3. **Conjunto mioceno superior-pleistoceno:** Este conjunto preserva la tendencia general de la cuenca. Es menos marino que el precedente. La cuenca profunda del sector oriental desaparece y se deposita una secuencia de plataforma interna (Formación Punta Gavilán). La discordancia basal es muy nítida en la plataforma de Dabajuro y en el sector oriental del Estado Falcón, y muy difícil de apreciar en la región norcentral de Falcón.

4. **Conjunto plio-cuaternario:** Es esencialmente continental, exceptuando las zonas actualmente sumergidas durante los máximos marinos interglaciares. Este conjunto está compuesto por depósitos continentales, restringidos básicamente a la plataforma de Dabajuro y al sector norcentral, y por depósitos marinos asociados a la costa actual y a la península de Paraguaná.

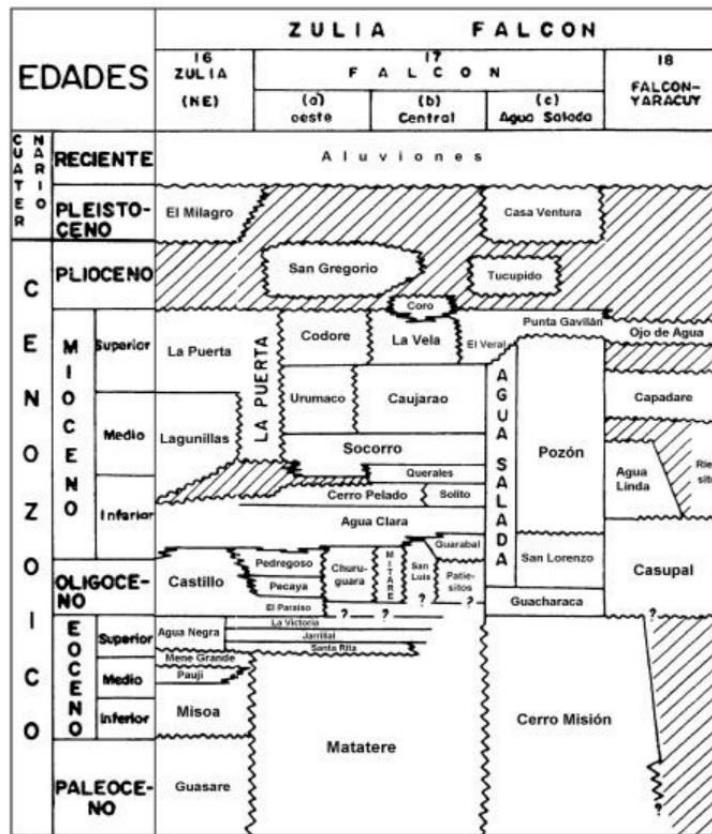


Figura 8.- Columna de las unidades estratigráficas de la cuenca de Falcón y de algunas zonas vecinas. Tomado de Soto (1997).

III.3 GEOLOGÍA REGIONAL

III.3.1 Complejo Yumare (Neoproterozóico)

Bellizzia et al. (1976) utilizan el nombre de Complejo Yumare para describir un conjunto de rocas metamórficas de alto grado, bien expuestas en el macizo de San Quintín y cerros adyacentes, estado Yaracuy. Igualmente, indican que los cerros del norte de Yumare son bloques fallados-exhumados, donde rocas del basamento pre-Mesozoico se han puesto en contacto con rocas de diferente petrogénesis. Señalan que la unidad está constituida por rocas gnéicas semejantes a las del Complejo Yaritagua, así como anortosita, granulita, anfibolita y piroxenita. Utilizando los trabajos de Lozano y Mussari (2008) y Grande (2013), se conoce que el Complejo contiene charnockitas máficas (enderbita), intermedias (mangerita) y félsicas (charnockita *s.s.*), que junto con la anortosita y el granófiro, integran la asociación ígnea anortositamangerita-charnockita-granito (AMCG).

Según Grande (2013) las rocas exhiben minerales remanentes de un metamorfismo de alta temperatura, como clino y ortopiroxeno, que se han preservado muy localmente y en escasa cantidad. Existen algunas texturas de alta temperatura, como antipertítica y mesopertítica, así como zircones redondeados con morfología de pelota de fútbol. Las charnockitas de Yumare tienen tanto orto- como clinopiroxenos producidos en un ambiente anhidro de altas temperaturas de la base de la corteza continental cuando ésta, probablemente debido a la delaminación litosférica entró en contacto directo con la astenósfera (Grande 2013).

La distribución del Complejo se restringe a los macizos de San Quintín y La Zurda al norte de poblado de Yumare, en el flanco Sur de la serranía El Charal - Cerro Misión - Agua Linda. Según los autores originales, el Complejo también se

extendía al cerro Salsipuedes, que hoy día se cartografía como Complejo San Julián (Grande 2013).

III.3.1.1 Metamorfismo

Según Grande (2013) las rocas exhiben minerales remanentes de un metamorfismo de alta temperatura, como clino y ortopiroxeno, que se han preservado muy localmente y en escasa cantidad. Existen algunas texturas de alta temperatura, como antipertítica y mesopertítica, así como zircones redondeados con morfología de pelota de fútbol. Las charnockitas de Yumare tienen tanto orto- como clinopiroxenos producidos en un ambiente anhidro de altas temperaturas de la base de la corteza continental cuando ésta, probablemente debido a la delaminación litosférica entró en contacto directo con la astenósfera (Grande, 2013).

Hay cambios retrógrados, pero es difícil discernir si son debidos a la superimposición de un metamorfismo regional de bajo grado durante el Mesozoico tardío Paleógeno sobre la mineralogía original, o si es más bien debida a alteración hidrotermal favorecida por el fallamiento que ha afectado estas rocas a lo largo de su historia. Consideramos que esta última hipótesis es la preferencial debido al hecho que las rocas atestiguan un alto grado de cataclasis, pero carecen de estructuras penetrativas. Los minerales de baja temperatura sustituyen a los piroxenos originales, a veces completamente, pero no dan indicios de un nuevo evento metamórfico de bajo grado, ni del desarrollo de una foliación (Urbani, 2014).

III.3.1.2 Contactos

El Complejo Yumare está en contacto de falla con el Complejo San Quintín, la "Formación La Luna" y el Metagabro de La Zurda, y está cubierto inconformemente por las formaciones Capadare y Casupal (Urbani, 2014).

III.3.1.3 Edad

Por la presencia de granulita y anortosita ilmenítica, originalmente se consideraron a estas rocas como remanentes de un bloque fallado del Escudo de Guayana, por lo tanto, interpretaron acertadamente una edad Precámbrica. Urbani et al. (2013) obtienen la edad de una muestra de gabro-cuarcífero charnockítico colectado en el cerro La Zurda. Por el método de U-Pb en cristales de zircón y analizados por LA-ICP-MA obtienen un intervalo de edades de 1.150-873 Ma donde no es posible obtener una edad concordia, pero utilizando el algoritmo "Zircon-tuff" se obtiene una edad de 919 ± 8 Ma (Neoproterozoico), lo cual coincide con la edad de la orogénesis Grenvilliano, y que puede interpretarse como la mejor aproximación para la edad de la cristalización de la roca (Urbani, 2014).

III.3.1.4 Correlación

Según Urbani (2013) este complejo es la única unidad constituyente de Yumare, y considera que, por sus características únicas, debe ser separado a los demás terrenos de la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa, con los cuales se ha correlacionado, pero no hay ninguna semejanza litológica. Bellizzia et al. (1976) indican que el Complejo contiene rocas gnéisicas semejantes a las de Yaritagua. (Urbani, 2014).

III.3.2 Formación San Quintín (Cretácico Temprano)

Bellizzia et al. (1976) utilizan en nombre de Formación San Quintín para designar una secuencia metavolcánica – metasedimentaria que aflora en el macizo de San Quintín, estado Yaracuy. Por la intercalación de roca ígneas y sedimentarias, Urbani et al. (2012) propone un cambio de nombre a Complejo San Quintín.

Según la descripción original (Bellizzia et al. 1976), la unidad comprende un conjunto de rocas volcánicas máficas débilmente metamorfizadas y una secuencia metasedimentaria de metarenisca, metalimolita, filita y escasos afloramientos de metaconglomerado. Los tipos de rocas metavolcánicas presentes son esencialmente metatoba de cristales y lítica, brecha y metalava en menor proporción. Las rocas metasedimentarias de esta unidad son esencialmente metarenisca de grano fino y color verde claro, blanco o crema, macizas o débilmente foliadas. Según Lozano y Mussari (2008), los principales tipos de roca volcánicas máficas (lava, toba, brecha volcánica) y rocas psamíticas, con metamorfismo de bajo grado, se presentan ligeramente foliadas. La unidad alcanzó la facies del esquisto verde (clorita). (Bellizzia et al. 1976, Lozano y Mussari 2008, Grande 2013).

Bellizzia et al. (1976) interpretan a esta unidad como una cobertura sedimentaria del Complejo Yumare. Pero los estudios de Lozano y Mussari (2008) distinguen los contactos como tectónicos, por lo cual esta interpretación no parece adecuada.

III.3.2.1 Metamorfismo

La unidad alcanzó la facies del esquisto verde (clorita) (Bellizzia et al. 1976, Lozano y Mussari 2008, Grande 2013).

III.3.2.2 Localidad tipo

Definida en la mitad sur del cerro San Quintín, a unos 10 km al norte de Yumare, estado Yaracuy. Hoja 6447, escala 1:100.000, Cartografía Nacional (Urbani, 2014).

III.3.2.3 Contactos

En contacto tectónico con la Formación San Quintín, se encuentra el Metagabro de La Zurda, una unidad también de metamorfismo de bajo grado metamórfico (facies de esquisto verde - clorita), y ambas a su vez yuxtapuestas tectónicamente con las rocas de facies de la granulita del Complejo Yumare (Lozano y Mussari 2008, Urbani et al. 2012, Grande 2013).

III.3.2.4 Edad

Bellizzia et al. (1976) interpretan una edad Cretácica con base a su presunta posición estratigráfica entre el Esquisto de Aroa (Jurásico - Cretácico) y la Formación Cerro Misión (Eoceno), además por su relación cercana con el Complejo Yumare señalan que no debe descartarse que la edad sea pre-Mesozoico. Dado que los contactos de la unidad son de falla, las inferencias con base a "posiciones estratigráficas" no son adecuadas. Pero si bien no se dispone de información

geocronológica específica para la unidad, a título provisional se prefiere mantener la edad Cretácico Temprano, como fuera sugerido por Bellizzia et al. (1976) con base a su presunta semejanza con algunas unidades volcano-sedimentarias de la faja Caucagua-El Tinaco, y su metamorfismo de bajo grado (clorita) (Urbani, 2014).

III.3.2.5 Correlación

Bellizzia et al. (1976), Bellizzia (1986) realizan comparaciones litológicas entre San Quintín y otras unidades de la Cordillera de la Costa, como la Filita de Las Placitas de la faja Caucagua-El Tinaco. No obstante, con el nivel actual del conocimiento estas correlaciones deben tomarse con mucha reserva (Urbani, 2014).

III.3.2.6 Otros estudios

A partir de los datos de Rodríguez (2020), se pudo realizar un mapa (Figura 9) con las concentraciones de titanio a lo largo del cerro San Quintín. En este mapa es posible observar que la mayor concentración de TiO_2 se encuentra hacia la parte central del cerro. De oeste a este el cerro se compone de una intercalación de anortositas, gneises anortosíticos, dioritas y anfibolitas con una mayor proporción de dioritas y gneises anortosíticos en el límite oeste, con anortositas hacia el centro-oeste del cuerpo, cambiando de nuevo a una composición con mayor abundancia de gneises anortosíticos, dioritas y anfibolitas hacia el este del mismo, además la presencia de rocas monzoníticas en el límite de falla al este, puede indicar la zona transicional de paso a la litología monzonítica o bloques desmembrados del cerro La Zurda por la acción de la falla que separa ambos cerros (Rodríguez, 2020).

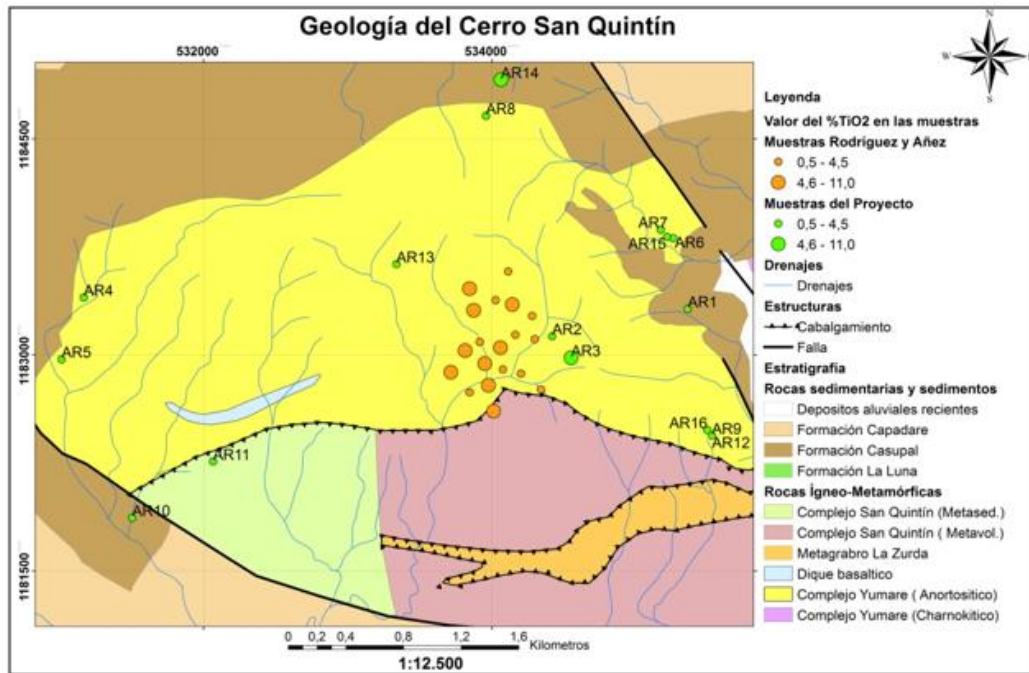


Figura 9.- Mapa de concentraciones de TiO₂, basado en las muestras recolectadas por Rodríguez y Añez (1978) y Rodríguez (2020). Tomado de Rodríguez (2020).

III.4 PETROLOGÍA DE LA FORMACIÓN SAN QUINTÍN

Según Grande (2013), afloran tres unidades litodémicas diferentes: a) El Complejo Yumare, integrado mayoritariamente por rocas anortosíticas, y minoritariamente posiblemente, por ortopiroxenita, ambas con evidente textura de adcumulado; b) Las Volcanosedimentarias de San Quintín, que consisten en una secuencia tectonizada y desmembrada, no metamorfizada, de lavas andesíticas y basálticas, tobas andesíticas líticas y cristalinas, limolitas carbonáticas, pelitas epiclásticas y conglomerados o aglomerados volcánicos; y c) El Metagabro de La Zurda, una napa emplazada por encima de la secuencia volcanosedimentaria anterior. A continuación, se presenta la tabla 5 que presenta las principales características de estas rocas:

Tabla 5: Características de las rocas encontradas en el Cerro San Quintín. Tomado de Grande (2013)

Roca	Ubicación	Características	Minerales asociados
Anortosita	Afloran en la mitad septentrional del cerro San Quintín	<ul style="list-style-type: none"> Muy meteorizado. Color fresco blanco a crema, en ocasiones, posee pequeños lentecitos verdes. El color de meteorización es marrón oscuro a ocre blanzuzco. Su tamaño de grano promedio es de 1-2 cm y en algunos sectores presenta textura gnéisica 	Plagioclasa (andesina), Clinopiroxeno, Anfíbol, Epidoto, ilmenita (alterada a leucoxeno)
Ortopiroxenita	Sólo se encontró como canto rodado	<ul style="list-style-type: none"> Tiene un color fresco negro-verdoso y en su mineralogía se puede observar cristales de ortopiroxeno con un tamaño promedio de 1 mm. 	Ortopiroxeno (hipersteno), Hornblenda, Clorita, magnetita hipidiomórfica a idiomórfica
Metagabro	Se pueden encontrar en la parte de las Volcanosedimentarias de San Quintín	<ul style="list-style-type: none"> Se trata de rocas gabro-anfibolíticas, con demasiados minerales hidratados. Muestran una fuerte deformación cataclástica, que permite clasificarlas de milonitas a ultramilonitas. Poseen ciertas bandas milimétricas a centimétricas sumamente trituradas y afaníticas que parecen ser pseudotaquilitas recrystalizadas 	Plagioclasa, Feldespato alcalino, Epidoto, Hornblenda, Actinolita, Clorita, Cuarzo, Calcita, Titanita, Apatito, leucoxeno, hematita y piritita
Anfibolitita	Este tipo litológico solo se encontró como bloque residual en el macizo San Quintín	<ul style="list-style-type: none"> Es una roca de color verde oscuro, con un tamaño de grano promedio de 0,6 mm y que está cortada por vetas de calcita. Texturalmente se observan anfíboles muy poco orientados, por lo que podría ser un tipo de cumulado hornbléndico original 	Hornblenda, Actinolita, Plagioclasa, Epidoto, Calcita

Roca	Ubicación	Características	Minerales asociados
Dique de basalto	Se localizó un dique que corta a la anortosita	<ul style="list-style-type: none"> No se observan efectos de contacto debido al pequeño volumen de este cuerpo magmático. Se trata de un basalto porfídico de composición toleítica, que presenta alteración hidrotermal. La matriz máfica originalmente vítrea, ha sido desvitrificada a un agregado afanítico de microlitos de clinopiroxeno cloritizado, magnetita y plagioclasa sericitizada 	Plagioclasa, Clinopiroxeno, Clorita, Magnetita,

III.5 GEOFÍSICA

En estudios realizados al norte de Yaracuy, usando los métodos geofísicos, como son la gravimetría, métodos magnéticos, entre otros, se ha encontrado una respuesta muy alta con respecto a estos métodos. Trabajos como el de Gómez y Sandoval (2008), y Urbani *et al.* (2014) han encontrado valores muy altos de magnetometría en la zona.

Se puede observar en la figura 10, en la zona nor-central, en la zona remarcada en negro, se encuentra la zona de San Quintín. En resultados obtenidos a través de métodos gravimétricos, se hallan valores máximos de anomalía de Bouguer, que podrían ser respuesta de dos de los cuerpos ígneo-metamórficos ubicados al norte de la Colonia Agrícola de Yumare, específicamente en los macizos La Zurda y Salsipuedes, que comprenden la Unidad Metagabro Anortosítico de Yumare (Gómez y Sandoval, 2008).

A estas rocas alóctonas se les puede atribuir, gracias a la respuesta gravimétrica, una profundidad y una extensión considerable, además de poseer una alta densidad por la posible procedencia de los mismos, ya que éstos podrían pertenecer a un bloque continuo o a fragmentos de un basamento de edad Proterozoico Tardío al norte de Venezuela, interpretado como el Grenvilliano por Grande en el 2007.

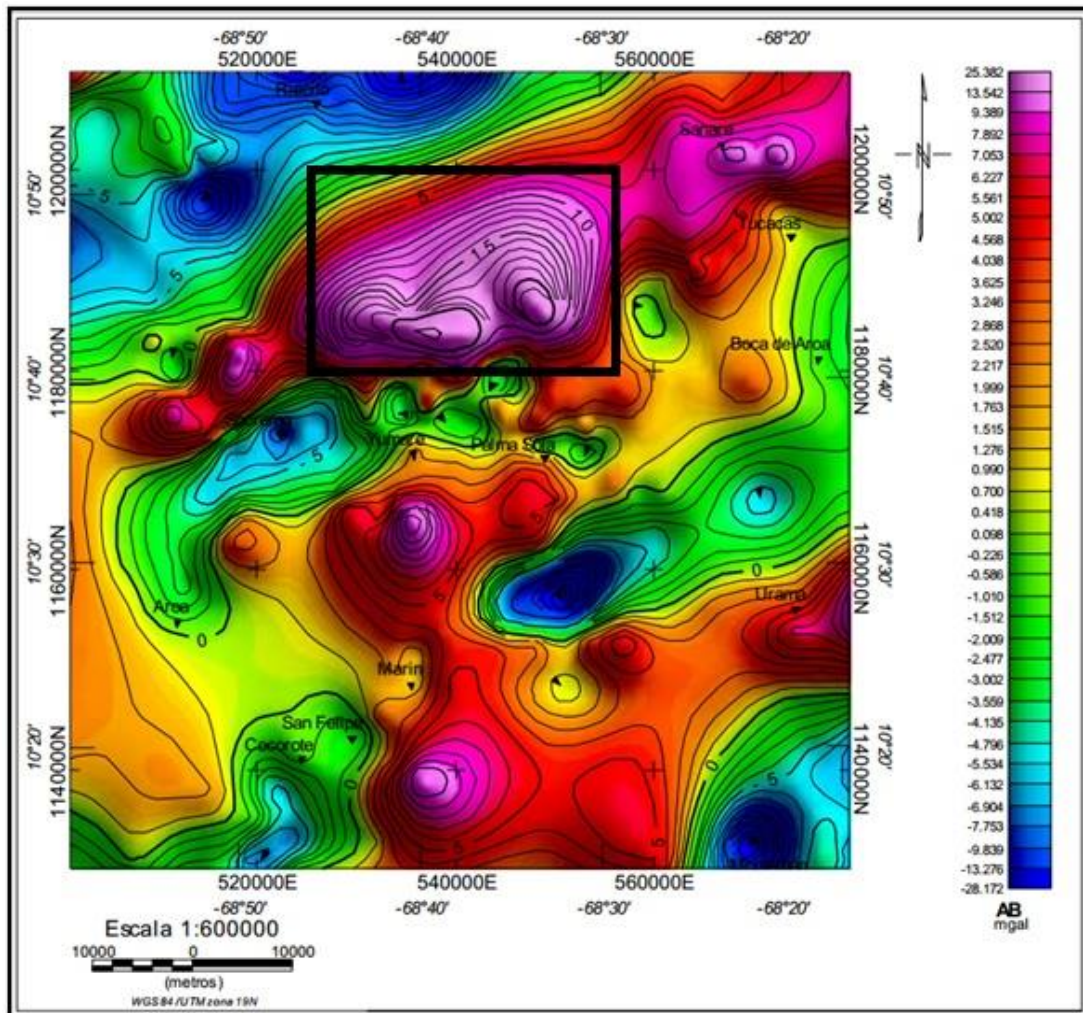


Figura 10.- Mapa residual de Anomalía de Bouguer realizado por el método de continuación analítica del campo 10000 m hacia arriba. En el recuadro negro se encuentra la zona de San Quintín. Modificado de Gómez y Sandoval (2008).

Al noroeste los altos valores de densidades también se extienden, decreciendo en magnitud en dirección hacia el oeste, por la existencia de los cuerpos ígneo-metamórficos, representados por los Esquistos de Aroa, Serpentina, las Metavolcano-sedimentarias de San Quintín y el Metagabro Anortosítico de Yumare, que afloran en los macizos de Tarana y San Quintín (Gómez y Sandoval, 2008).

En el estudio de profundidades de los datos gravimétricos por el método de deconvolución de Euler, (Figura 11) se muestra que las profundidades se encuentran en un rango de 2000 hasta 9000 m, donde al sur de los cuerpos ígneo-metamórficos se hallan profundidades para la Unidad Metagabro Anortosítico de Yumare entre 3000 y 5000 m, pudiendo llegar hasta 6000 m en algunos de éstos (Gómez y Sandoval, 2008).

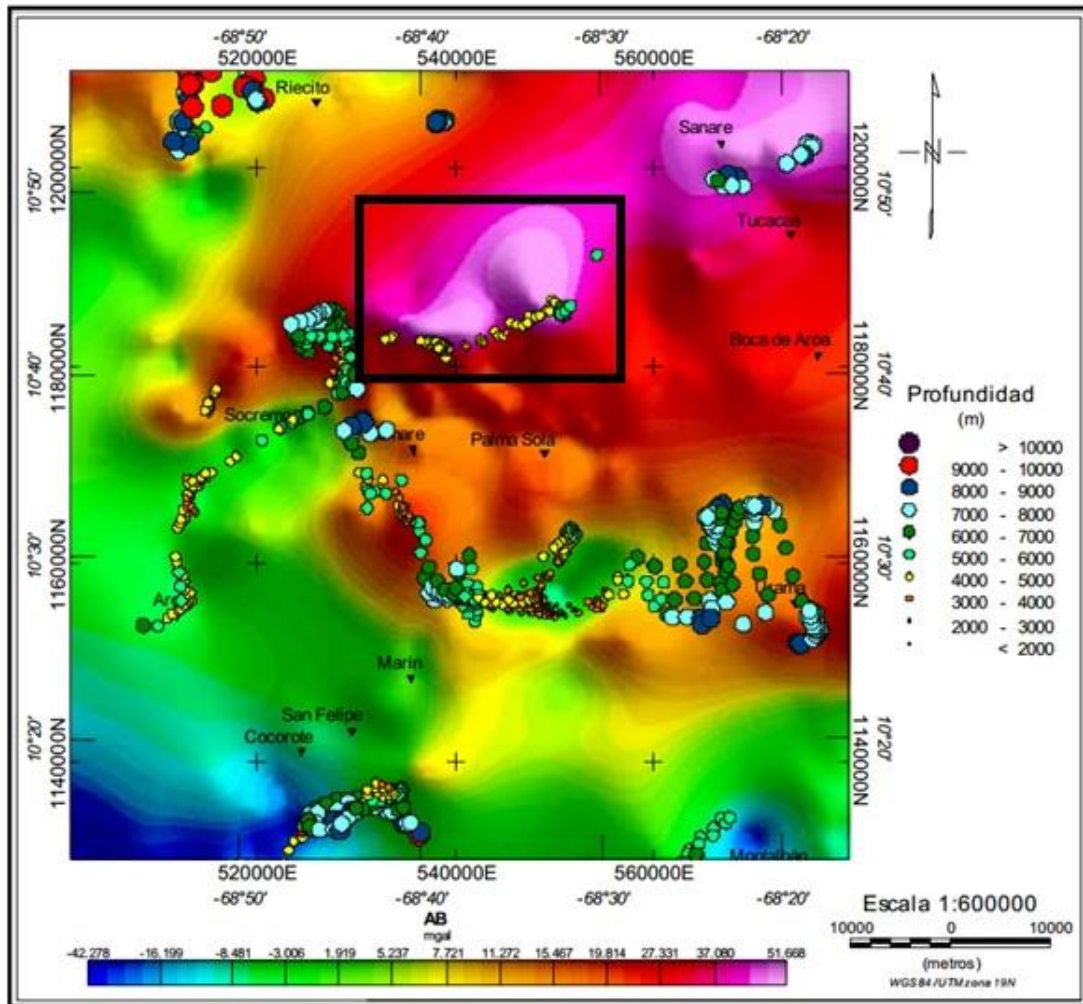


Figura 11.- Mapa de ubicación en profundidad de las posibles fuentes gravimétricas obtenido por el método de deconvolución de Euler. El recuadro negro señala la zona de San Quintín. Modificado de Gómez y Sandoval (2008).

Al norte, en la figura 12, en la región de Yumare que corresponde a los cuerpos ígneo-metamórficos presentes al norte de la Colonia Agrícola de Yumare, se presentan el más alto gradiente, aproximadamente de 2,8 gammas/km (Gómez y Sandoval, 2008).

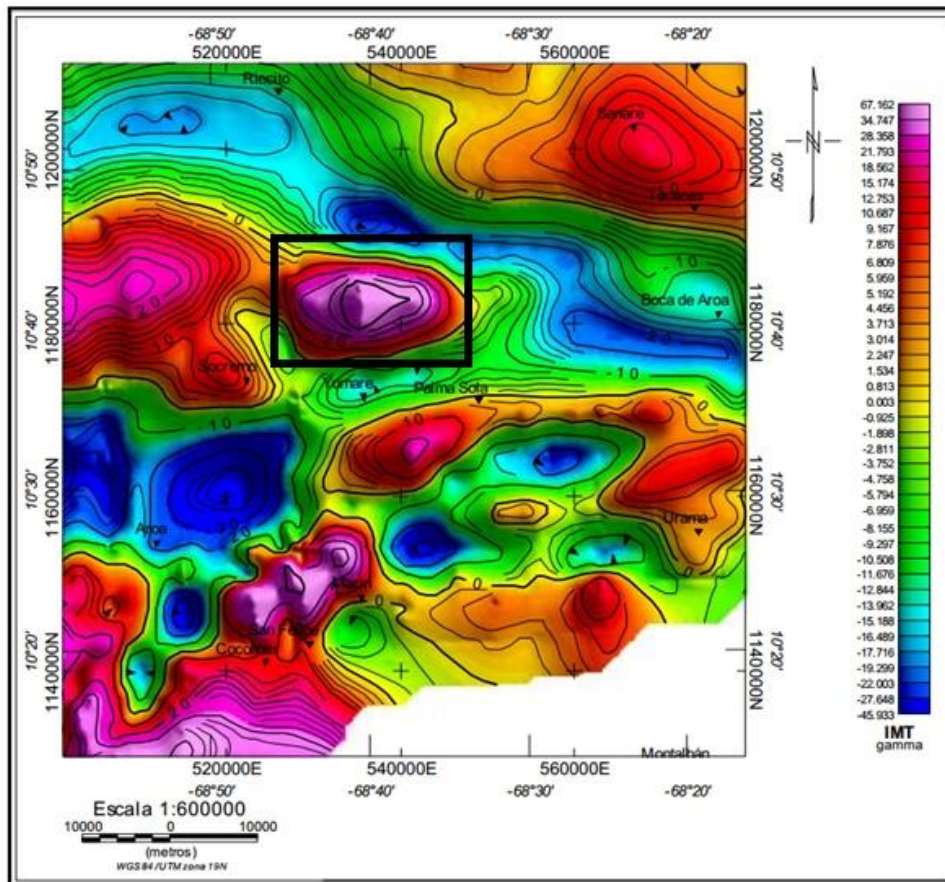


Figura 12.- Mapa residual de la Intensidad Magnética Total a una altura de 2000 m s.n.m. realizado por el método de continuación analítica del campo 10000 m hacia arriba. En el recuadro negro se encuentra la zona de San Quintín. Modificado de Gómez y Sandoval (2008).

En el estudio de profundidades realizado a los datos magnéticos por deconvolución de Euler (Figura 13) se muestran profundidades desde 1000 a 5000 m, notándose que alrededor del macizo de San Quintín, representado por las unidades Metagabro Anortosítico de Yumare y las Metavolcano Sedimentarias de San Quintín, se hallan profundidades de 5000 m (Gómez y Sandoval, 2008).

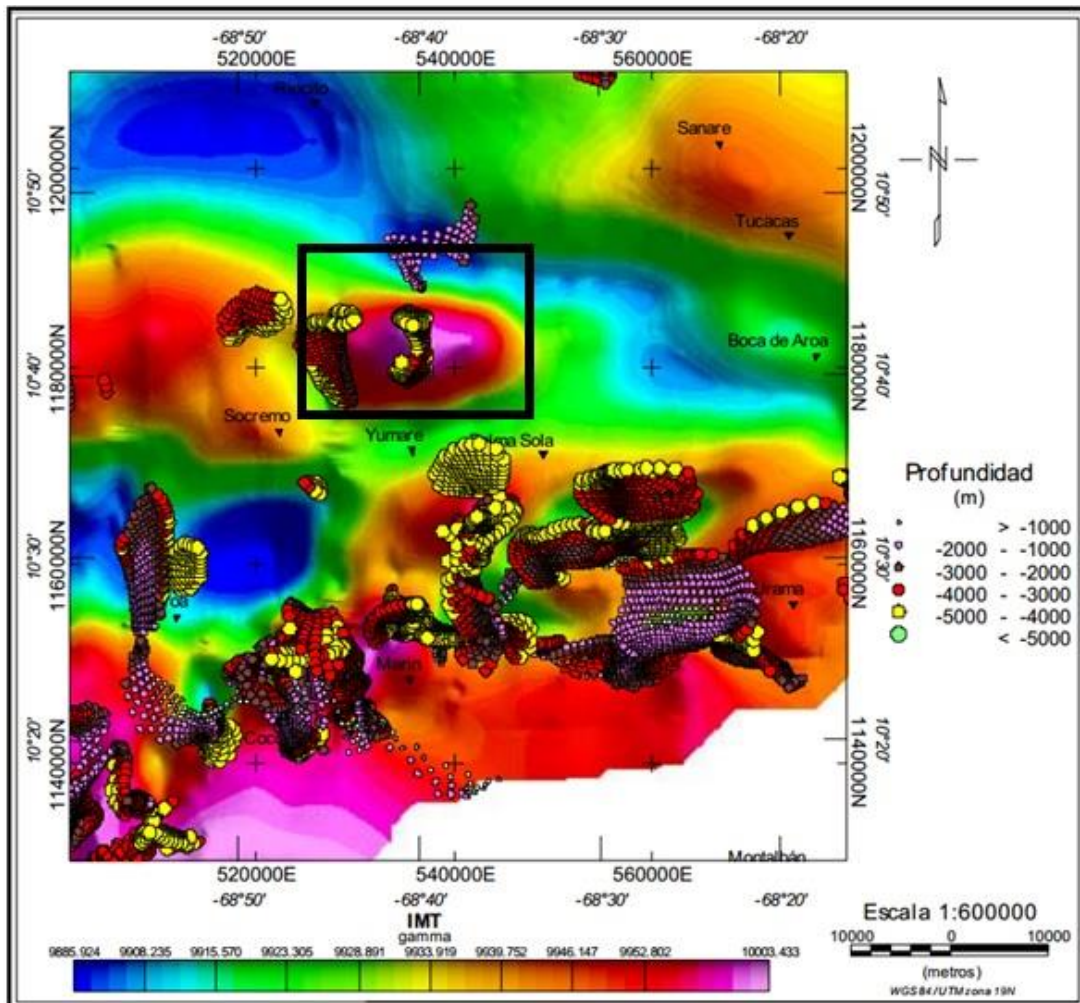


Figura 13.- Mapa de ubicación en profundidad de las posibles fuentes magnéticas obtenido por el método de deconvolución de Euler. En la zona señalada en negro se encuentra San Quintín. Modificado de Gómez y Sandoval (2008).

En el modelo B-B' (Figura 14), se muestran las mismas profundidades descritas anteriormente al norte del modelo A-A', corroborando así los espesores y ubicaciones de las formaciones expuestas. Además, se muestran los cuerpos ígneometamórficos que afloran en los macizos San Quintín, La Zurda y Salsipuedes, representados por el Metagabro Anortosítico de Yumare, como un bloque continuo en profundidad que aflora en los macizos mencionados por la acción de un conjunto de fallas de alto ángulo, y que alcanzan sus mayores espesores al oeste del perfil. También se muestra la unidad Metavolcano Sedimentaria de San Quintín, que aflora

en el macizo con el mismo nombre, en contacto con el Metagabro Anortosítico de Yumare, con una profundidad de 700 m (Gómez y Sandoval, 2008).

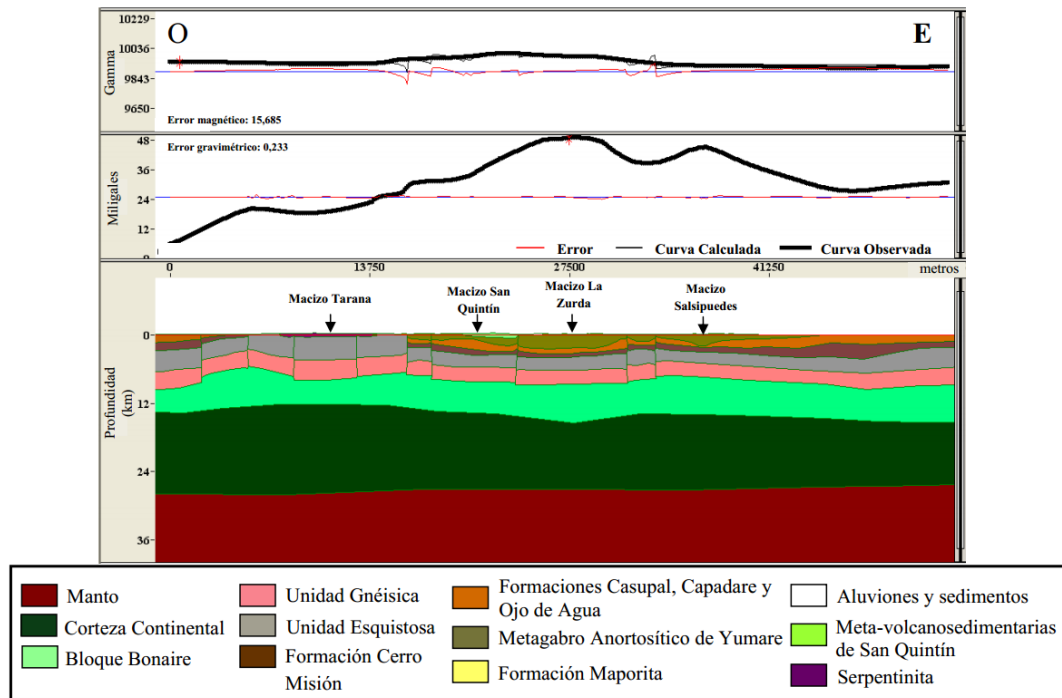


Figura 14.- Modelo geológico del perfil gravimétrico-magnético B-B'. Tomado de Gómez y Sandoval (2008).

En 1959, la empresa Gulf Research & Development Company realizó un levantamiento aeromagnético del noroccidente del país, del cual sólo se conoce el mapa de contornos de la segunda derivada vertical del campo magnético total. El mayor pico positivo ubicado junto a su par negativo adyacente, alcanza una amplitud de 100 gammas y ocurre justamente sobre el cuerpo de anortosita ilmenítica de la mitad septentrional del cerro de San Quintín (figura 15). La explicación mineralógica se encuentra en la presencia de altas concentraciones de magnetita, ilmenita y hematita, tanto en la roca fresca, como en el material residual y aluviones de las quebradas (Urbani *et al.*, 2014)

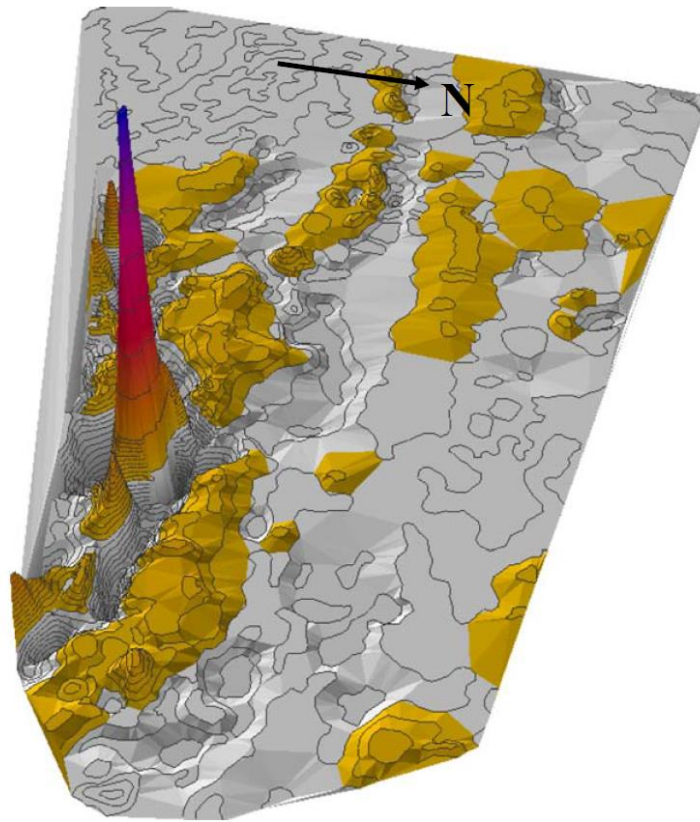


Figura 15.- Representación tridimensional de los valores de la segunda derivada vertical del campo magnético total (a partir de las curvas de isointensidades). Las zonas con mayores contrastes negativos y positivos coinciden con los cerros San Quintín y La Zurda. Tomado de Urbani (2014).

IV. MARCO METODOLÓGICO

Para esta investigación se propuso una metodología que consta de 3 etapas, como se observa en la figura 16. La primera corresponde a la recopilación de información que hay en el área sobre trabajos anteriores. Rodríguez y Añez (1978) realizaron estudios geológicos, químicos e incluso algunos modelos, así mismo, otros trabajos que recogen geología regional y petrología como los trabajos de Lozano y Mussari (2007), Grande (2013) y Urbani (2014), el trabajo geofísico de Gomes y Sandoval (2008) y los trabajos geoquímicos de Lugo (2020) y Rodríguez (2020).

La segunda etapa de digitalización y validación, consistió en la realización de mapas con la información recopilada y generada a partir de imágenes satelitales, trabajos geológicos y geoquímicos previos en el cerro San Quintín, y el análisis de los datos químicos obtenidos de las perforaciones realizadas por Rodríguez y Añez (1978).

Finalmente, para la tercera etapa se partió de las perforaciones realizada por Rodríguez y Añez (1978), en donde se hicieron estimaciones a partir de perfiles de profundidad, correlación del subsuelo usando los perfiles hechos por Rodríguez y Añez, se obtuvieron capas bidimensionales usando el método de interpolación del kriging ordinario y la representación tridimensional del yacimiento.

A continuación, se presenta el esquema metodológico (Figura 15), con todos los pasos que se siguieron y posteriormente se explica detalladamente cada etapa que se hizo durante la realización de este trabajo especial de grado.

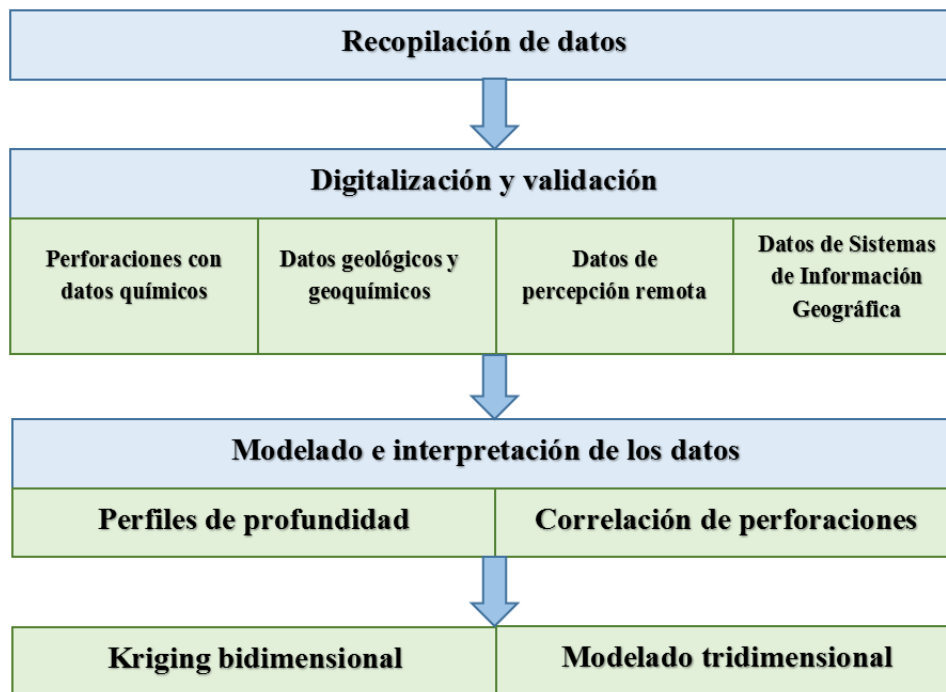


Figura 16.- Esquema metodológico

Para realizar análisis de los datos mediante los métodos estadísticos planteados en este trabajo, es necesario contar con los softwares adecuados para producir información espacial deseada y que sirva posteriormente para interpretación. Para este estudio, se realizó a través del uso de software como Microsoft Excel para datos estadísticos, QGIS para los mapas digitales, ENVI para los análisis de imágenes Landsat 8, Rockworks para la creación de los distintos modelos, utilizando kriging, y Stereonet para la realización de algunas redes estructurales.

IV.1 FASE I - RECOPIACIÓN DE DATOS

En esta primera etapa de la investigación se realizó una recopilación de información relacionada con la investigación, así como los datos para hacer efectivo el estudio. Lo que se realizó fue una búsqueda de referencias bibliográficas sobre

estudios geoquímicos, geofísicos y geológicos realizados en la zona de Yumare y específicamente en el Cerro San Quintín.

IV.2 FASE II - DIGITALIZACIÓN Y VALIDACIÓN

En esta etapa se realizó la digitalización de los datos generados por Rodríguez y Añez (1978) en la zona correspondiente a 29 perforaciones de las que se tiene información sobre las concentraciones de titanio, y para ello se usó el software Microsoft Excel 2019. Así mismo, se actualizó el mapa geológico elaborado por Urbani (2014). También se crearon mapas a partir de imágenes satelitales Landsat 8, y se crearon mapas utilizando la herramienta QGIS.

IV.2.1 Datos geológicos a partir de percepción remota

Las imágenes con corrección atmosférica además de ser utilizadas desde el punto de vista visual también son utilizadas para combinaciones R-G-B específicas en las que se desean resaltar características de la superficie (Romero, 2019). Para este trabajo de grado, se seleccionaron aquellas combinaciones más útiles tales como zonas de aluviones, contraste de litología, entre otros, ya que proporcionaban una mayor información visual a los elementos geológicos.

Con las diferentes combinaciones de bandas se pudo interpretar, por medio de las tonalidades, las informaciones geológicas referidas por otros autores (Franco, 2017 y Romero, 2019), ya que cada combinación de colores diferentes están asociados a distintos componentes físicos que no se pueden percibir con otras herramientas distintas a los sensores remoto.

La imagen satelital, LANDSAT-8, utilizada en esta tesis se obtuvo del servidor de datos *Earth Explorer*: <https://earthexplorer.usgs.gov> (Figura 17). Tomando en cuenta los siguientes criterios:

1. Se seleccionó como instrumento el Landsat 8 OLI/TIRS 2.
2. Se determinó el rango de fechas (1/ene/2021 – 20/abr/2021).

Para esta investigación se seleccionó la imagen LC08_L1TP_005053_20210811_20210819_01_T1, que tenía el menor porcentaje de cobertura de nubes y es la que presentó menos nubes en el área de estudio.

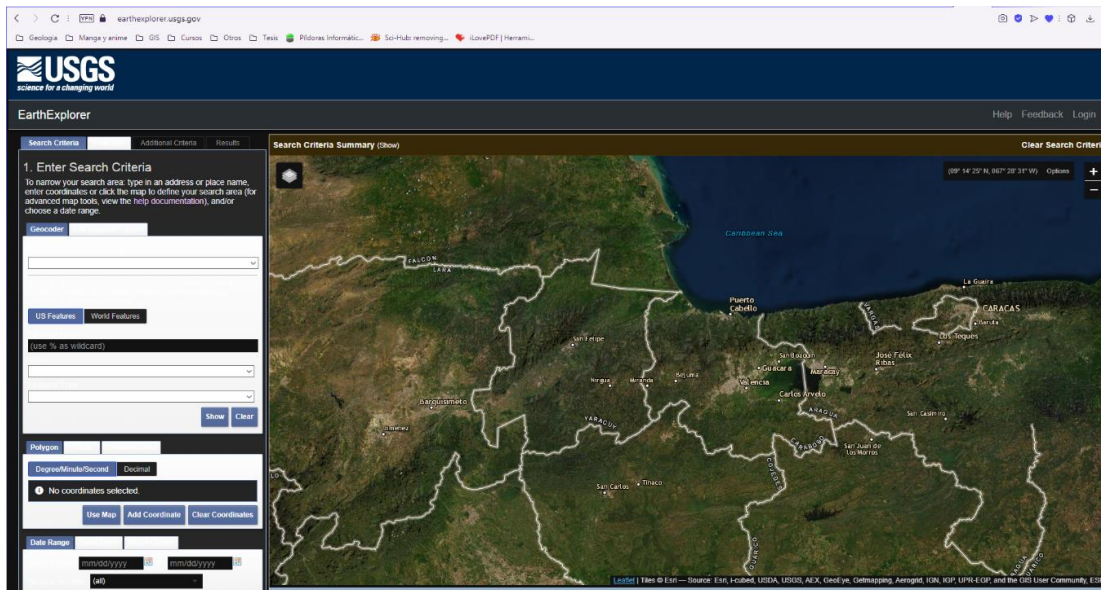


Figura 17.- Portal de la U.S Geological Survey o Servicio Geológico de Estados Unidos

La otra imagen, la cual corresponde con el DEM de la zona, se obtuvo del servidor de datos <https://search.asf.alaska.edu> (Figura 18) y se seleccionó el archivo ALPSRP276870200.

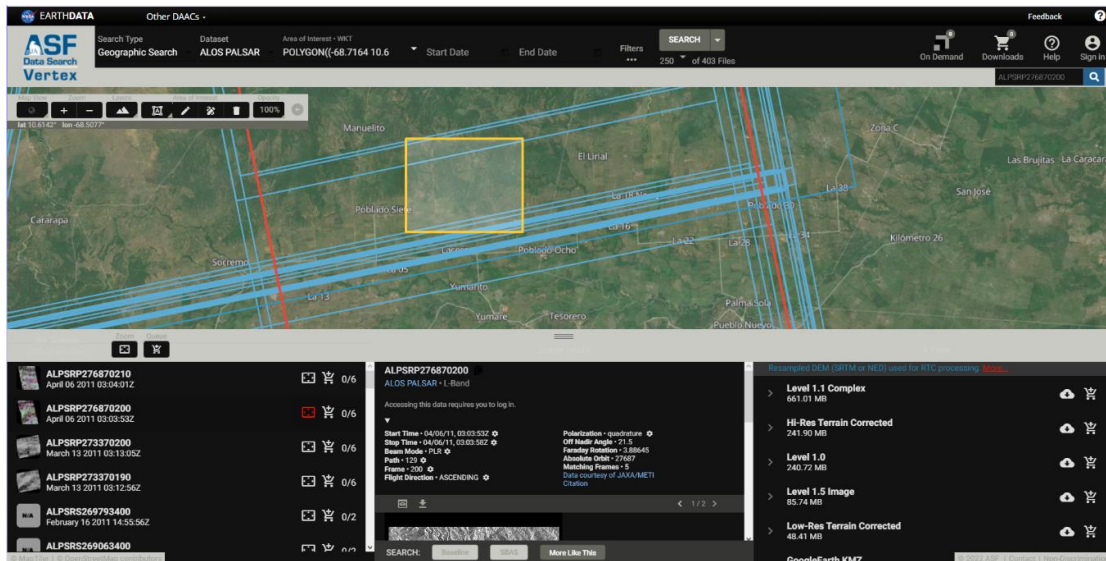


Figura 18.- Portal del ASF Data Search

IV.2.2 Preparación e incorporación de data en el SIG y procesamiento digital de imágenes

Esta etapa comprende dos procesos: el procesamiento de imágenes satelitales, la primera consistió en el procesamiento del DEM utilizando el software QGIS 3.24 y la segunda, en el procesamiento de imágenes satelitales mediante la utilización del software ENVI 5.3.

IV.2.3 Preprocesamiento de imágenes de percepción remota con ENVI 5.3

Con respecto al tratamiento digital de la imagen satelital LANDSAT-8, el uso de este tipo de imágenes multispectrales requiere de algunos procesos necesarios (corrección atmosférica y corrección radiométrica) para su posterior interpretación. Por esto, después de seleccionar la imagen satelital, se procedió a realizar un corte, máscara o selección del área de estudio dentro de la imagen para agilizar su tratamiento digital. Para este procedimiento y para los posteriores derivados utilizó el

programa ENVI 5.3. Finalmente, se procedió a realizar la corrección atmosférica y la corrección radiométrica a la imagen generada en el paso anterior.

Los llamados índices espectrales fueron desarrollados para trabajar con valores de reflectancia espectral de la superficie terrestre. Los niveles digitales no proporcionan esta información de manera directa, por lo tanto, hay que convertir los valores ND en valores de reflectancia. (Chuvieco, 1995). Este procedimiento se realizó en dos etapas: La primera, la conversión de ND a radiancia: corrección radiométrica, y la segunda, la conversión de radiancia a reflectancia aparente

La primera etapa se realizó mediante el algoritmo *Radiometric Calibration*. Se utilizó la escena multispectral cambiando la imagen de formato *BSQ* a formato *B11L* (bandas intercaladas por líneas). Por su parte, la segunda etapa se realizó mediante el uso del algoritmo *FLAASH Atmospheric Correction*, donde se generó una ventana emergente en la cual se utilizó la imagen en formato *BIL* para realizar la fusión de cada una de las bandas en un solo archivo o imagen para su fácil manejo, también se agregaron datos de la imagen tales como: latitud, longitud, altitud del sensor, elevación de la superficie del terreno, tamaño del pixel, fecha y hora de vuelo en que se tomó la escena. La imagen resultante mediante este preprocesamiento es denominada imagen FLAASH (Figura 19), y es la base para los procesamientos posteriores (Romero, 2019).



Figura 19.- Imagen Flaash de San Quintín usando las bandas 4-3-2. Dentro del recuadro rojo se encuentra el Cerro San Quintín.

Posteriormente con esta imagen Flaash, se procedió a seleccionar diferentes bandas para así obtener otras imágenes que ayudaran a la interpretación de la zona. Las combinaciones de bandas de mayor utilidad corresponden a las bandas 4, 5,6 y 7, dando como resultados imágenes con las siguientes combinaciones R-G-B de Landsat 8: 5-4-3 y 7-5-3. Así mismo, la interpretación visual de las diferentes imágenes generadas por la combinación de banda se realizó en base a la recopilación bibliográfica realizada durante la investigación.

IV.2.4 Procesamiento de imágenes usando QGIS 3.24

La siguiente etapa es la generación de mapas a partir de imágenes satelitales. Esto ayuda a entender los procesos geológicos ocurridos en el área, como el relieve, lo cual es importante a la hora de realizar futuras perforaciones y delimitar

la zona con mejor potencial para la explotación, ya que, si se realizan perforaciones en zonas con fallas, o en zonas de drenajes, los resultados de estas perforaciones se veras influenciados por esto.

En primer lugar, se procedió a hacer un corte por máscara para seleccionar el área de interés. Esto se realizó para poder seleccionar la zona de interés y al mismo acelerar los procesos, debido a que, si se realiza con toda la zona que trae el archivo, los procesos serán muy lentos, utilizarán mucha memoria y mostrarán zonas que no son de interés para esta tesis.

Posteriormente se usó la herramienta de SAGA, y dentro del rango de GRASS, denominada *r.fill.dir* (Figura 20). Esta herramienta filtra y genera una capa de elevaciones sin depresiones. Esto ayuda a rellenar las depresiones y obtener un modelo más cercano a la realidad, al mismo tiempo ayuda a la hora de generar un modelo hidrográfico.

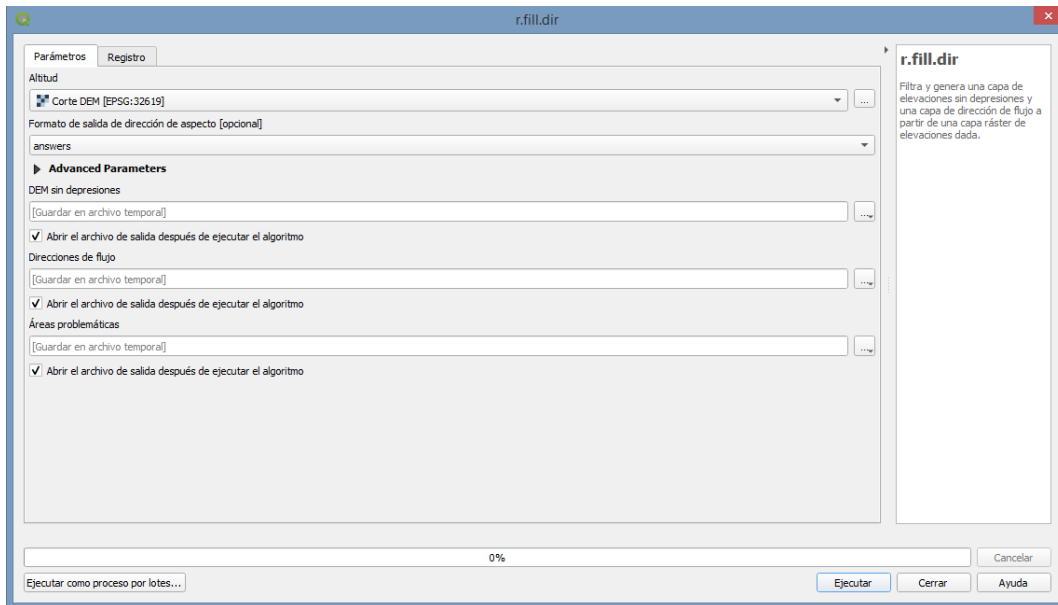


Figura 20.- Pantalla para la selección de datos para la eliminación de depresiones

Seleccionando en el formato *answers* para generar un archivo de corte DEM sin depresiones. Este procedimiento se repitió 4 veces hasta que se eliminaron totalmente las depresiones y quedó un DEM listo para el análisis.

IV.2.4.1 Modelo Digital de Iluminación y Sombra o HillShade

Tomando como base el DEM y utilizando las herramientas del SIG se generó un Modelo Digital de Iluminación y Sombras (Hillshade). Se realizó mediante los algoritmos Raster – Análisis – Mapa de Sombras (HillShade). El otro Hillshade se hizo bajo el mismo procedimiento solo que se marcó la casilla de *Sombreado combinado* (Figura 21) y luego en la sección Propiedades – Simbología se cambió el gradiente de color mínimo a 145.

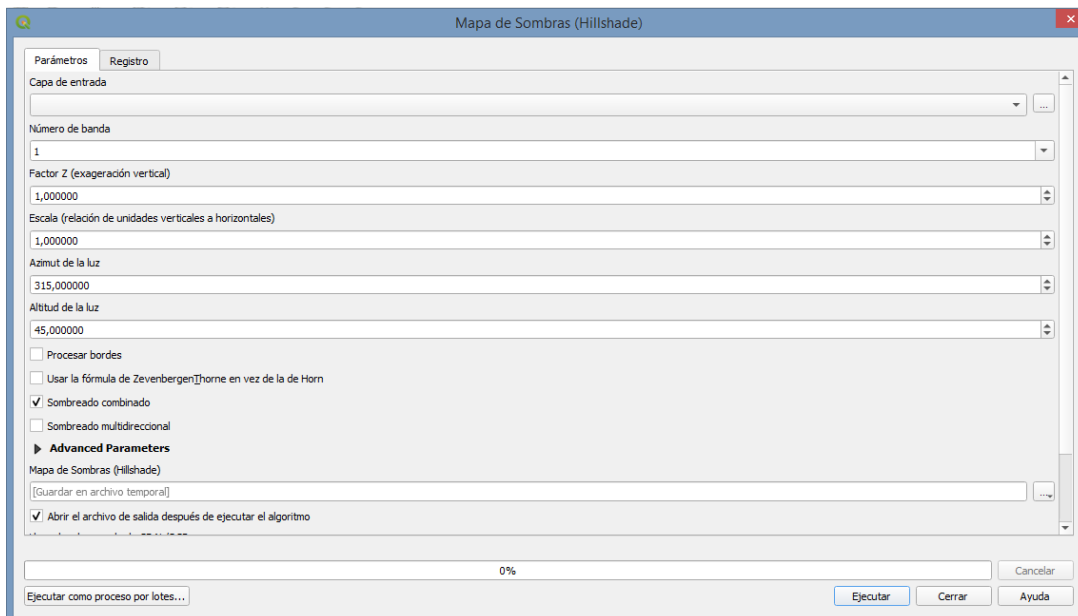


Figura 21.- Creación de Hillshade con la opción sombreado combinado

IV.2.4.2 Dirección de los drenajes

La dirección de los drenajes da una idea de cómo son los drenajes y como son las estructuras, ya que tener una dirección hacia la cual bajan los drenajes indica la pendiente, las crestas y otro tipo de estructuras en la zona. Para ello se comenzó realizando el Flow Directions. Primero se hace busca en la pestaña *Procesos > Caja de Herramientas de Procesos* y ahí se selecciona *Fill sinks (Wang & Liu)*. La opción *Minimum Slope (Degree)* se deja por defecto (Figura 22).

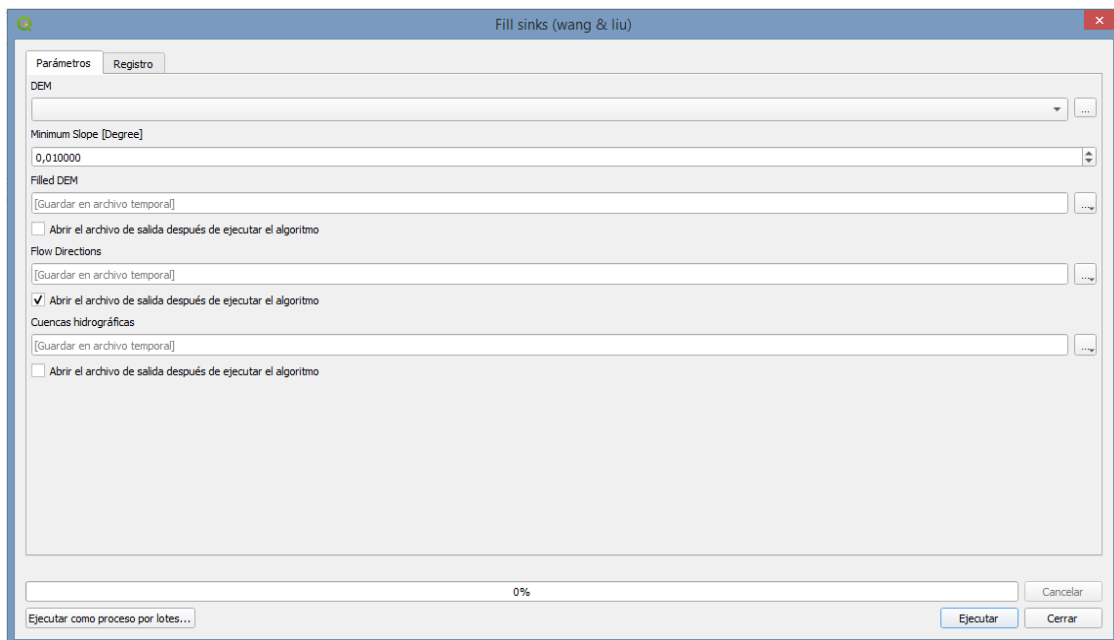


Figura 22.- Creación de Flow Directions usando Fill sinks (Wang & Liu)

Utilizando la parte de Simbología, se asigna un estilo *Valores en Paleta/Unicos*, y se usó una paleta de colores con ocho categorías, desde -1, 0 hasta 7. Seguidamente, se eliminó la categoría -1, que corresponde a zonas donde no hay flujo, así queda un raster con 8 categorías, de la 0 a la 7 que corresponden con las direcciones que se muestran en la figura 23.

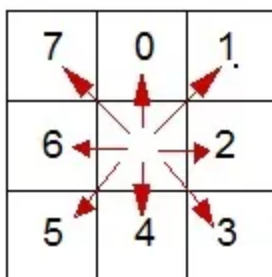


Figura 23. Direcciones de flujos.

Para crear las flechas se busca en el menú *Vectorial > Herramientas de investigación > Puntos regulares*. Luego, en la caja de dialogo, en *Extensión de entrada* se seleccionó el raster *Flow Direction*. En *Espaciado* se dejó en 300 y en *Desplazamiento desde esquina superior* se dejó en 100 (Figura 24).

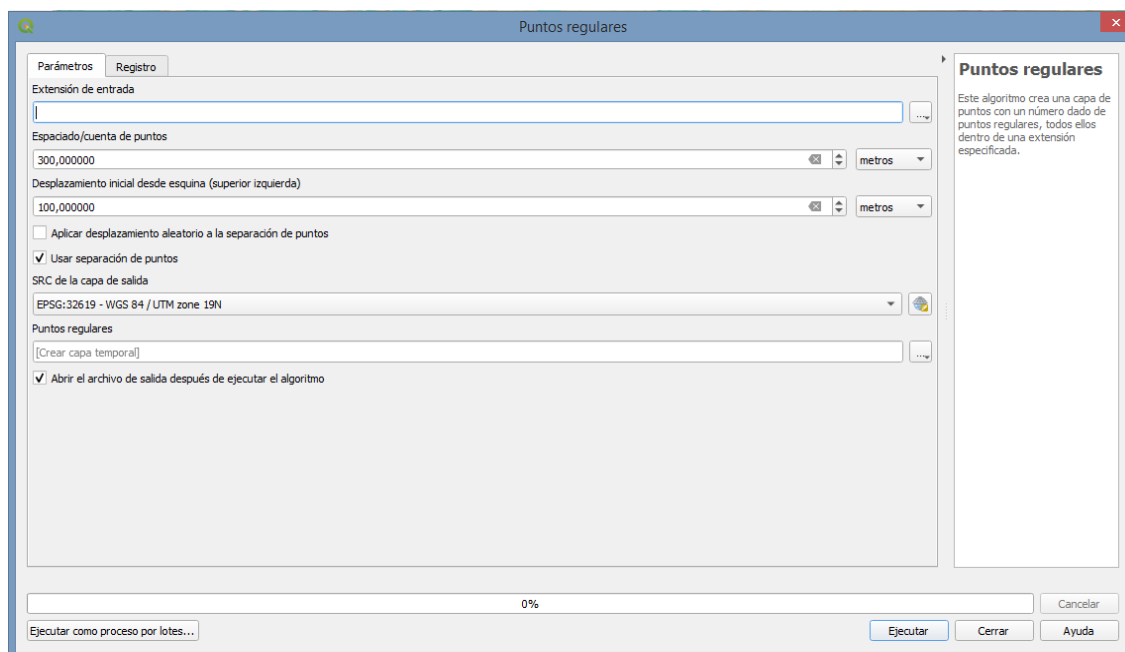


Figura 24.- Creación de las flechas de dirección

Luego se asignó a cada punto el código que corresponde con la dirección de flujo, para ello se utilizó el *Plugin Point Sampling Tool*. En menú *Complementos >*

Analyses > Point Sampling Tools. Seguidamente, en Layer Contains Sampling Points > Puntos regulares. En layers With Fields/Bands to get Values > Flow direction. Finalmente, se da un nombre y ubicación al archivo de puntos de salida, en este caso se nombró “Direccion_flujo.shp”. Al hacer eso se generó una capa de puntos, luego en la tabla de atributos, aparece un campo que tiene el nombre Flow_Direc.

Para la rotación de las flechas, hay que abrir la calculadora de campo, seleccionar la opción *Crear un nuevo campo*. En *Nombre de Campo de salida > Angulo*, en *Tipo de campo de salida > Entero*. Ahora se asigna un ángulo de rotación a la flecha mediante una condicional, y se copia y pega el texto que aparece en la figura 25.

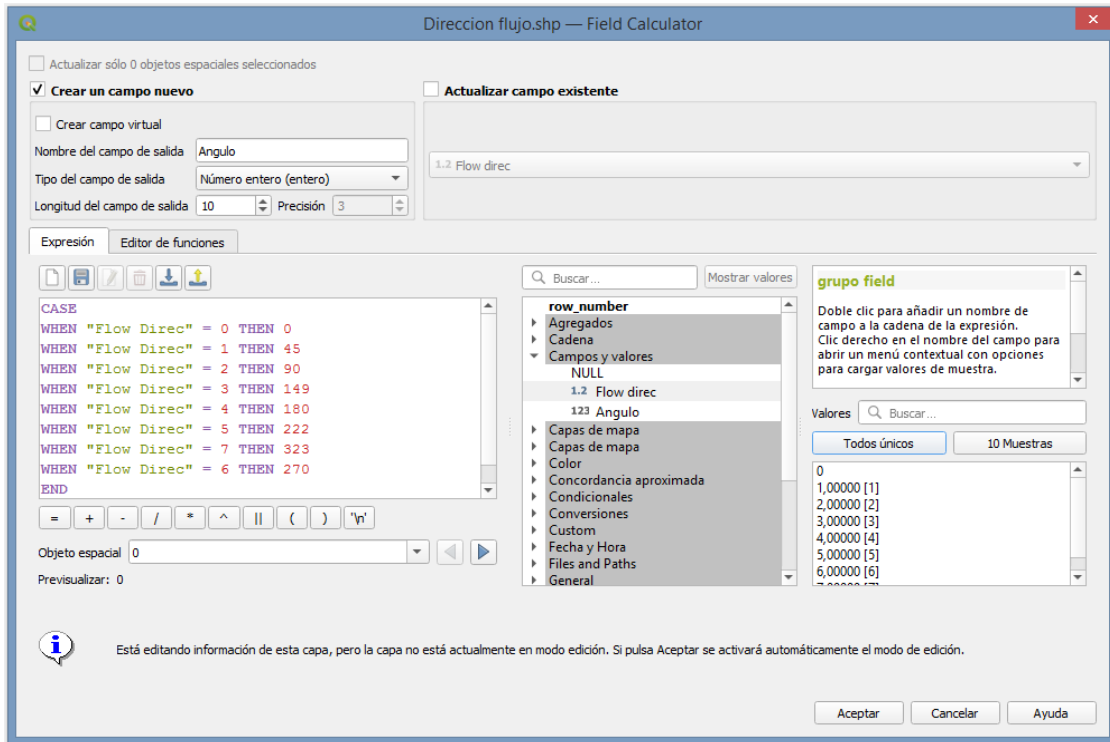


Figura 25.- Parámetros para colocar en el campo de expresión

A continuación, se selecciona la capa *Dirección_flujo.shp*, en el *Panel de Estilos > Simbología* seleccione la flecha (símbolo Arrow o Flecha), y se asigna un

color que resalte. Seguidamente, en *Panel de estilos*, en *Rotación*, se le da clic al botón en el extremo izquierdo, luego en *edit*. En la caja de dialogo de *expresiones*, seleccionamos en *Campos y Valores > Angulo*, esto hará que la rotación de cada punto sea acorde al atributo almacenado en el *campo Angulo* (Figura 26).

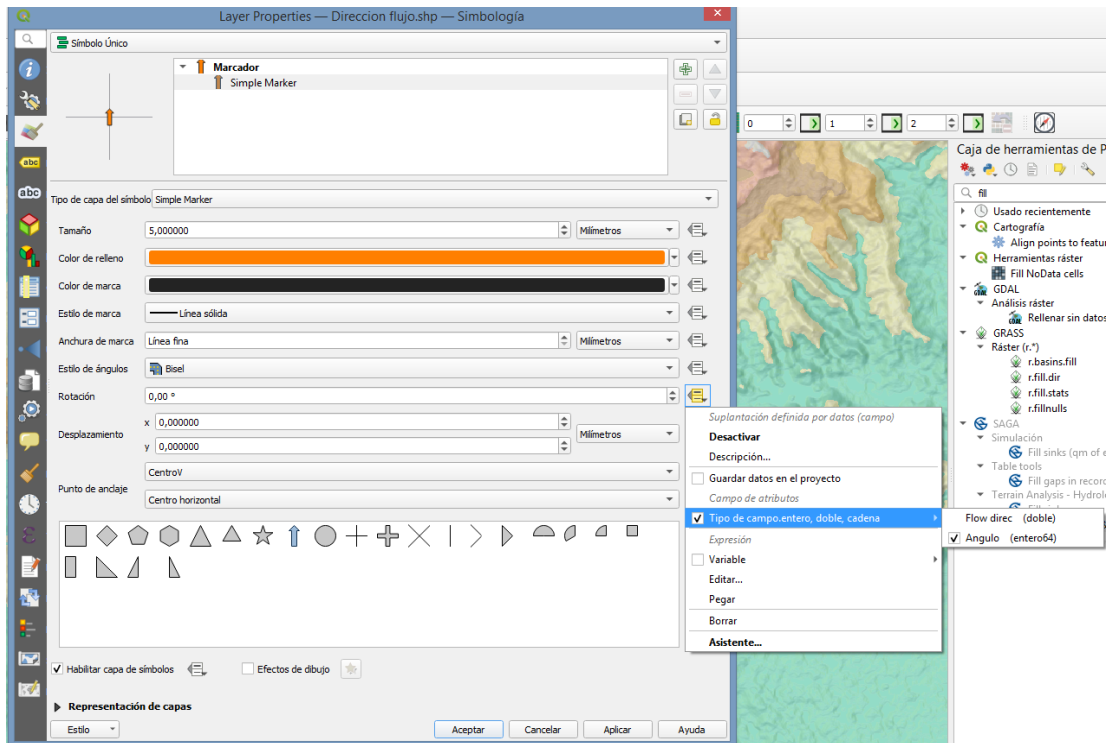


Figura 26.- Seleccionando la rotación de las flechas

Una vez terminado esto, las flechas rotan en dirección del ángulo y así es posible ver la dirección por la que fluyen los drenajes.

IV.2.4.3 Capa de Pendientes de las laderas

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno, a mayor inclinación mayor valor de pendiente, la misma puede ser expresada en porcentaje (%) o grados (°). Para esta tesis, el mapa de pendiente generado esta

expresado en grados y su clasificación se realizó en 4 partes, menores a 5°, de 5° a 15°, de 15° a 30° y de 30° a 45°, se decidió hacerla hasta 45° ya que no se observan pendientes mayores a esta inclinación. Esta clasificación contiene el código de colores con el cual se identificaron los sectores correspondientes a cada rango. El procedimiento se realizó mediante los algoritmos *Raster – Análisis – Pendiente* (Figura 27)

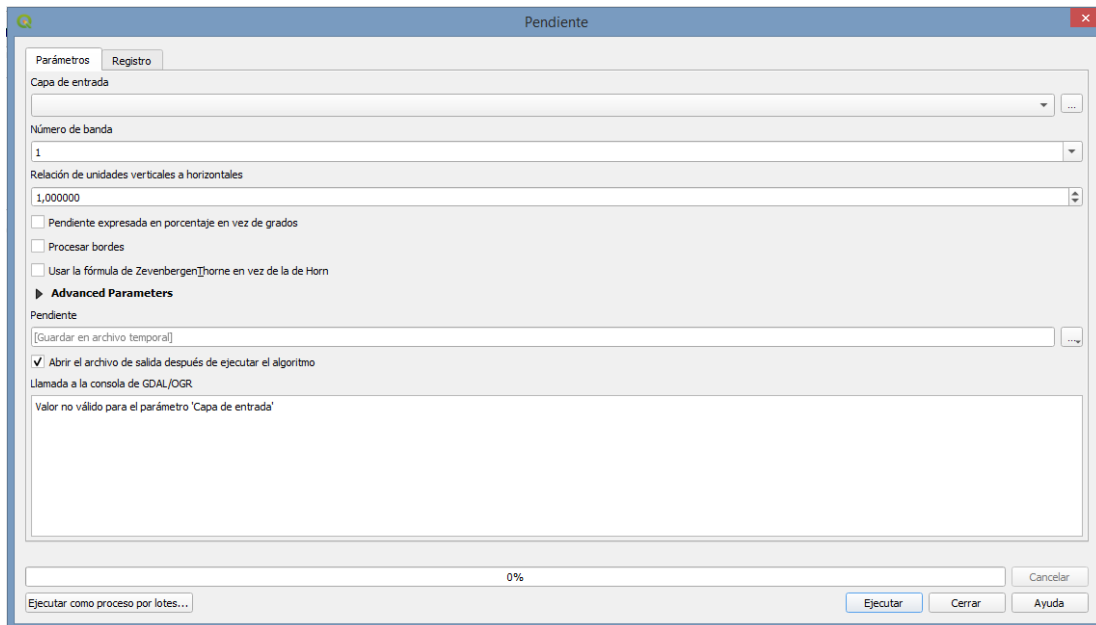


Figura 27.- Procedimiento para crear la pendiente de la zona

IV.2.4.4 Lineamientos estructurales

Con la ayuda del mapa de sombras se logró identificar elementos topográficos como: Líneas de cresta, estribaciones y entallamientos de los drenajes, las cuales no siempre son fácil de identificarse con el mapa topográfico. Estos lineamientos generalmente están asociados además con pliegues y fallas. Esto se logró haciendo zoom al mapa de sombras y buscando las líneas topográficas más destacadas.

Estos lineamientos evidenciados se tomaron como referencia para realizar un diagrama de rosas, el cual representa la orientación y frecuencia del rumbo de las estructuras en un semicírculo dividido en cuatro cuadrante de 90°, orientado en su parte medio con el norte (N) y a la derecha e izquierda: este (E) y oeste (O) respectivamente. También se realizó un diagrama de rosas con las direcciones de las fallas reportadas por Lozano y Mussari (2007).

IV.2.4.4.1 Criterios y herramientas tomadas en cuenta para la interpretación estructural

La interpretación estructural del área de estudio está basada principalmente en la observación de evidencias y rasgos característicos del relieve generado por las fallas y pliegues que han deformado la geología del área. Para ello se realizó inicialmente la interpretación de los primeros productos generados mediante la digitalización, interpretación y procesamiento de la data espacial: mapa geológico, Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) y mapa de pendientes.

Entre los múltiples productos generados en este trabajo especial de grado, el que mayor información proporcionó fue el Modelo Digital de Iluminación y Sombras (MIDS), a fin de evaluar, las sombras generadas por las geoformas asociadas a las expresiones superficiales de las estructuras de deformación del terreno. Así mismo, se utilizaron las imágenes satelitales procesadas según las distintas bandas para obtener una interpretación, no solo de la parte estructural sino también de las tasas de sedimentación.

II.2.4.5 Geofísica

Para estos mapas se localizó en Cerro San Quintín dentro de los mapas generados por Gómez y Sandoval (2008). Luego se procedió crear tanto el mapa de Anomalías de Bouguer como el mapa de Intensidad Magnética Total, usando de referencia el mapa de sombras de San Quintín, y los registros geofísicos.

II.2.4.6 Localización de las muestras

Para este mapa, se tomó como referencia el mapa de sombras y luego sobre él, se insertaron las localidades donde se tomaron muestras y el tipo de muestra tomada, durante todas las campañas donde hay registros de localidad. Es importante destacar que solo se incluyeron las muestras de rocas, ya que lo que se buscaba era localizar las zonas en donde se han recogido anortositas.

II.2.4.7 Geoquímica

Para esta etapa, se recopiló la información generada por Rodríguez y Añez (1978) para ser analizada. Primero se hicieron tablas con las concentraciones químicas encontradas, luego se analizaron, y posteriormente, con la ayuda del software Microsoft Excel, se crearon diagramas para mostrar la relación entre los distintos óxidos, para poder analizar la geoquímica de dichas muestras y compararla con los trabajos previos, principalmente el de Grande (2014) para comparar las mineralogías.

IV.3 FASE 3 - PROCESAMIENTO DE LOS PERFILES DE SONDEO Y REALIZACIÓN DE MODELOS

Para esta etapa se utilizó el software Rockworks 16, ya que este programa permitió actualizar los perfiles de los sondeos realizados por Rodríguez y Añez (1978) y además permitió crear modelos y mapas a partir de los datos de perforaciones realizados también por Rodríguez.

La primera etapa es la creación de la sección de datos dentro del programa. Para ellos se suministró la información publicada por Rodríguez y Añez (1978) sobre el sondeo como el punto de perforación, ubicación, y, gracias a las herramientas GIS, se pudo conocer la elevación en superficie, y esto se repitió con los 29 sondeos de los que se tenía información.

Luego se procedió a introducir la información que se tenía sobre la litología. Rodríguez y Añez (1978) dividió los sondeos en 3, el saprolito en el nivel superior, el nivel de anortosita y el nivel de la roca fresca del Complejo Yumare (Figura 28). En esta etapa se procedió a introducir las distintas profundidades a las que se encuentran los cuerpos rocosos (figura 29), así como asignarles un color para diferenciarlos entre ellos.

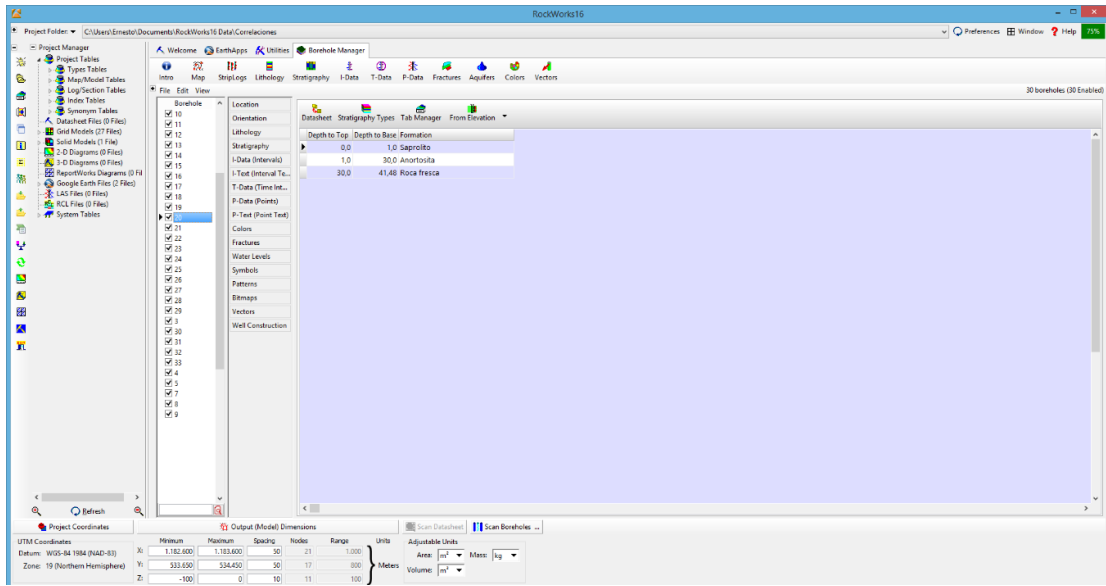


Figura 28.- Base de datos con los datos de perforación

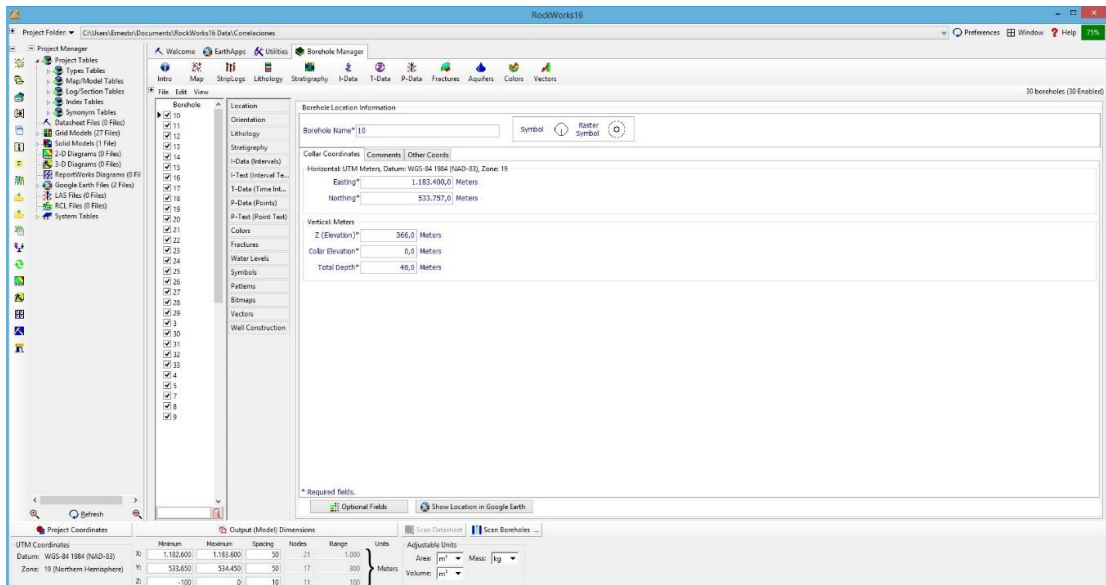


Figura 29.- Creación de la base de datos en el programa

El siguiente paso fue la creación de los perfiles de los sondeos. Para ellos se procedió a utilizar la herramienta de perfil, denominada *Profile* en el programa, ya

que se encuentra en inglés, y que se observa en la figura 30. Aquí se seleccionaron los sondeos a los que interesaba hacerle el procesamiento, y siempre siguiendo los realizados por Rodríguez, y se procedió a crear los perfiles.

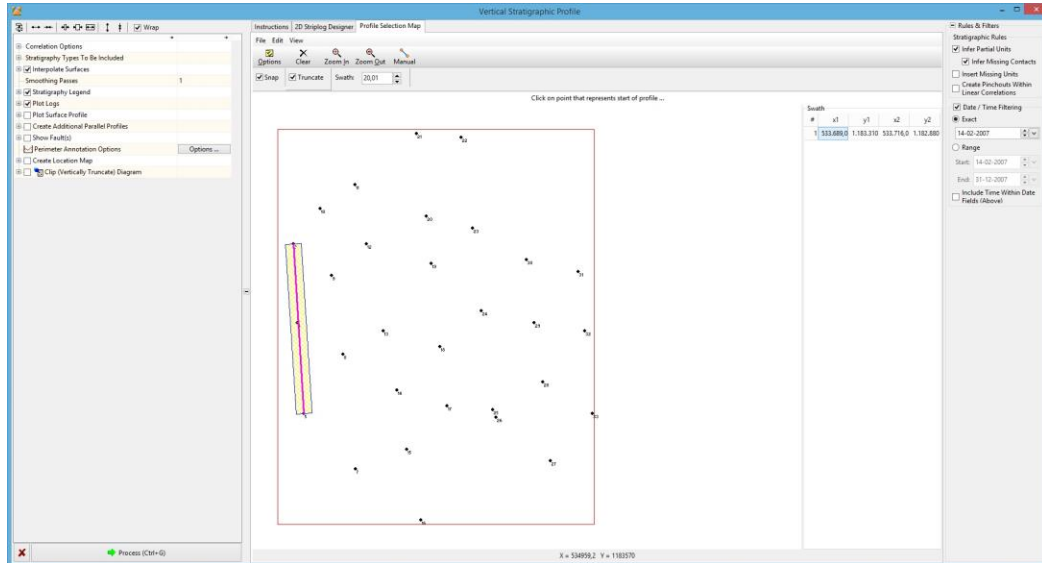


Figura 30.- Procedimiento para la creación de los perfiles de las secciones

Luego se crearon las secciones proyectadas. Para este procedimiento se utilizó la herramienta *Fence Program*, que se puede observar en la figura 31.

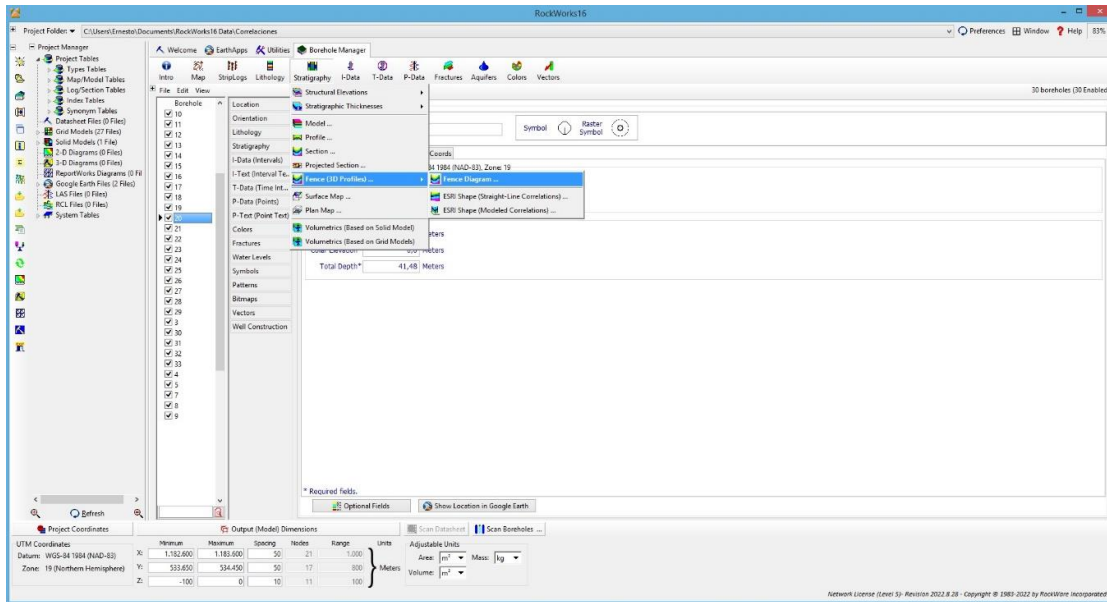


Figura 31.- Ubicación de la herramienta Fence Diagram

Luego dentro de esta herramienta se procedió a crear un mallado siguiendo el patrón que se creó durante los perfiles, como se observa en la figura 31.

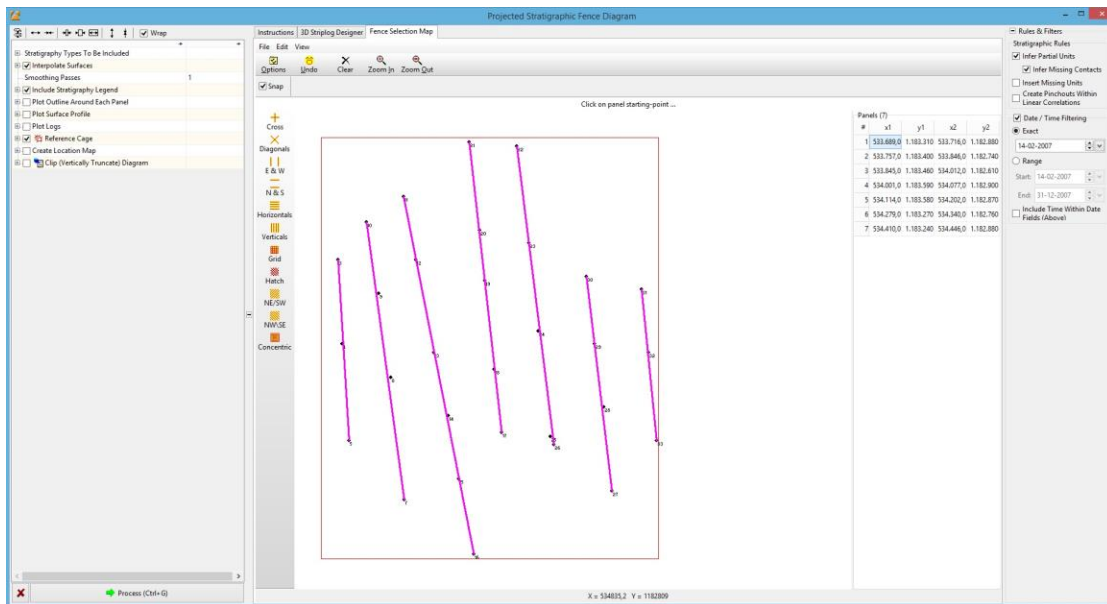


Figura 32.- Creación de secciones siguiendo el patrón de los perfiles con direcciones NW-SE

La siguiente etapa fue la creación de los modelos que muestren las 3 capas, la de saprolito, la de anortosita y la de la roca fresca. Para ellos se utilizó la herramienta *Model*. Aquí se seleccionaron todas las casillas para crear el modelo deseado (Figura 33).

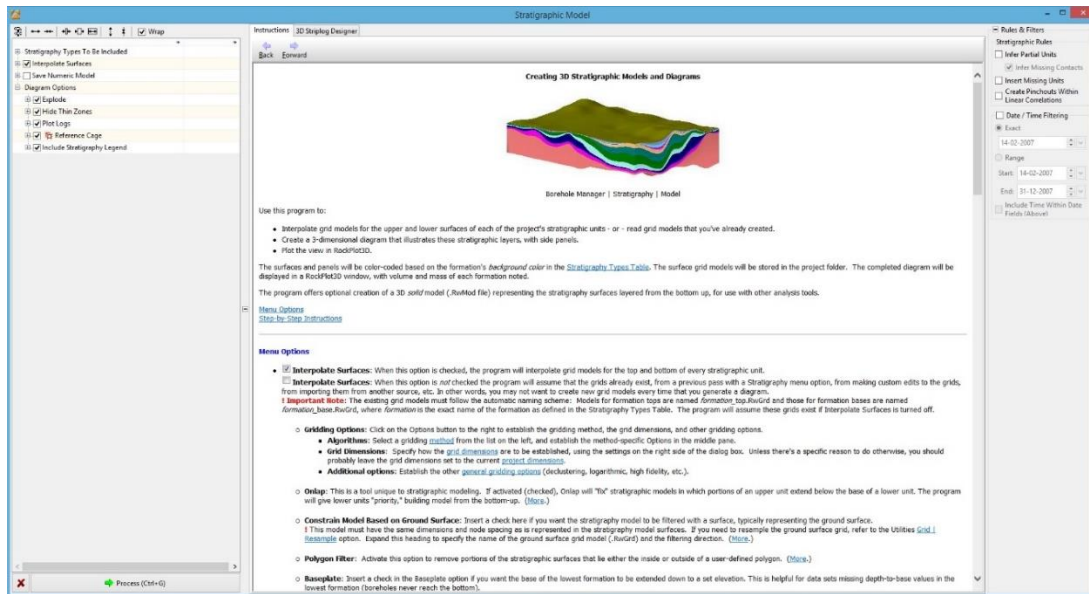


Figura 33.- Creación de un modelo

Luego se creó un modelo con una sola capa, la de anortositas, usando la herramienta de *Stratigraphic Thicknesses > 3 Dimensional* para crear un mapa isópaco con solo la capa de anortositas. En este apartado se utilizó el algoritmo de kriging para crear la capa como se observa en la figura 34.

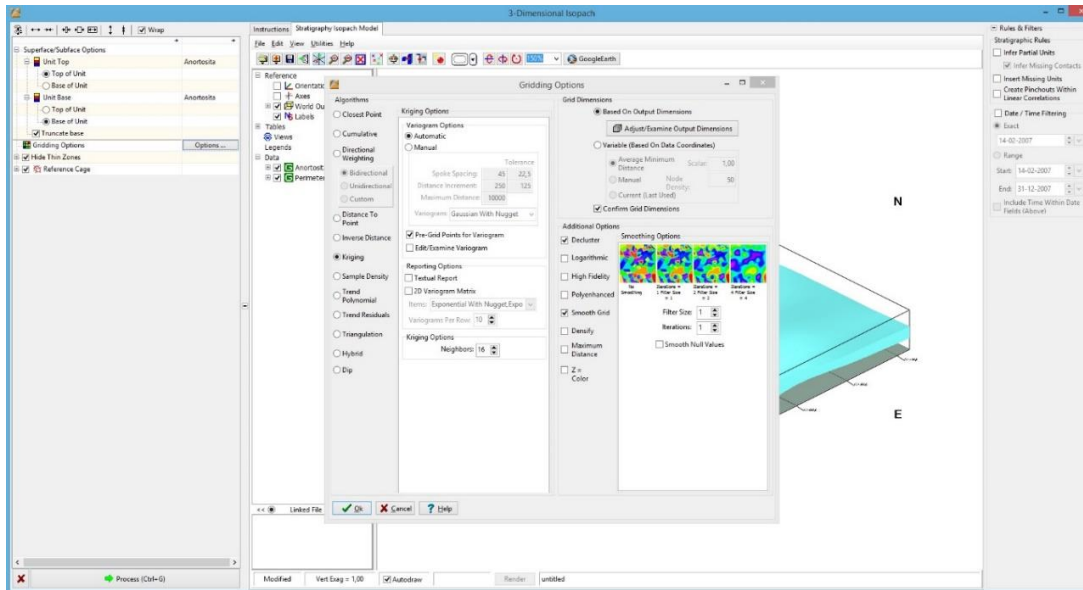


Figura 34.- Creación del mapa isópaco de anortosita

Finalmente se crearon los mapas estructurales en 2D y 3D para mostrar el relieve que tienen las capas bajo la superficie. Para ambos casos se utilizó el algoritmo de kriging para crear los modelos, como se observan en las figuras 35 y 36. La diferencia es que para el 2D se agregó la sección de colocar la ubicación de los sondeos.

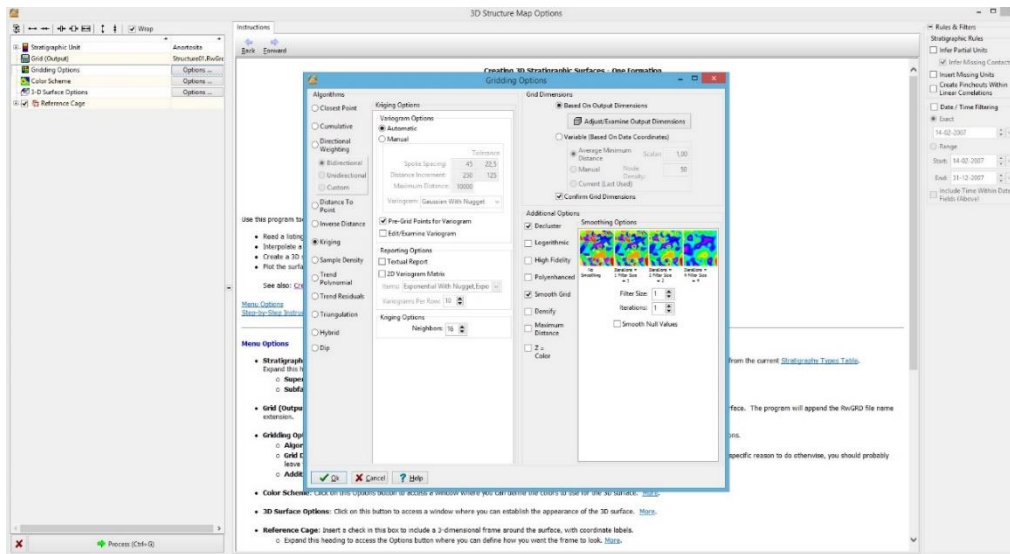


Figura 35.- Creación del mapa estructural en 3D

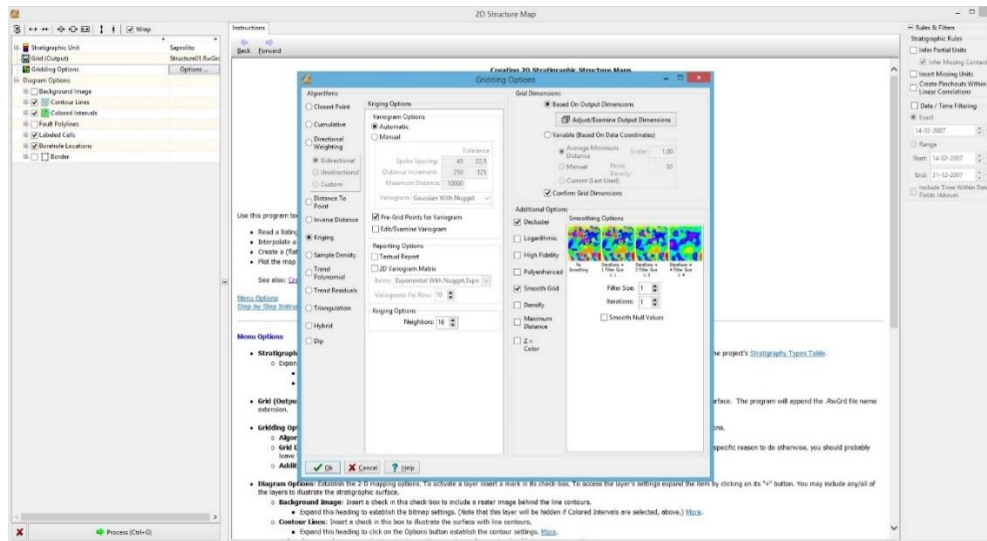


Figura 36.- Creación del mapa estructural en 2D

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

V.1 RECOPIACIÓN DE DATOS

La primera etapa consistió en la revisión y la recopilación de datos en el área sobre información geológica, geoquímica y geofísica. Sobre información geológica, del trabajo de Rodríguez y Añez (1978), se recuperó información acerca de los 29 sondeos que realizaron, sobre la información de los resultados de la química que obtuvieron de dichos sondeos, de la petrografía y de las correlaciones laterales que realizaron y que se actualizaron en este trabajo.

Del trabajo de Lozano y Mussari se recopiló información sobre la petrografía y parte de la reconstrucción geológica del área. Del trabajo de Grande (2007) se obtuvo información acerca del origen de las anortositas titaníferas, y del trabajo de Grande (2013) información petrográfica. Del trabajo de Urbani (2014) se obtuvo información acerca de la petrología de las formaciones Yumare y San Quintín, y también se recuperó el mapa geológico de San Quintín. En el área de geoquímica, se recopiló la información de Lugo (2020) sobre los estudios químicos en las anortositas de San Quintín. Del área de geofísica se recuperaron dos imágenes acerca de la magnetometría y gravimetría que incluían el área de San Quintín.

V.2 COMBINACIÓN DE BANDAS USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL CON ENVI

Las imágenes con corrección atmosférica además de ser utilizadas desde el punto de vista de la visualización, también son utilizadas para combinaciones R-G-B específicas en las que se desean resaltar características de la superficie (Romero, 2019). Para este trabajo de grado, se seleccionó una imagen de Landsat 8 y se procesó, luego se utilizaron las combinaciones que más información arrojaron para

determinar la cantidad de sedimentos presentes, ya que para establecer zonas de interés, es importante conocer la tasa de sedimentación. A continuación, se muestran las dos imágenes (figuras 37 y 38) que mayor información muestran al respecto.

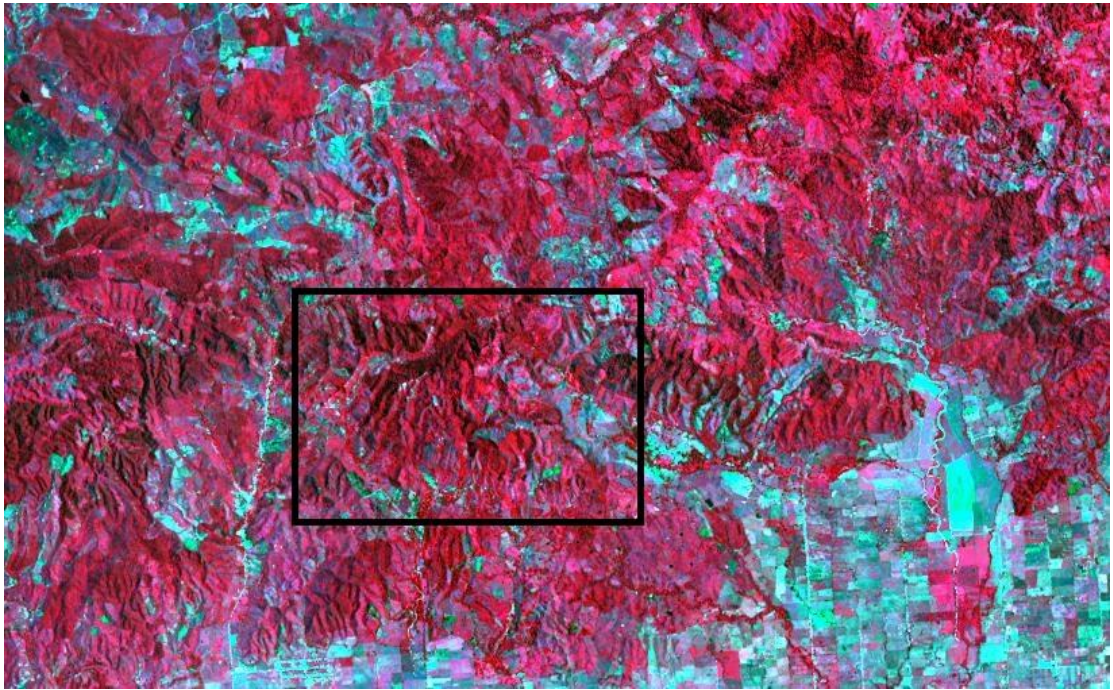


Figura 37.- Combinación de bandas en Landsat 8, R-G-B: 5-4-3. Dentro del recuadro negro está el Cerro San Quintín. En colores claros se observan las zonas con sedimentos y en colores rojizos las zonas carentes de los mismos.

En esta combinación (Figura 37) es posible observar que, en color azul claro, se observan los sedimentos y, en color rojo, las zonas donde no hay sedimentos. Se observa que al sur del Cerro San Quintín es donde hay el aporte de sedimentos y también entre el Cerro San Quintín y La Zurda. Esto indica que el material que compone al cerro es competente y que los sedimentos no están presentes en grandes cantidades.

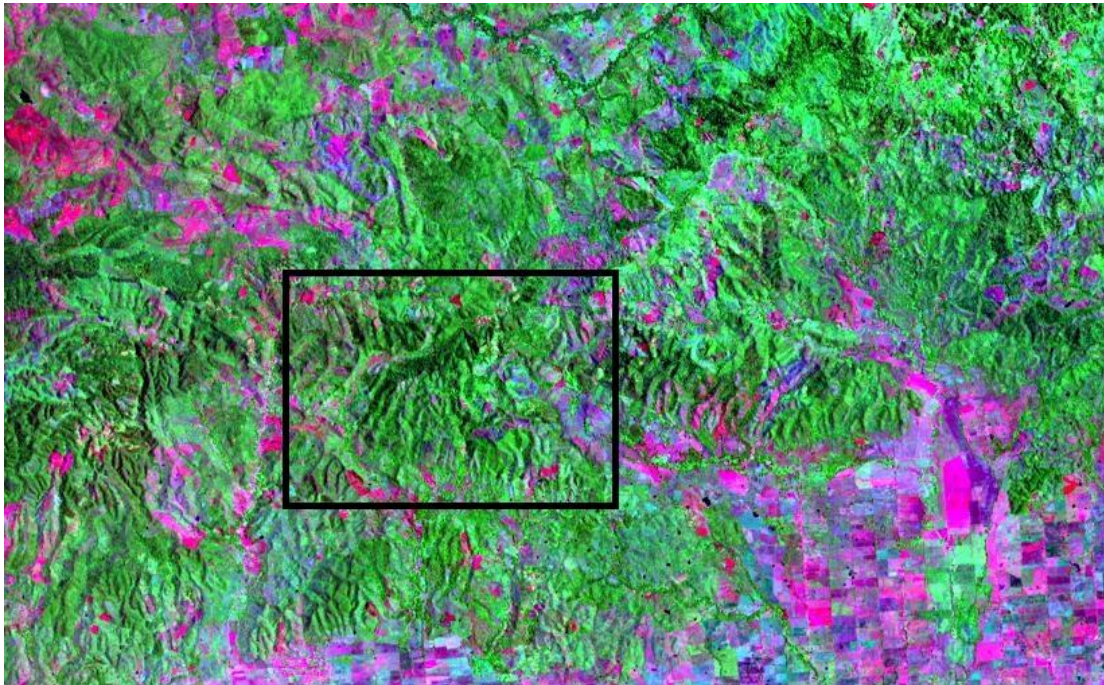


Figura 38.- Combinación de bandas en Landsat 8, R-G-B: 7-5-3. Enmarcado en negro el Cerro San Quintín. En colores fucsia se observan las zonas con minerales hidratados y en colores verdes las zonas sin estos minerales.

Con esta combinación de bandas (Figura 38) es posible observar los minerales hidratados que van de rojo a naranja, y las zonas en verdes, son las zonas carentes de estos minerales. Se observan algunas zonas que se podrían identificar como hidratadas pero no dentro del Cerro San Quintín, por lo que nuevamente no se observa mucho aporte sedimentario.

A través de estas dos figuras, se puede interpretar que la cantidad de sedimentos en el Cerro San Quintín es baja. Hacia el norte, donde se encuentran las anortositas, la cantidad de sedimentos es prácticamente inexistente, mientras que al sur, donde se encuentran las rocas metavolcanosedimentarias, hay baja cantidad de sedimentos, lo que indica que estos se encuentran consolidados. Al ser baja la cantidad de sedimentos, se puede establecer que, en general, la roca se encuentra expuesta en la superficie.

IV.3 IMÁGENES OBTENIDAS LUEGO DEL PROCESAMIENTO DEL DEM EN QGIS

Además del procesamiento de imágenes satelitales, se realizaron procesamientos a partir de un DEM, de mapas topográficos y de curvas de nivel, para así poder obtener imágenes que ayudan a entender el relieve, los drenajes, las pendientes y las tendencias estructurales y los procesos tectónicos ocurridos en el Cerro San Quintín, así como generar mapas que ayuden a la interpretación superficial, y al mismo tiempo, ayuden a generar modelos de subsuelo más realistas. Además estas imágenes arrojan información que ayuda a cumplir los objetivos, ya que ayuda a entender si superficialmente hay zonas más adecuadas que otras para la prospección de las anortositas titaníferas.

IV.3.1 Mapa de sombras o Hillshade

El sombreado del relieve, mapa de sombras o hillshade se utiliza para realzar visualmente el relieve, simulando los efectos de iluminación de la luz del sol sobre la superficie del terreno. Este modelo estima valores de reflectancia de la superficie a partir de la posición del sol a cualquier altitud y en cualquier azimut deseado. El mapa de sombras generado corresponde a un ángulo de elevación del sol de 315° y un azimut de 45° . (Figura 39). Esta imagen generada es una herramienta muy importante y de gran utilidad, debido a que con las observaciones de tono, texturas y forma proporcionó información relevante acerca de la topografía, las estructuras y la litología, además sirve de partida para otros procesamientos y mapas.

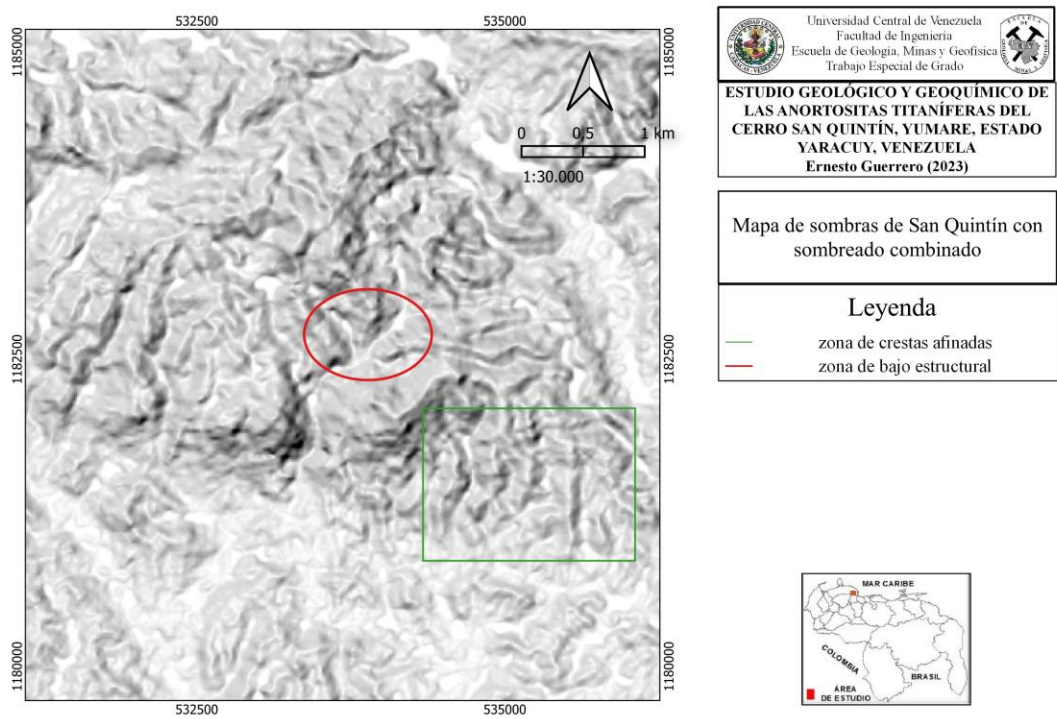


Figura 39.- Mapa de sombras con sombreado combinado. Dentro del ovalo rojo el bajo estructural y en el cuadrado verde la zona donde las crestas se afinan.

En esta imagen obtenida a partir del procesamiento al DEM, y utilizando la técnica de sombreado combinado (figura 39), se puede observar el bajo estructural que hay en medio del cerro (dentro del círculo rojo) y, que divide al cerro en dos, una parte al noroeste y otra al sureste. Al sur (en el recuadro verde) se observa como las crestas se hacen cada vez más finas hacia el sur y el este.

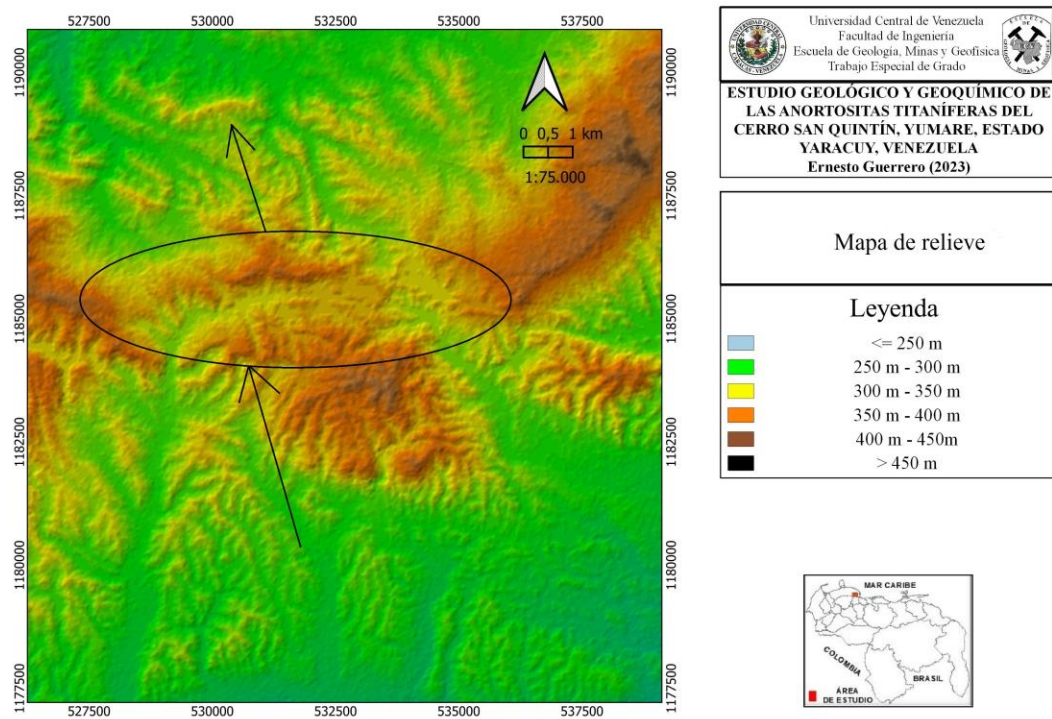


Figura 40.- Mapa de relieve de San Quintín. Dentro del ovalo se observa cómo se corta la continuidad lateral de la fila. Las flechas indican el movimiento aparente del cerro.

La figura 40, es un mapa de relieve a una escala más regional. Se observan en color marrón las máximas alturas, en la parte centro - sur, y en medio el bajo estructural que divide el cerro. Así mismo, hacia el este del Cerro San Quintín, es posible observar una aparente fila que va en dirección NE, por encima del Cerro La Zurda, y otra hacia el oeste donde también se observar esto, y dentro del ovalo negro, se observa como si fuese cortada esta fila por el Cerro San Quintín. Esto se debe al movimiento de las fallas de alto ángulo inferidas por Lozano y Mussari (2007), las cuales mueven el bloque del Cerro San Quintín hacia el norte y cortan esta fila que va desde el Cerro Tarana y pasa por encima del Cerro La Zurda

IV.3.2 Drenajes

El drenaje es un elemento fundamental para el análisis de los caracteres geomorfológicos dentro del área de estudio ya que permite delimitar los elementos estructurales y litológicos dentro de la evolución de las formas del relieve. (Figura 41).

Se puede observar un patrón dendrítico con mayor porcentaje de drenajes hacia el sur, donde se encuentran los terrenos sedimentarios. Al norte, donde se encuentran las anortositas, las cantidades de drenajes se ven disminuidos debido a que son terrenos más competentes. Al sur se observa una mayor cantidad de drenajes y con un patrón dendrítico, lo que indica que esta zona se encuentra dominada por litologías de menos competentes como son las rocas metavolcanosedimentarias. También es posible observar que, según las direcciones de flujo, estas tienden a ir hacia el sur y hacia el este, hacia estos terrenos donde las rocas tienen menos competencia.

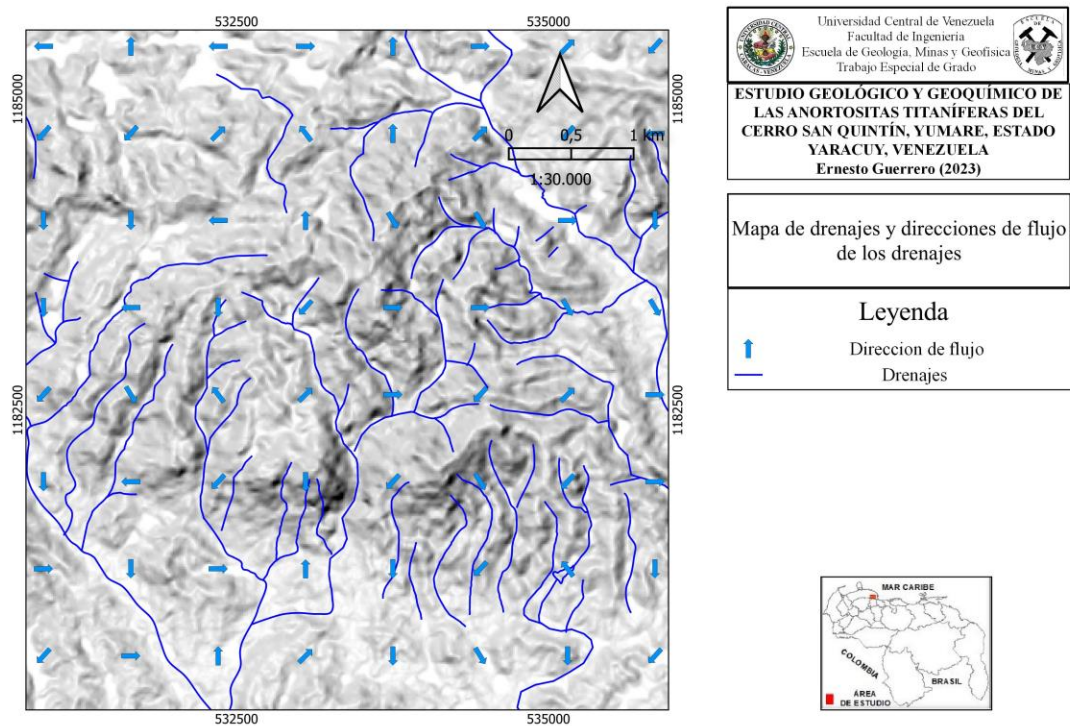


Figura 41.- Drenajes y dirección de los mismos

IV.3.3 Mapa de pendientes

Para la elaboración del mapa de pendientes, se estableció en primer lugar un rango de pendientes, que se fue sectorizando en el mapa con curvas de nivel, según el intervalo establecido, lográndose de esta manera un mapa pendiente de cuatro sectores: Llano, suave, moderado y abrupto. Este mapa sirve para observar que tan viable es el Cerro San Quintín como depósito, ya que si es llano o suave es más factible la exploración, mientras que si las pendientes son abruptas es más complicada.

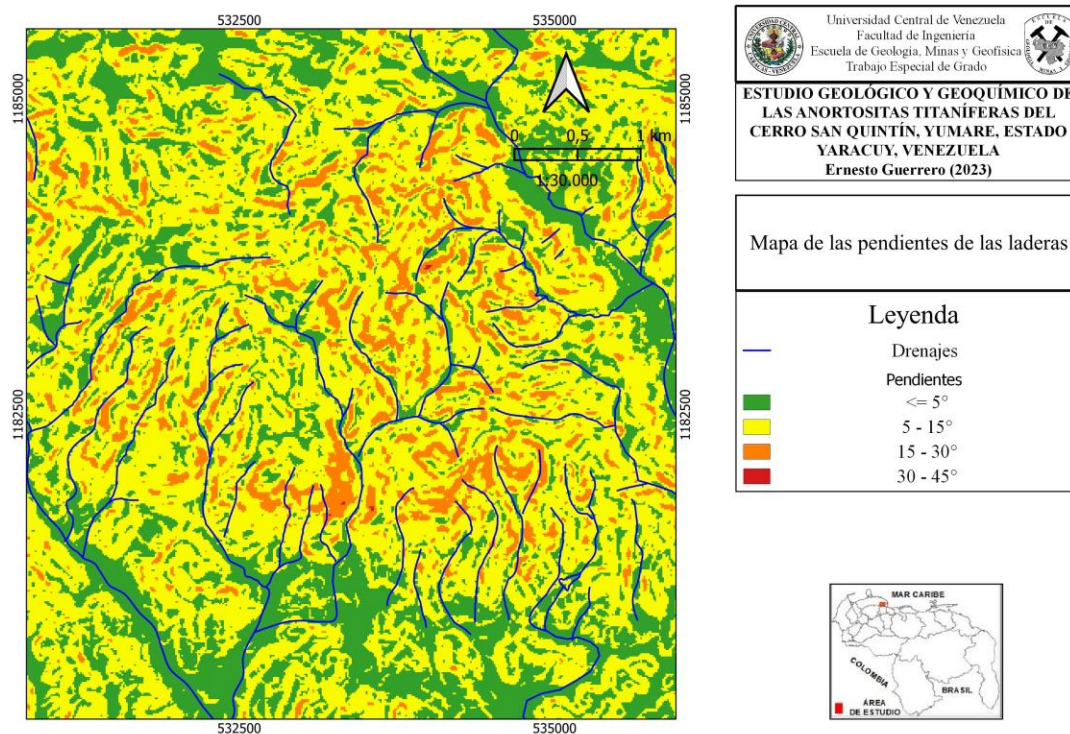


Figura 42.- Pendientes observadas en el Cerro San Quintín partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).

En este mapa (figura 42), se puede observar que las pendientes en el Cerro San Quintín no sobrepasan los 45 grados, siendo el rango más repetido entre 5 y 15. Esto indica que las pendientes son de bajo grado. Y las zonas de mayor inclinación se observan en los extremos norte y sur. Así mismo, se puede observar hacia el sur y el sureste una pendiente muy suave o llana, indicativo de topografía asociada a llanura fluviales y/o de desborde.

IV.3.4 Lineamientos estructurales

Los lineamientos son de gran ayuda para la interpretación de las estructuras que se encuentran en la zona. Ayudan a interpretar si la zona está afectada por fallas,

si hay una dirección preferencial de los planos y, que finalmente, ayudan a indicar si la zona es buena para prospección.

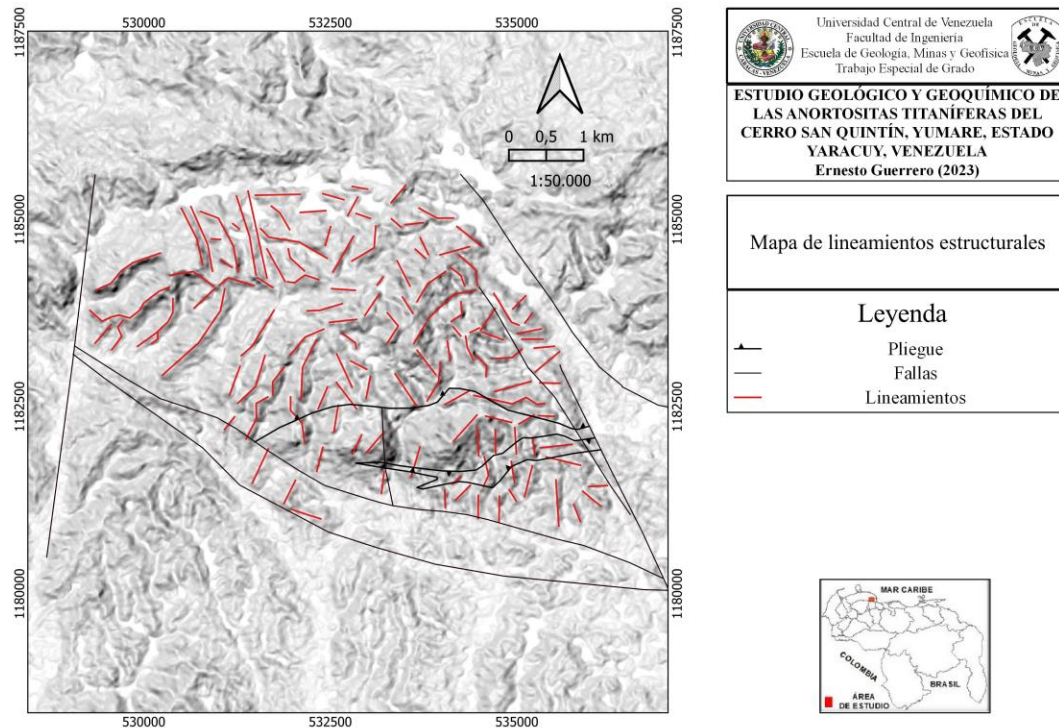


Figura 43.- Lineamientos estructurales obtenidos a partir de un Mapa de Sombras. Los lineamientos se muestran en las crestas de las estructuras

En esta imagen (figura 43) se pueden observar todos los lineamientos, fallas y pliegues que hay en el Cerro San Quintín. Se identificaron 82 lineamientos, de los cuales, se determinó que el mayor número de lineamientos van en una dirección NW-SE excepto en la parte sur donde se observa una tendencia N-S, debido al pequeño bajo estructural formado y que deja expuesto el Metagabro de La Zurda; y al este donde se observa una tendencia W-E, probablemente se deba a la presencia de la falla que afectó, y la parte occidental de tendencia NE-SW. Esta tendencia concuerda con lo descrito por Monsalve (2019) y Lozano y Mussari (2007) que indican una dirección preferencial NW. Si bien se observan otras direcciones de los lineamientos se puede deber a varios factores.

En esta imagen se observan zonas donde la cantidad de lineamientos es mayor. Se puede observar que las zonas con mayor densidad se encuentran al norte y al este, en los terrenos anortosíticos, lo cual podría deberse a que la competencia de la roca es mayor. Hacia el sur, en los terrenos metavolcanicosedimentarios, la densidad es baja.

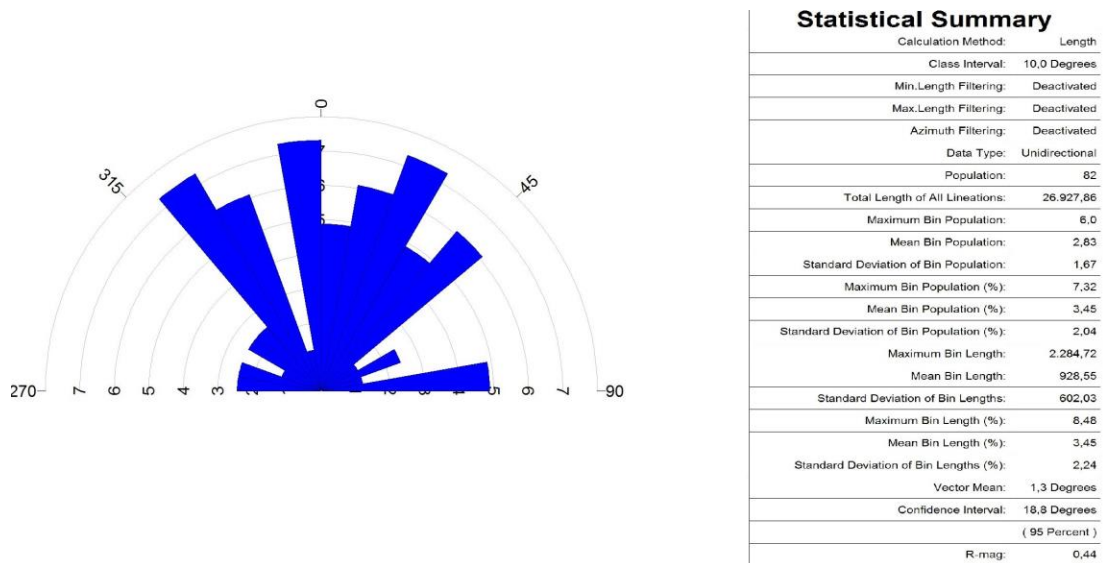


Figura 44.- Diagrama de rosa generado mediante la orientación de los lineamientos obtenidas

En esta imagen (figura 44), se ilustra la tendencia media de los esfuerzos estructurales es NW-SE, con dos intervalos, de 50 a 60° y otra de 80 a 90°, y en rangos menores los lineamientos NE-SW (60-70°), y luego los lineamientos en dirección W-E.

IV.3.4.1 Análisis de los resultados de los lineamientos

En el análisis de los rasgos estructurales se observa la ocurrencia de estructuras, y se han podido observar dos tipos de lineamientos: lineamientos rectilíneos y lineamientos curvilíneos.

IV.3.4.2 Análisis de los resultados de lineamientos rectilíneos

Se ha determinado cuatro sistemas de lineamientos rectilíneos o estructuras predominantes: Lineamientos NW-SE, en un rango de 50° a 60°, en segundo lugar, lineamientos NNW-SSE con rango comprendido entre 80° y 90°, en tercer lugar, lineamientos NE-SW con un rango de 60°-70° y en cuarto lugar, lineamientos W-E. Siguiendo en detalle cada lineamiento como se muestran a continuación:

IV.3.4.3 Lineamientos estructurales de dirección NW (50-60°)

Se trata del sistema de lineamientos más abundantes. Se encuentran principalmente en la zona central del mapa y hacia el este. Esta dirección sigue la tendencia reportada por Monsalve (2019) y Lozano y Mussari (2007), los cuales propusieron direcciones de rumbos hacia el NW. Así mismo, el diagrama de rosa (Figura 44) muestra que la dirección principal de esfuerzos es hacia el NW. Hay dos familias de lineamientos, la principal de 50-60° y otra de 80-90°. Esta dirección como esfuerzo principal corresponde con los tensores de esfuerzos, de edad Plio – cuaternaria, en el noreste de Venezuela, obtenidos a partir de mediciones microtectónicas propuesto por Audemard (1997).

IV.3.4.4 Lineamientos estructurales de dirección NNW (80-90°)

Se ubican en la parte sur del Cerro San Quintín, entre las zonas de pliegues y esta principalmente en la zona de las rocas volcanosedimentarias (Figura 43). En esta zona los lineamientos no son muy visibles, probablemente debido a que son rocas estratificadas-foliadas y las estructuras son menos visibles.

IV.3.4.5 Lineamientos estructurales de dirección NE

Se encuentran principalmente hacia el oeste. Es la tercera clase de lineamientos más abundante. Hay tres familias, siendo la más abundante la que se encuentra entre los 60° - 70°.

IV.3.4.6 Lineamientos estructurales de dirección E-W

Estos lineamientos se ubican principalmente hacia el este, hacia zonas cercanas a las fallas. Son la familia menos numerosa de lineamientos y probablemente su dirección sea influenciada por la presencia de la falla que se encuentra al este del Cerro San Quintín.

IV.3.4.7 Análisis de los resultados de lineamientos curvilíneos

Son poco frecuentes y se ubican principalmente en la zona occidental del Cerro San Quintín. Se observan dos familias, una de 40-50° y otra de 60-70°. Poseen una forma curvilínea debido a que las crestas en estas zonas no son rectilíneas, y probablemente se deba a la competencia de las anortositas.

IV.3.4.8 Análisis de las principales fallas observadas por Lozano y Mussari (2007).

Lozano y Mussari en su estudio reportan 5 fallas en el Cerro San Quintín, las cuales están plasmadas en el diagrama de rosa (Figura 45), lamentablemente no dan la ubicación precisa de dichas fallas y, por ende, no se pudieron plasmar dentro del mapa.

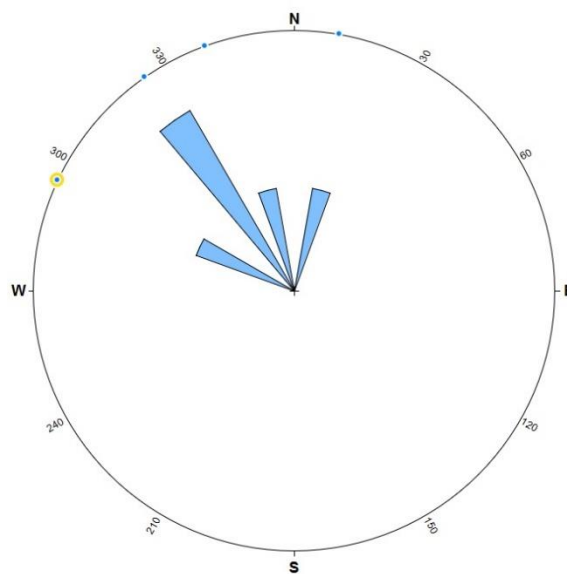


Figura 45.- Diagrama de Rosa a partir de las fallas registradas por Lozano y Mussari

La imagen muestra un diagrama de rosas donde, al igual que en el diagrama anterior de rosas, de los lineamientos estructurales, las fallas poseen dirección preferencial de movimiento hacia NW, de 50-60°. Esto parece indicar que, efectivamente el Cerro San Quintín podría tener un desplazamiento aparente, y este movimiento es hacia el NW, ya que, tanto las fallas como los lineamientos muestran la misma dirección de desplazamiento.

IV.4 GEOFÍSICA EN SAN QUINTÍN

De acuerdo con el trabajo de Gómez y Sandoval (2008), quienes realizaron un estudio de datos gravimétricos y magnetométricos, el mayor gradiente de los datos gravimétricos, se encuentra en esta zona (3,4 miligales/km), en los cuerpos ígneo-metamórficos ubicados al norte de la Colonia Agrícola de Yumare, como respuesta al Metagrabro Anortosítico de Yumare. En esta imagen (Figura 46) se puede observar que el Cerro San Quintín posee los valores más altos en la escala de las Anomalías de Bouguer (mayores a 13 AB mgal) lo que indica la presencia de un cuerpo ígneo.

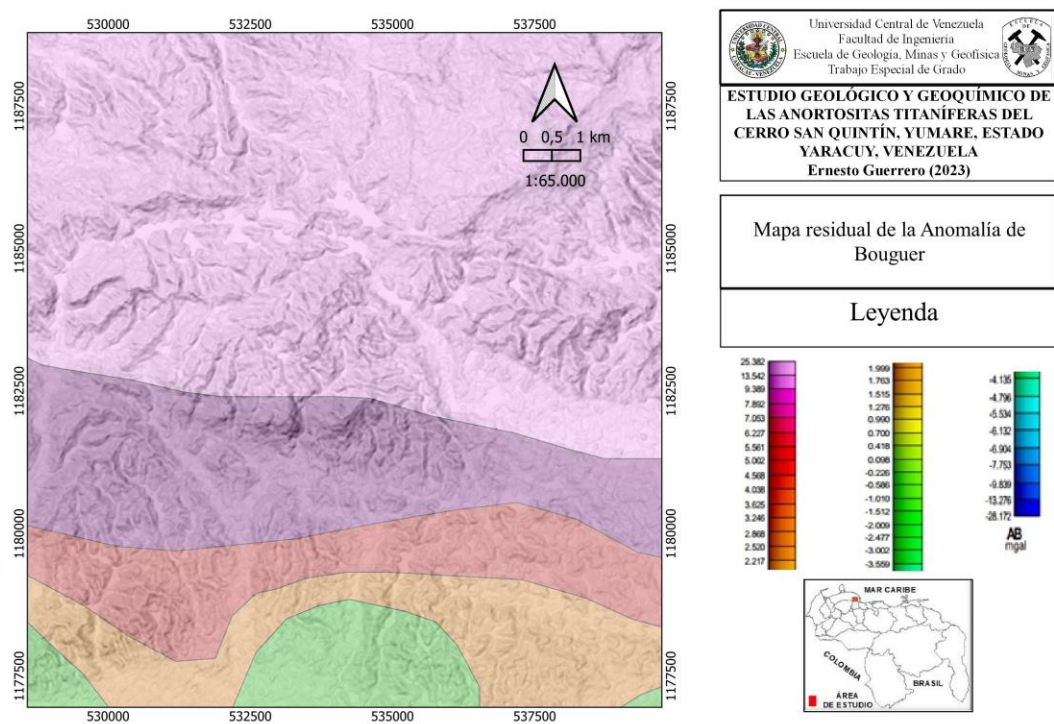


Figura 46.- Mapa residual de Anomalia de Bouguer, realizado por el método de continuación analítica del campo 10000 m hacia arriba, en combinación con el Hillshade

Igualmente, en esta zona se observan los valores más altos de la Intensidad Magnética Total, aproximadamente de 2,8 gammas/km (Gómez y Sandoval, 2008).

En la imagen (Figura 47) se observa que dentro del Cerro San Quintín, se encuentra la mayor respuesta a la anomalía magnética, como respuesta a los cuerpos ígneo-metamórficos.

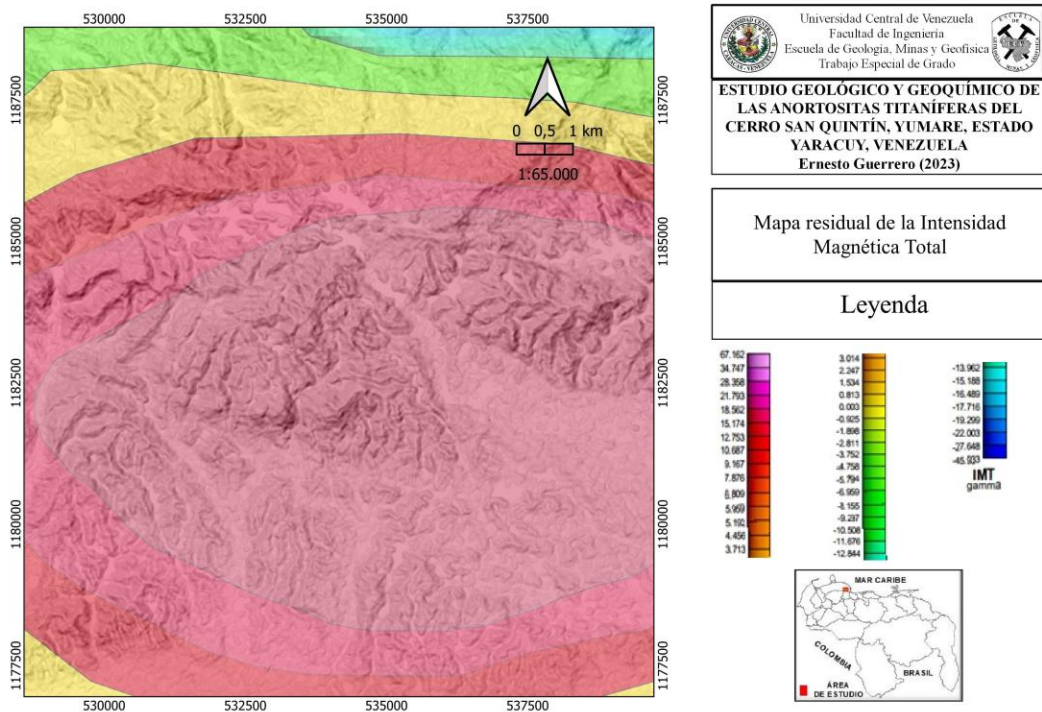


Figura 47.- Mapa residual de la Intensidad Magnética Total, a una altura de 2000 m s.n.m. realizado por el método de continuación analítica del campo 10000 m hacia arriba, combinado con el Hillshade

IV.4.1 Análisis de los datos geofísicos

En la zona del Cerro San Quintín se hallan valores máximos de Anomalía de Bouguer (Figura 46) y de la Intensidad Magnética Total (Figura 47), que según Gómez y Sandoval (2008), podrían ser respuesta a los cuerpos ígneo-metamórficos ubicados al norte de la Colonia Agrícola de Yumare, que comprenden la Unidad Metagabro Anortosítico de Yumare, y que además de poseer una alta densidad por la posible procedencia de los mismos, pertenece a un bloque continuo o a fragmentos de

un basamento de edad Proterozoico Tardío al norte de Venezuela, interpretado como Grenvilliano (Grande, 2007).

Los altos valores en la Anomalía de Bouguer, es este tipo de complejos está asociado a cuerpos ígneos, como por ejemplo la anortosita, como se observa en el trabajo de Rey-Moral *et al.* (2022), en donde se observa que los máximos valores de la Anomalía de Bouguer están asociados a cuerpos gabro-anortosíticos. En el caso de los estudios llevados a cabo por Gómez y Sandoval, estos valores tienen un máximo en San Quintín como reacción a los cuerpos anortosíticos.

La densidad promedio hallada por Gómez y Sandoval (2008) fue de 2.75 g/cm³ y este es el mismo valor obtenido por Moral *et al.* (2022), en su trabajo con los cuerpos anortosíticos en el Complejo Kunene de Angola, el cual es uno de los macizos anortosíticos más grandes del planeta, por lo que hay correspondencia entre ambas en el aspecto de densidades, edad y litología.

IV.5 LOCALIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ROCAS

La imagen 48, muestra los lugares en donde fueron tomadas únicamente las muestras de rocas, ya que lo importante era la ubicación de las anortositas, en varias campañas como la de Rodríguez (1978), Lozano y Mussari (2007) y Monsalve (2019). Se puede observar que la parte central y norte del Cerro San Quintín, es donde se encuentra la mayor concentración de anortositas, por tanto, en estas zonas es donde puede ser encontrada la zona ideal para la prospección.

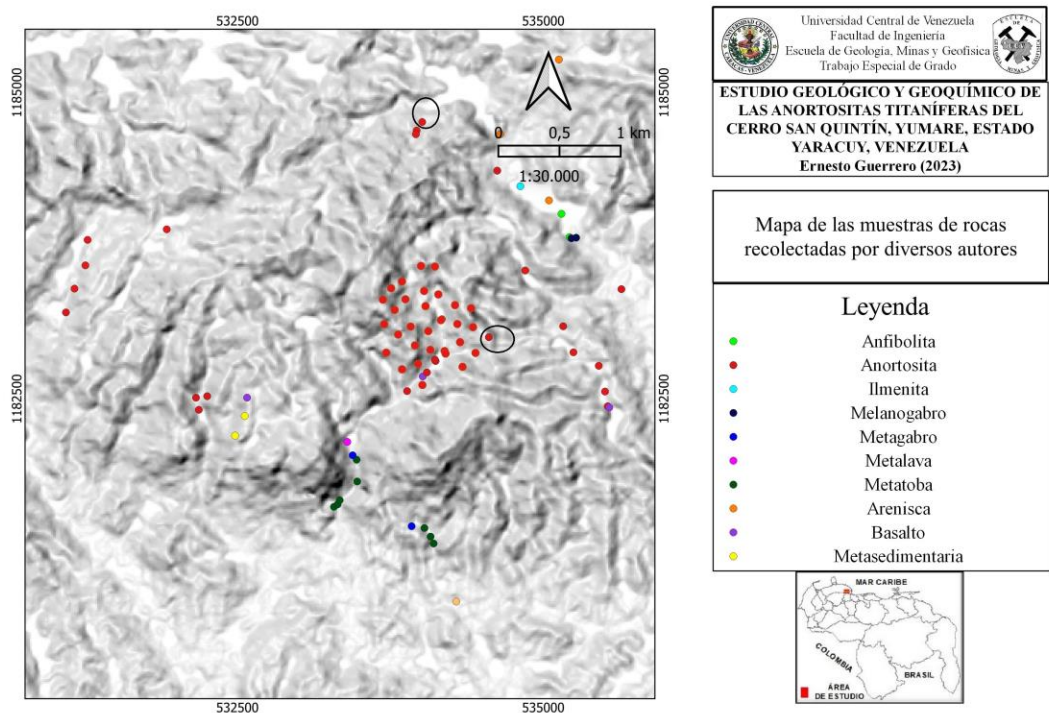


Figura 48.- Lugares donde se han tomado muestras de rocas en distintas campañas. Dentro de los círculos negros se encuentran las anortositas reportadas por Rodríguez (2020) y Lugo (2020) que poseen más de 4,5% en concentración de TiO_2

Aunque también se ve que hay zonas hacia el norte y, sobre todo, al oeste donde no hubo recolección de muestras de rocas o al menos no hay reporte la toma de las misma y, por tanto, se espera que haya también anortosita, ya que es la misma zona, y en los bordes del cerro se han tomado muestras de anortositas. Así mismo, se pueden observar 2 zonas donde Rodríguez (2020) y Lugo (2020) reportaron muestras que poseían más de 4,5% de TiO_2 y que el sugiere como zonas de interés prospectivo.

IV.6 MINERALOGÍA DE LOZANO Y MUSSARI (2007) Y GRANDE (2014)

Las descripciones más detalladas acerca de la mineralogía fueron hechas por Lozano y Mussari (2007) y Grande (2014). Lozano y Mussari dividieron el Cerro San Quintín en dos grupos, rocas metavolcánicas y rocas metavolcanosedimentarias. Estas descripciones ayudan a entender cuáles son las zonas más importantes para encontrar elevadas concentraciones de titanio.

De los datos de Lozano y Mussari (2014), los minerales más abundantes son la plagioclasa y la sericita. De acuerdo con Grande (2014), esta sericita es la misma plagioclasa que ha sido alterada, por lo que la cantidad de plagioclasa es mucho mayor, casi 100 %. Esto significa que estas rocas son prácticamente puras en plagioclasa, y que, por tanto, son prácticamente pura anortita, lo que es un indicativo de que estas rocas son un gran reservorio.

Estos datos son importantes, debido a que las anortositas titaníferas están constituidas principalmente por plagioclasas, y ya que las rocas encontradas en San Quintín están compuestas prácticamente por puras plagioclasas, incrementa las posibilidades de que estas contengan titanio y, por tanto, incrementa el valor que puede tener el depósito.

VI.7 GEOQUÍMICA

La siguiente tabla presenta los resultados de los análisis químicos semicuantitativos realizados por Rodríguez y Añez (1978) a los sondeos obtenidos. Estos resultados fueron obtenidos a realizarle dichos autores las pruebas químicas a las anortositas titaníferas del Cerro San Quintín.

Tabla 6.1: Concentraciones químicas de las muestras obtenidas por Rodríguez (1978)

Muestra	% SiO₂	% Al₂O₃	% Fe₂O₃	FeO	CaO	MgO	P₂O₅
S-3	48,67	23,63	4,55	1,86	5,24	Tz	0,02
S-4	48,42	24,96	2,48	1,81	6,59	Tz	0,87
S-5	47,44	23,85	9,25	1,28	1,01	1,18	0,11
S-7	39,54	24,32	11,45	3,67	5,41	0,95	0,24
S-8	22,34	30,91	15,66	3,48	9,91	0,91	1,16
S-9	37,94	26,77	8,57	2,43	5,65	Tz	1,15
S-10	35,02	24,77	10,67	4,22	8,02	0	3,67
S-11	37,56	26,53	10,09	5,57	3,85	0	0,35
S-12	36,57	22,8	18,7	6,02	4,02	0	0,62
S-13	42,6	25,04	8,23	1,13	3,82	0,28	0,49
S-14	27,78	31,24	11,55	1,59	8,25	1,27	1,04
S-15	26,56	20,41	21,36	3,09	8,34	1,26	1,42
S-16	28,14	24,87	12,74	1,76	10,42	0,38	1,31
S-17	43,52	21,04	9,59	1,47	3,58	5,6	0,47
S-18	37,14	28,91	8,05	3,82	4,59	3,1	0,18
S-19	42,46	24,16	8,27	2,17	4,38	7,81	0,16
S-20	43,28	20,29	13,86	2,13	4,7	1	Tz
S-21	36,56	21,13	18,11	3,09	4,85	5,48	0,15
S-22	49,68	22,92	6,82	1,43	7,58	4,8	0,12
S-23	36,8	19,84	21,85	1,62	5,73	2,32	1,57
S-24	49,43	19,81	18,03	0,51	9,39	2,01	1,16
S-25	39,12	26,11	9,97	1,4	6,27	3,11	1,29
S-26	36,89	28,67	10,43	0,85	8,13	Tz	2,71
S-27	60,34	15,34	2,43	1,76	2,8	6,09	0,15
S-28	46,21	14,73	5,07	0,9	9,77	9,88	0,37
S-29	46,53	23,37	8,13	1,12	6,25	3,03	0,32
S-30	44,36	19,8	10,23	1,05	11,01	2	0,65
S-31	40,34	25,36	9,93	0,78	4,77	5,45	0,38

Muestra	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	P ₂ O ₅
S-32	34,94	29,11	9,51	1,2	4,89	5,98	0,37
S-33	60,22	17,8	6,68	1,14	3,14	1,07	0,28

*Tz = Trazas

Tabla 6.2: Concentraciones químicas de las muestras obtenidas por Rodríguez (1978)

Muestra	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	P al rojo
S-3	2,6	4	5,23	0	4,37
S-4	5,26	3,56	1,06	0	4,4
S-5	4,75	2,9	0,53	2,6	5,45
S-7	4,36	2,98	0,6	0,66	5,62
S-8	9,5	3,01	0,7	0,02	2,4
S-9	9,1	2,81	1	0	3,91
S-10	6,88	1,71	0,81	0,56	3,42
S-11	6,55	2,38	1,05	0,18	2,05
S-12	6,57	2	1	0,29	1,83
S-13	8,1	3,2	0,82	1,74	4,49
S-14	9,8	3,1	0,72	0,61	4,04
S-15	9,5	2,8	0,8	0,45	4,01
S-16	9,84	2,91	0,68	0,22	6,73
S-17	6,12	4	1,18	0	4,08
S-18	6,84	3,35	1,05	0	2,96
S-19	4,82	3,38	1,09	0	2,18
S-20	0,51	2,85	2	0,32	2,03
S-21	5,45	1	0,95	0,62	2,35
S-22	1,66	0,25	0,74	0,74	2,97
S-23	6,51	Tz	1	1	1,8
S-24	1,2	3,48	1,07	0	4,01
S-25	5,32	3,71	0,91	0	2,8
S-26	4,07	2,46	0,84	0	5,51

Muestra	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	P al rojo
S-27	1,08	2,98	1,14	0	6,42
S-28	1,2	4,39	2,81	0	5,47
S-29	3,88	3,15	1,15	0	3,86
S-30	1,55	2,29	1,37	0	6,32
S-31	3,97	3,39	0,68	0	4,91
S-32	5,47	2,96	0,75	0	4,97
S-33	0,9	3,38	0,53	0	4,87

Como se aprecia en la tabla 6, los valores más altos de la concentración del titanio se encuentran entre los sondeos 8 y 21, donde los valores se encuentran cercanos al 10% de concentración. Entre estos sondeos se observa igualmente que los valores de MgO son muy bajos o inexistentes en algunos sondeos, debido a que la tasa de anortosita es muy alta, es prácticamente pura, como también se contrasta con los valores de Al₂O₃, que entre estos sondeos alcanza sus valores máximos de concentración igualmente.

A continuación, se presenta la comparación de algunas concentraciones contra el Al₂O₃, ya que las anortositas son plagioclasas y concierne ver la respuesta de los óxidos frente a este.

VI.7.1 Sodio

El contenido de Na₂O se encuentra dentro del rango entre 1,7% a 4% (figura 49). Este rango de concentración se debe principalmente a la presencia de aluminosilicatos sódicos en la zona de estudio.

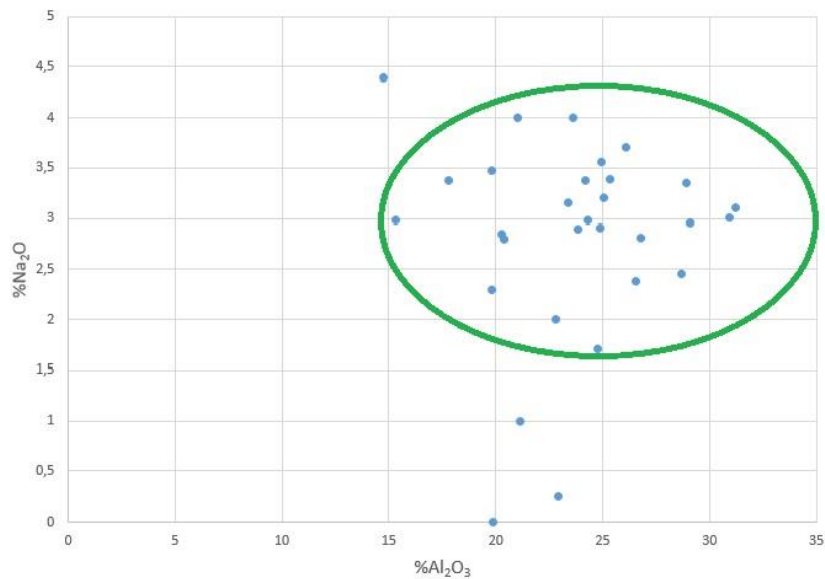


Figura 49.- Diagramas de variación de Na₂O en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al₂O₃

Así mismo, estos valores de sodio se encuentran en la media de las anortositas del proterozoico, de acuerdo con Sotiriou y Polat (2023), quienes indican que los valores de Na₂O para estas rocas se encuentran entre el 2 y 6 %.

VI.7.2 Potasio

El comportamiento de K₂O muestra una menor dispersión en comparación al contenido de Na₂O en los mismos (figura 50). Esta dispersión se debe a que en la zona existe la presencia de rocas metamonzónicas ricas en feldespato potásico existentes en el macizo La Zurda, y que van aumentando gradualmente su contenido de K₂O al acercarse a dicho macizo (Lozano y Mussari, 2007).

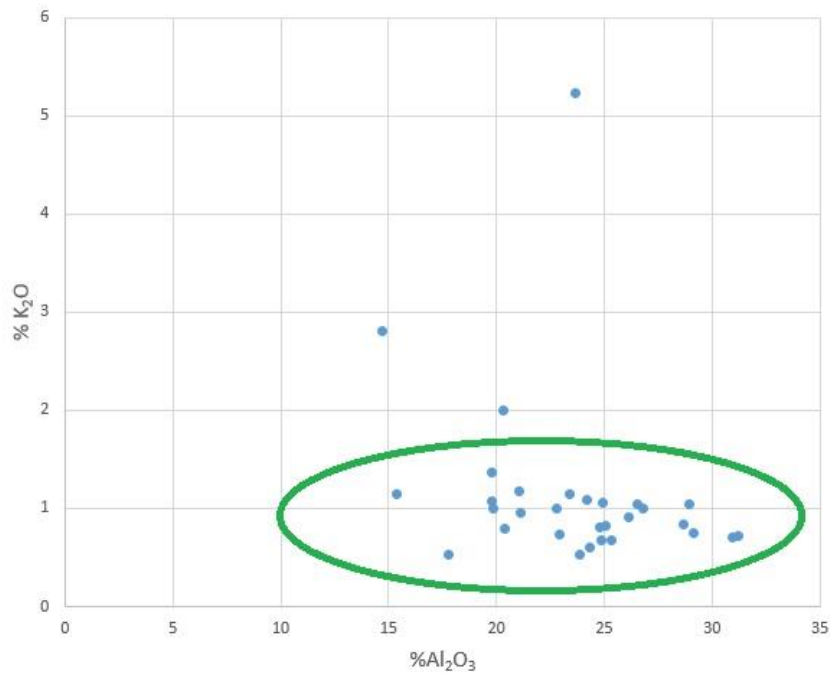


Figura 50.- Diagramas de variación de K_2O en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al_2O_3

Rodríguez (2020), en su estudio destaca una disminución en el contenido de este óxido a medida que las muestras se alejan del macizo la Zurda, por tanto, al encontrarse estas muestras en la zona central del Cerro San Quintín, el porcentaje de óxido es baja. Sin embargo, estas concentraciones concuerdan con las propuestas por Sotiriou y Polat (2023), que indican que éstas son cercanas al 1 %, mientras que las del fanerozoico son menores al 1% y las del arqueno pueden ser superiores al 1 %.

VI.7.3 Calcio

El contenido de CaO posee una alta dispersión (figura 51), esto podría deberse a que hay distintas fases minerales, en donde el CaO se encuentra como en anfíboles, piroxenos, epidoto y apatito. Dentro del diagrama de variación de CaO , se pueden observar rangos que van desde 3% hasta el 11%.

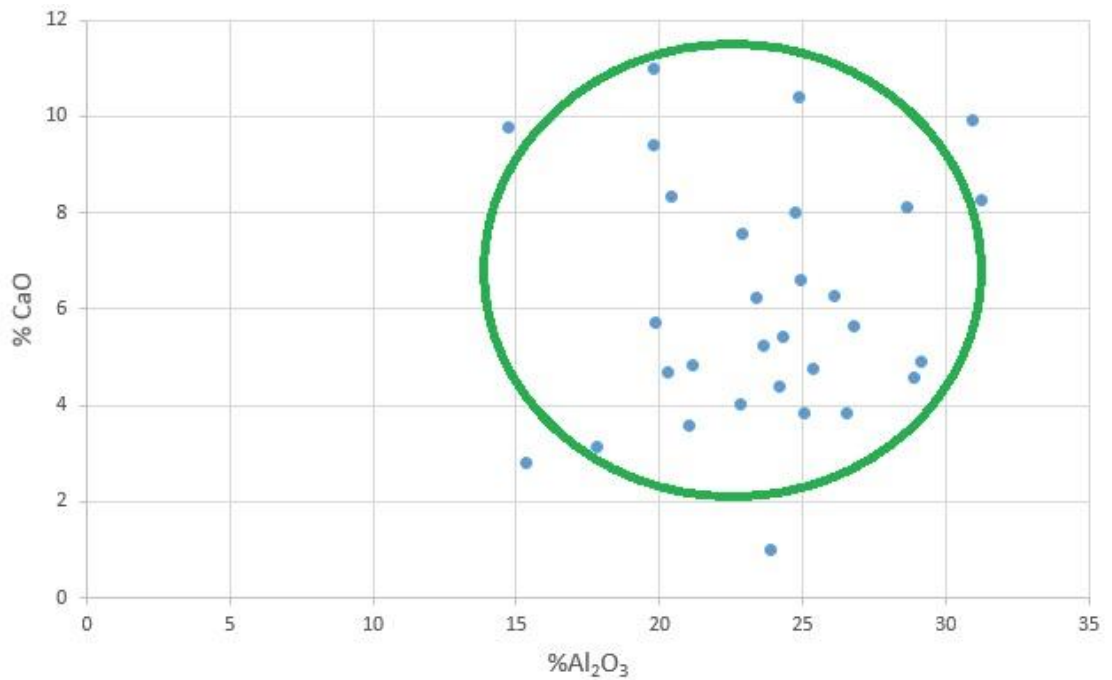


Figura 51.- Diagramas de variación de CaO en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al₂O₃

Las concentraciones de CaO, alrededor al 6%, corresponden con las anortositas proterozóicas según Sotiriou y Polat (2023), y que en estas muestras pudiera deberse, y esta idea está apoyada por, la presencia de minerales del grupo de los anfíboles ricos en CaO, como la epidota. Además, Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Rodríguez (2020), quien en su estudio destaca que al este del Cerro San Quintín, la anortosita se encuentra con un mayor contenido de minerales ferromagnesianos, específicamente anfíboles, y esta zona de donde se obtuvieron estos resultados, se encuentra hacia el centro y este del cerro.

VI.7.4 Magnesio

Las concentraciones de MgO muestran una baja dispersión en el diagrama de variación (figura 52) en general. La mineralogía de estas muestras está caracterizada por la presencia de anfíboles y piroxenos principalmente, y en muchas de las muestras apenas se consiguen trazas del mismo (ver tabla 6).

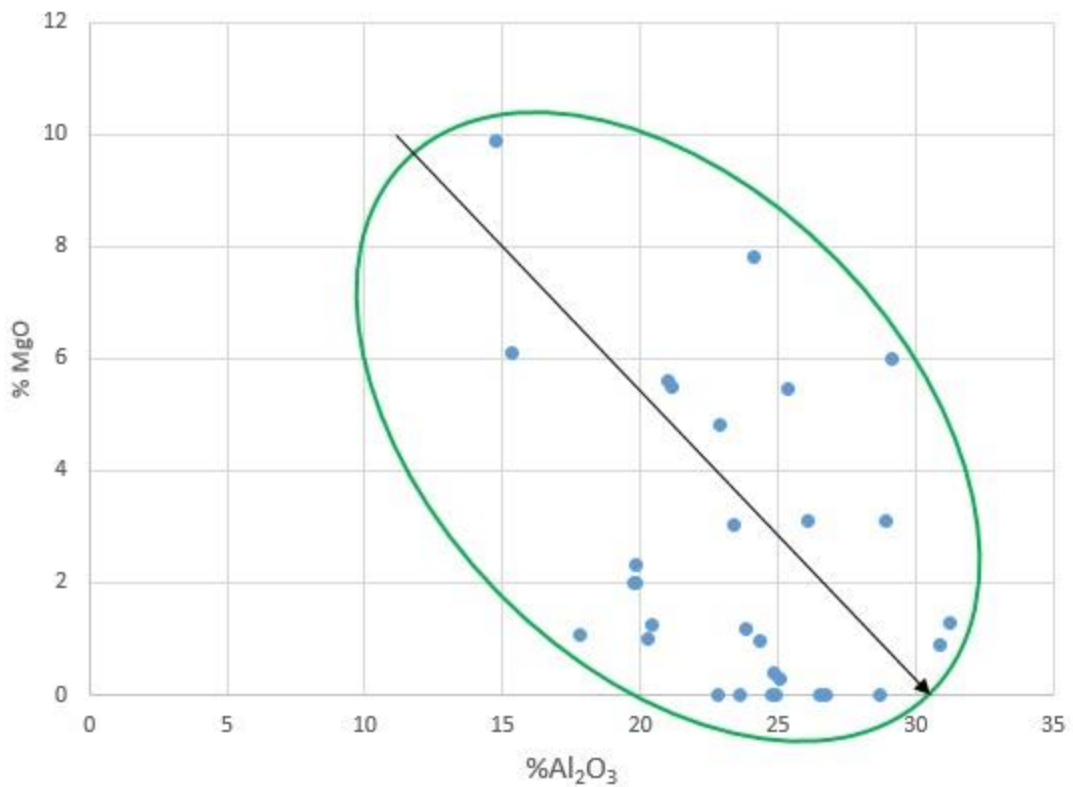


Figura 52.- Diagramas de variación de MgO en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al₂O₃

El MgO se encuentra contenido en minerales del grupo de los anfíboles y piroxenos. Se puede observar una disminución de este óxido a medida que aumenta el contenido de Al₂O₃. Esto podría deberse a que, tanto la presencia de clinopiroxenos

como de ortopiroxenos son escasas, en algunas muestras son solo trazas, y las cantidades de anfíboles son muy bajas (ver tabla 6).

VI.7.5 Silicio

La concentración de SiO_2 se mantiene en el mismo rango, a medida que aumenta la de Al_2O_3 (figura 53). Esto podría deberse a la lixiviación de silicio en forma de $\text{H}_4(\text{SiO}_4)$. Dicha lixiviación de silicio corresponde a la alteración de los minerales menos estables al proceso de meteorización de acuerdo a la serie de Goldich, lo que contribuye al empobrecimiento de SiO_2 (Lugo, 2020).

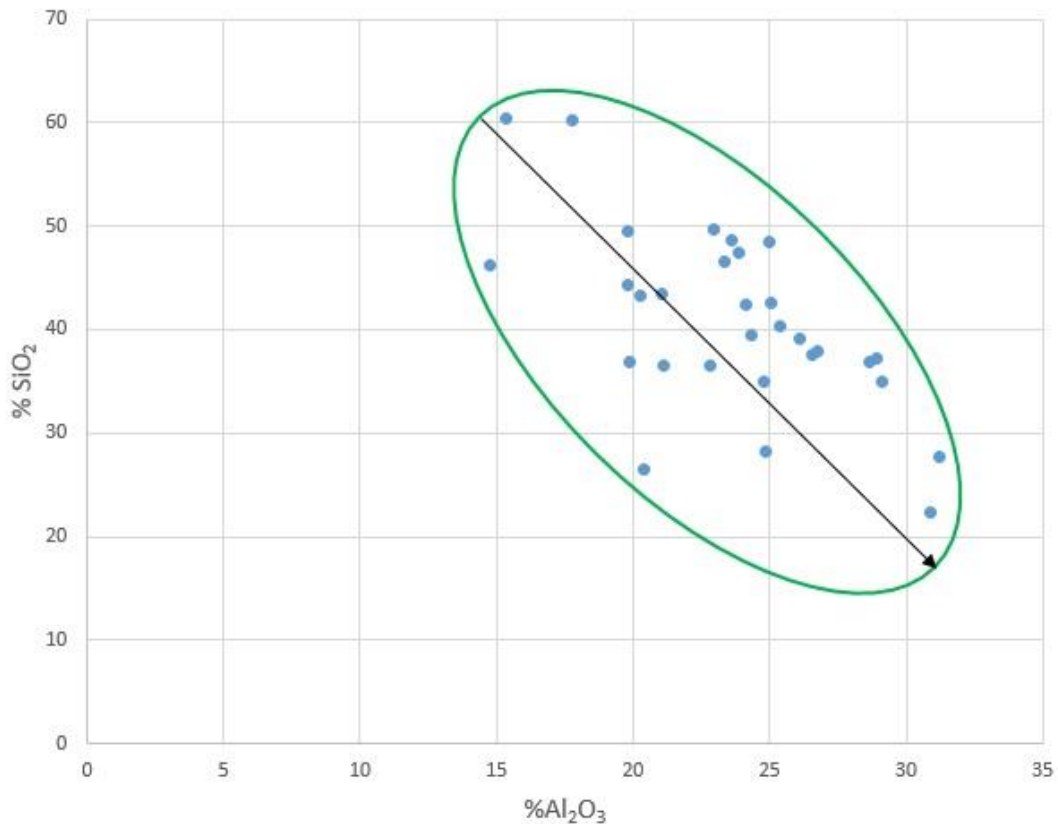


Figura 53.- Diagramas de variación de SiO_2 en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al_2O_3

VI.7.6 Hierro

La variación en la concentración de Fe_2O_3 se mantiene alrededor de 10% a medida que aumenta el Al_2O_3 y muestra una alta dispersión (figura 54). Estos valores altos son inusualmente alto de acuerdo a Sotiriou y Polat (2023), ya que en su trabajo, destacan que las concentraciones para las anortositas del proterozoico son menores al 9 %. Esto puede deberse a que las rocas se encuentran sometidas a meteorización intermedia, según Lugo (2020), ya que la meteorización en la zona es incipiente.

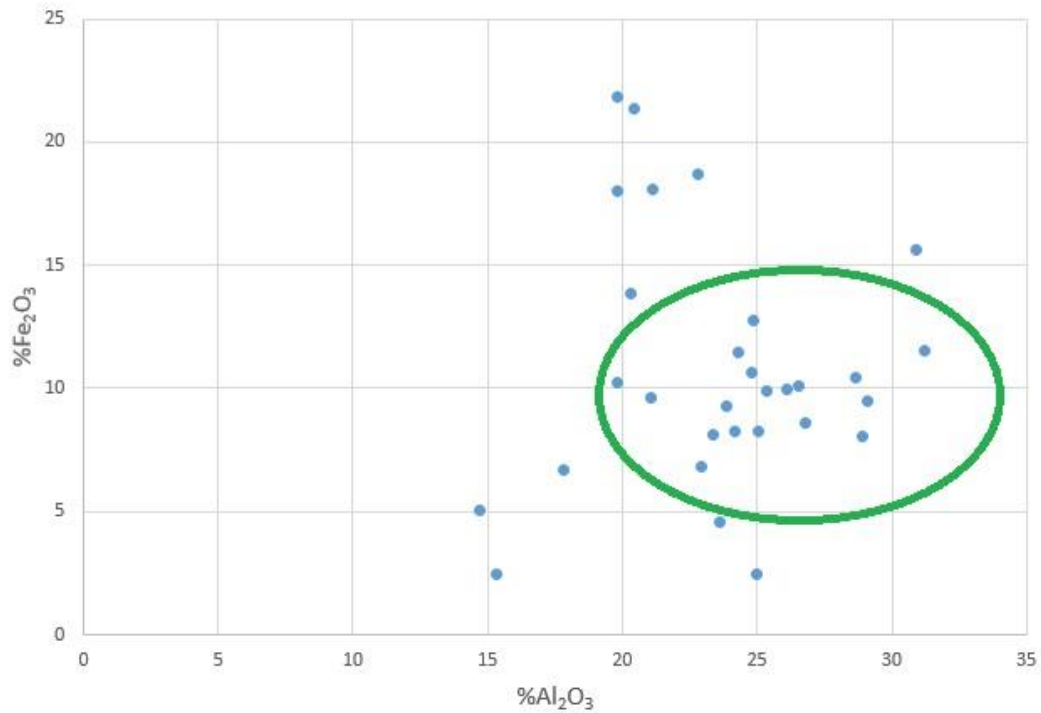


Figura 54.- Diagramas de variación de Fe_2O_3 en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al_2O_3

VI.7.7 Titanio

En la figura 55, se pueden observar que las concentraciones de TiO_2 van aumentando a medida que se incrementa la concentración de Al_2O_3 . Esto se puede deber a que estas rocas están compuestas principalmente de plagioclasas y el remanente son silicatos máficos de TiO_2 .

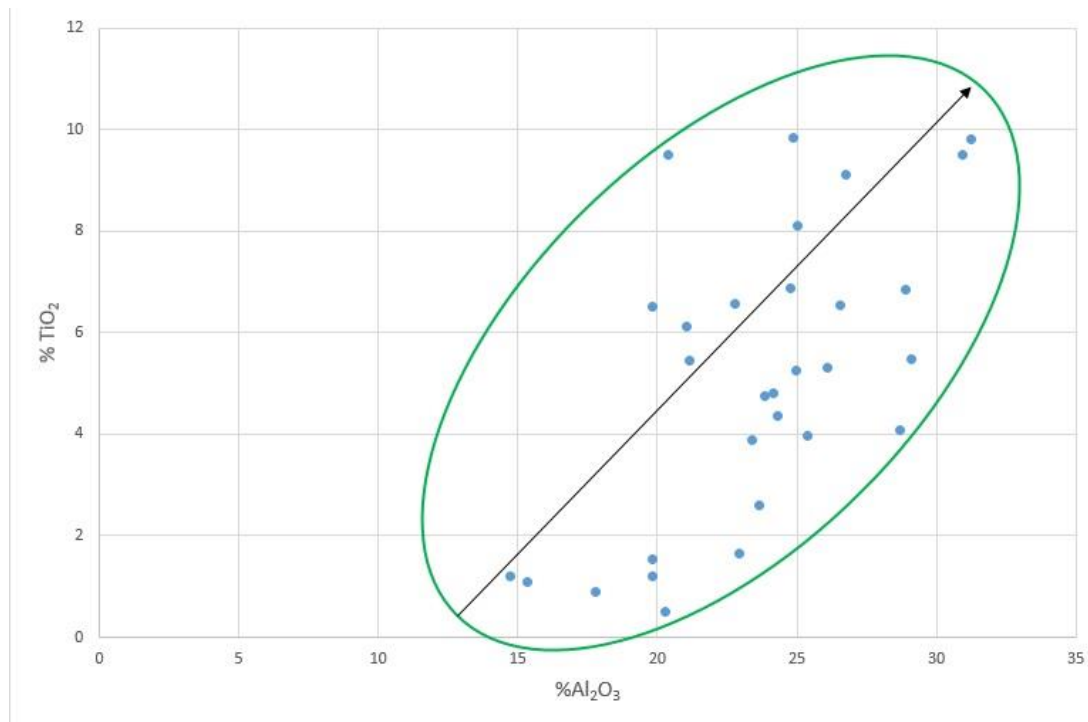


Figura 55.- Diagramas de variación de TiO_2 en las muestras de rocas en función del contenido porcentual de Al_2O_3

Además estas concentraciones de TiO_2 son bastante altas, en comparación a las anortositas del arqueano estudiadas por Sotiriou y Polat (2023), quienes indican que estas rocas en general poseen concentraciones menores al 2%.

VI.7.8 Análisis

Al comparar estos metales con el aluminio, se observa que los óxidos MgO y K₂O son bajos, en cambio Na₂O es alto, lo que indica que estas anortositas son ricas en plagioclasas sódicas, y son prácticamente pura anortosita, como sugiere Grande (2014). También se concluye que la cantidad de metales ferromagnesianos es baja, hay poco contenido de facies minerales o están muy alteradas, por lo que son anortositas con alta concentración de titanio.

IV.8. PERFILES Y MODELOS PROPUESTOS

Basándose en los datos de los sondeos realizados por Rodríguez y Añez (1978), se procedió a realizar una actualización de los perfiles laterales y a la creación de modelos para explicar y correlacionar estos sondeos, sobretodo haciendo hincapié en la capa de anortositas, la cual es el objetivo de este trabajo especial de grado.

IV.8.1. Perfiles de sondeos

A continuación, se presentan las correlaciones basadas en las 29 perforaciones realizadas por Rodríguez y Añez (1978), las cuales tienen una profundidad máxima de 100 m y muestran los valores de concentración de los elementos químicos de interés (sapolito, la anortosita y la roca fresca). La distancia horizontal promedio entre sondeos fue de 183,50 m., siendo la mínima de 125 m. y la máxima de 275 m de espaciamiento.

El nivel denominado Sapolito por Rodríguez y Añez (1978), tope superior, consiste en un material muy arcilloso de color amarillo a marrón amarillento, húmico

en su parte superior, bastante meteorizado y con franjas o lentes de mineral bastante alterado de hematita-magnetita-ilmenita.

El nivel de Anortosita, según Rodríguez y Añez, se caracteriza por rocas anortosíticas, gabroides y granulíticas muy meteorizadas, pero en las que se preservan las características originales de la roca fresca. Mineralógicamente está constituido por feldespato parcialmente alterado, minerales arcillosos, epidoto, poco cuarzo, y minerales opacos titaníferos. El espesor promedio fue de 29,18 m.

El nivel denominado Roca Fresca por Rodríguez y Añez (1978), está constituido por rocas frescas del Complejo de Yumare, algo meteorizadas, densas y compactas. Mineralógicamente consiste en feldespato, hornablenda y minerales opacos titaníferos.

En la figura 56 se aprecia un mapa donde se muestra la ubicación espacial de los sondeos realizados por Rodríguez y Añez (1978). En ella, se observa que los primeros sondeos fueron realizados hacia la zona oeste, siendo estos realizados de oeste a este, por lo que el primer sondeo se encuentra hacia el NW. Así mismo, se observa la dirección (NW) en la cual se realizaron las correlaciones laterales entre pozos.

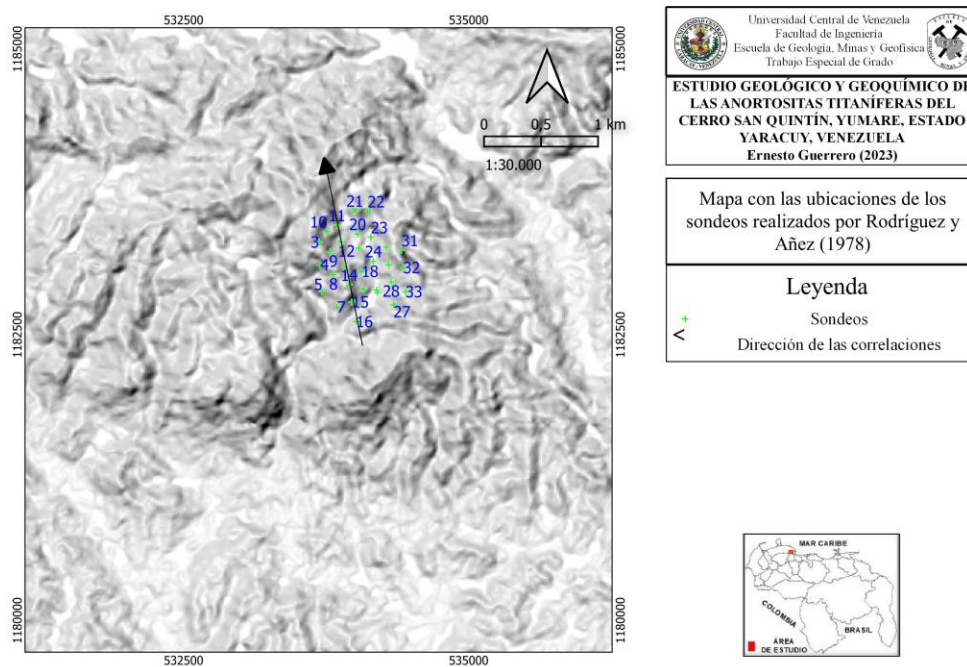


Figura 56.- Localización en plano de los sondeos realizados por Rodríguez y Añez (1978) y la dirección en la que se realizaron las correlaciones.

A continuación, se presenta la tabla 7 que contiene los espesores por cada capa y la concentración de TiO_2 en cada sondeo. Rodríguez y Añez (1978) realizó el cálculo de la ley de corte para la mineralización de Ti en el cerro San Quintín, estableciendo para la fecha del estudio el límite rentable en 4,5% TiO_2 . Entre los sondeos 8 y 21, se observa que las concentraciones del óxido son superiores a esto, por lo que estos sondeos presentan un alto potencial para su explotación.

Tabla 7: Espesores de las capas y concentración de TiO₂ por capa

Sondeo	Saprolito (m)	Anortosita (m)	Roca fresca (m)	Total (m)	% TiO ₂
3	2.5	6	0	8.5	2,6
4	10.5	12.9	0	23.4	5,26
5	1.44	25.88	4.88	32.2	4,75
7	3	15	13	31	4,36
8	2	18	80	100	9,5
9	7.5	28.89	0	36.39	9,1
10	6	42	0	48	6,88
11	1.44	50.33	20.13	71.90	6,55
12	1.5	29.5	14.22	45.22	6,57
13	4	32	0.96	36.96	8,1
14	3.5	10.5	34	48	9,8
15	1	7	35.3	43.3	9,5
16	0	6	34.1	40.1	9,84
17	1	35.5	3.5	40	6,12
18	0.72	68.3	2.88	71.9	6,84
19	1.5	38.5	0	40	4,82
20	1	29	11.48	41.48	7,51
21	1.5	46.61	0	48.11	5,45
22	2.5	24.31	10.5	37.31	1,66
23	2	40	6	48	6,51
24	1	17.64	8	26.64	1,2
25	2	23.16	0	25.16	5,32
26	2	14	8.86	24.86	4,07
27	2	22	1	25	1,08
28	1.5	32.19	0	33.69	1,2
29	1	45.5	7.63	54.13	3,88
30	2	44	4.27	50.27	1,55
31	1.5	35.52	0	37.02	3,97
32	2.5	37.71	0	40.21	5,47
33	2.5	37.50	0	40	0,9

Las siguientes figuras representan la variación lateral entre los sondeos, y están basadas en los espesores de la tabla 7. Se hicieron en dirección NW-SE (figura 56), siguiendo los patrones originales de Rodríguez y Añez (1978). Es importante destacar que la distancia que hay con el eje horizontal es la profundidad a la que

comienzan, como se dijo antes, siguen el patrón de relieve superficial. Las ubicaciones de estas líneas se pueden observar en la figura 57.

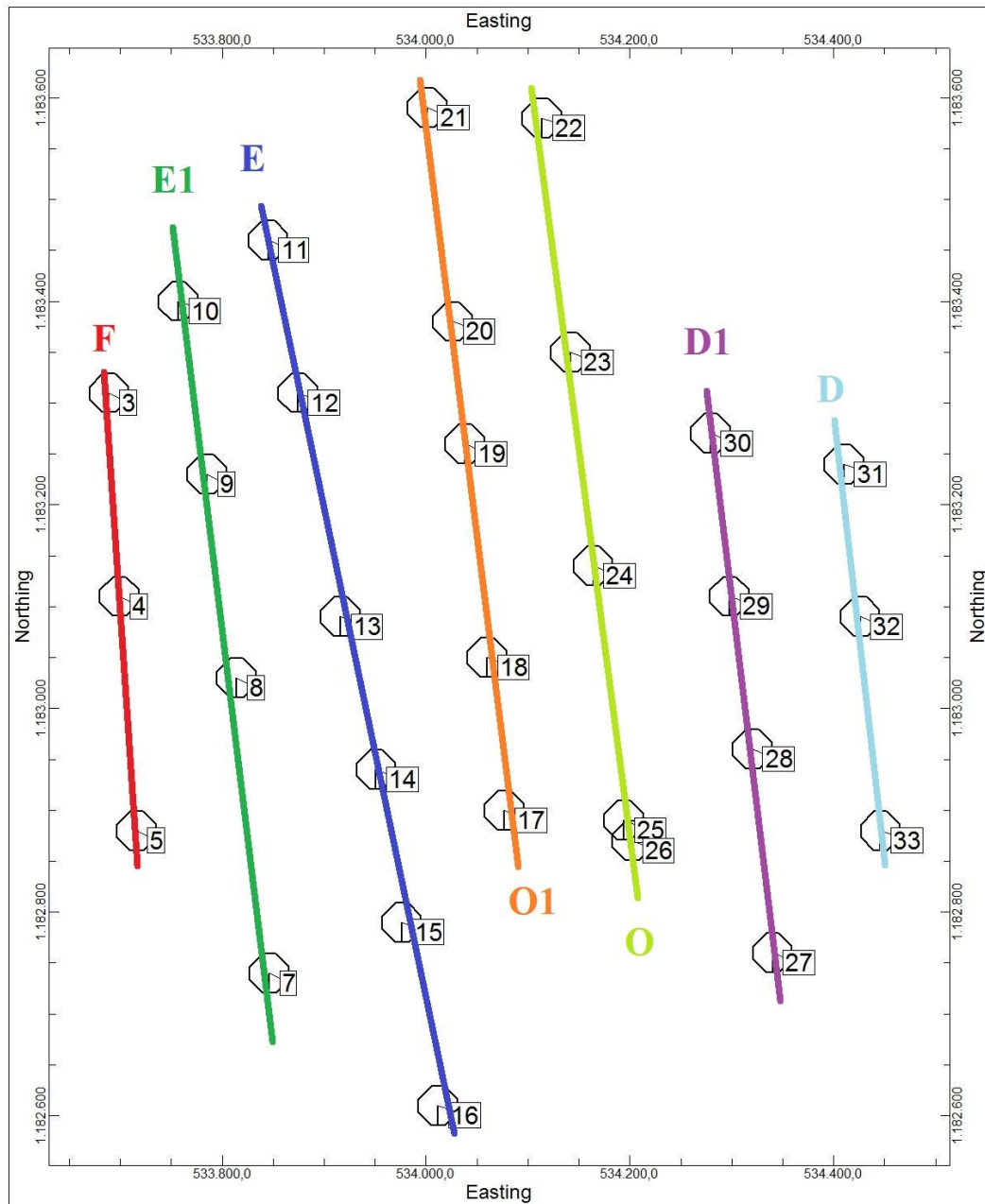


Figura 57.- Ubicación de los sondeos y las líneas que representan las variaciones laterales

En la figura 58 se puede observar que, el sondeo 3 está más cerca de la superficie y el sondeo 5 más profundo. Además, se observa como el espesor de la anortosita va aumentando gradualmente. Esta línea se encuentra en la zona más occidental de los sondeos, como se observa en la figura 58

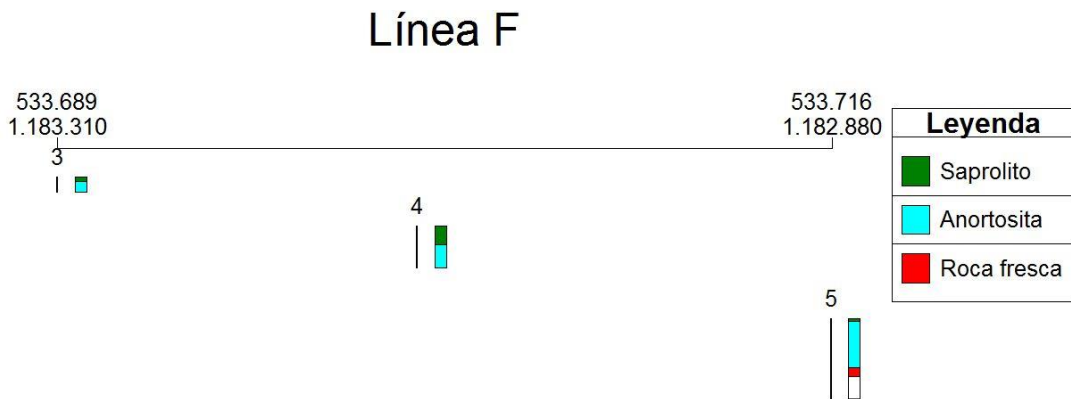


Figura 58.- Línea de sondeo F que incluye las perforaciones 3, 4 y 5

La imagen 59 muestra 2 tendencias, la primera en los sondeos 7 y 8, que van desde una zona más profunda hacia la superficie, y donde los niveles de roca fresca son altos. La otra tendencia es la de los sondeos 9 y 10, que se van profundizando y ya no hay roca fresca, y el espesor de anortosita va aumentando; además estos dos últimos sondeos poseen altas concentraciones de titanio, por lo que son bastante prospectivos. Este sondeo está hacia la zona centro – oeste, como se observa en la figura 57.



Figura 59.- Línea de sondeo E1 que incluye las perforaciones 7, 8, 9 y 10

La figura 60 igualmente muestra 2 tendencias, la de los sondeos 11, 12 y 13, que van en tendencia ascendente hacia la superficie y con espesores de anortositas mayores a 10 metros, en donde hay altos porcentajes de TiO_2 . Los sondeos 14, 15 y 16 muestran sondeos que se van hacia una región más profunda, los espesores de anortosita disminuyen y aumenta el de roca fresca, por lo que son menos importantes para la prospección que los primeros 3. Esta línea está más cerca del centro del depósito como se observa en la figura 57

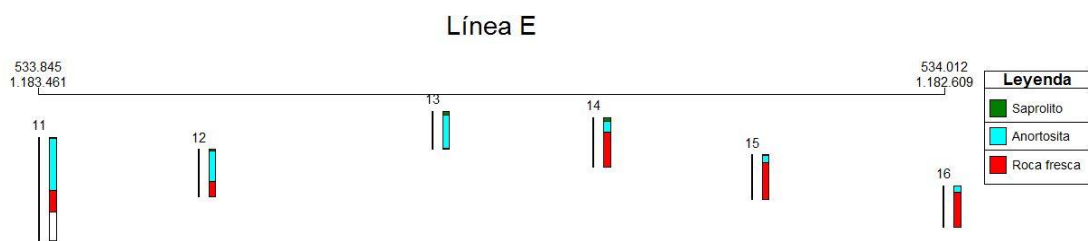


Figura 60.- Línea de sondeo E que incluye las perforaciones 11, 12, 13, 14, 15 y 16

La figura 61 muestra que los sondeos se encuentran en una región profunda en el depósito, aunque los espesores de anortosita se mantienen similares, las concentraciones de titanio disminuyen un poco. Esta línea está en la zona central del depósito (figura 57).

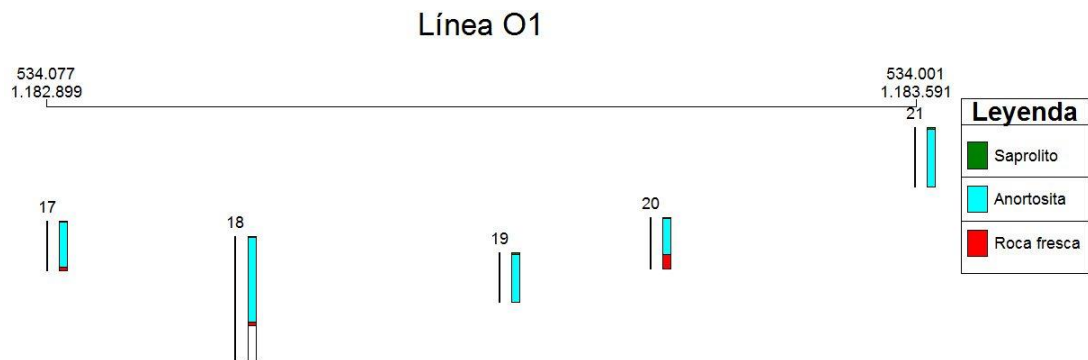


Figura 61.- Línea de sondeo O1 que incluye las perforaciones 17, 18, 19, 20 y 21

En la figura 62 es posible observar como los sondeos van profundizando poco a poco dentro del depósito y los espesores de anortosita van disminuyendo, haciendo que la zona sea poco llamativa para la prospección. Igualmente ésta línea está ubicada en la zona central del depósito (figura 57).

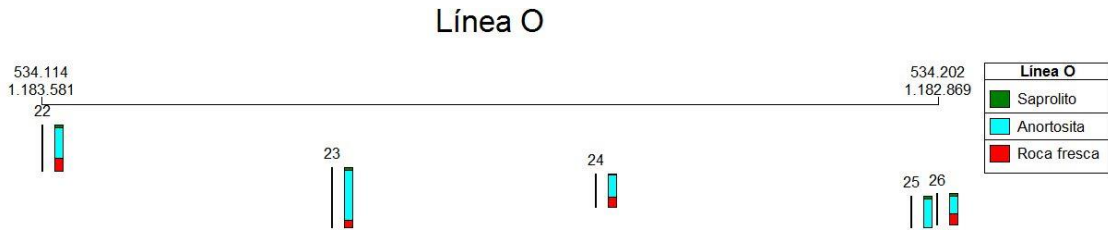


Figura 62.- Línea de sondeo O que incluye las perforaciones 22, 23, 24, 25 y 26

La figura 63 muestra que los espesores de anortosita van aumentando hacia el sondeo 30. Si bien se observa que los espesores de anortosita son alto, la concentración del titanio es baja, por lo que no es una zona prospectiva. Esta línea se encuentra hacia la zona oriental del depósito (figura 57).

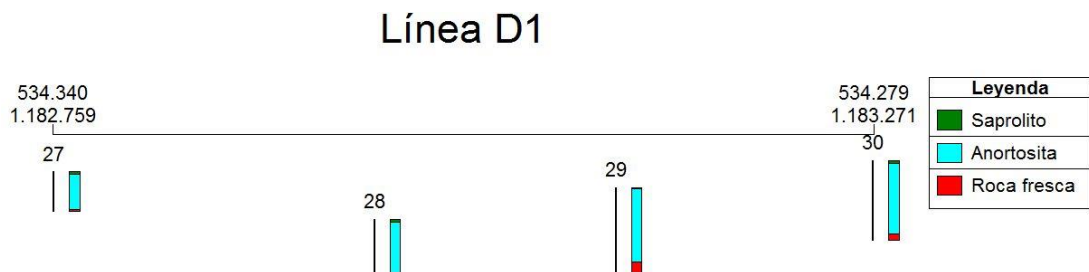


Figura 63.- Línea de sondeo D1 que incluye las perforaciones 27, 28, 29 y 30

La figura 64 muestra que los sondeos van haciéndose más profundos pero el espesor se mantiene constante, sin embargo, las concentraciones de TiO_2 no son tan importantes como en otras zonas. Es la línea que se encuentra más al este (figura 57) del depósito.

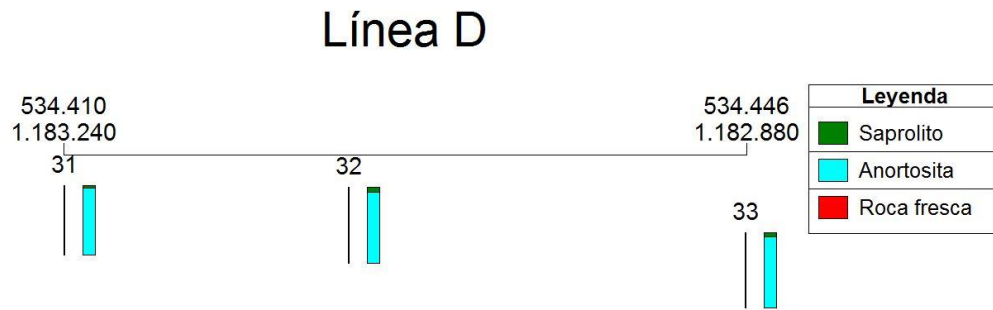


Figura 64.- Línea de sondeo D que incluye las perforaciones 31, 32 y 33

VI.8.2 Modelos propuestos

Otra parte muy importante a la hora de hacer una caracterización de una zona son los modelos de subsuelo. A continuación, se presentan una serie de modelos de subsuelo basado en los datos obtenidos en las perforaciones, por Rodríguez y Añez (1978). Es importante destacar que el relieve mostrado en los modelos, es el relieve que hay en la superficie, debido a que si bien las profundidades dependen de las perforaciones realizadas por Rodríguez, el relieve superficial es obtenido por las cotas que el mismo Rodríguez dio en un trabajo y por los mapas mostrados anteriormente.

Este primer modelo (figura 65), está basado en las correlaciones laterales entre los pozos y sigue el mismo patrón de las líneas de sondeo anteriores. Se pueden observar los 4 puntos cardinales, y por tanto, el modelo en todas direcciones. Además, es posible apreciar que, hacia el norte y hacia el oeste son las zonas que poseen una mayor cantidad de anortositas titaníferas, que son el estrato que se está buscando para su explotación.

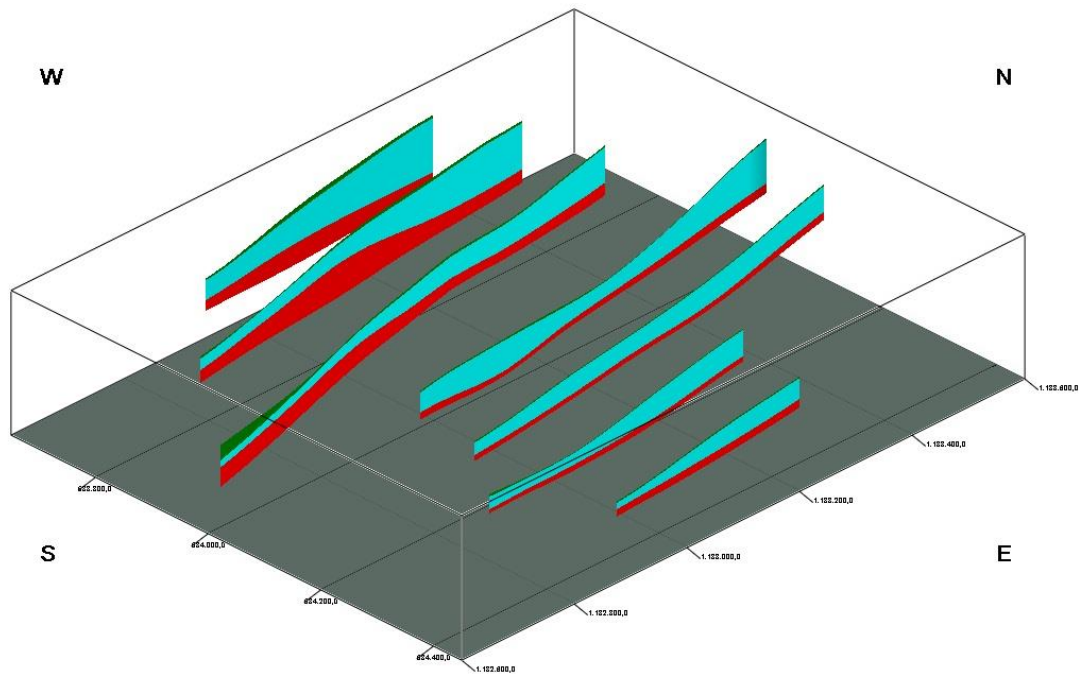


Figura 65.- Modelos basados en la sección proyectada, en verde el saprolito, en azul la anortosita y en rojo la roca fresca.

El siguiente modelo (figura 66) muestra las 3 superficies, saprolito, anortosita y roca fresca, junto con el relieve superficial que se observa en la capa de saprolito. Se observa que hacia el noroeste está la zona más elevada y de más fácil acceso a las anortositas, así mismo en esta zona la cantidad de saprolito es baja. También se puede observar que hacia el centro de la figura hay un bajo estructural.

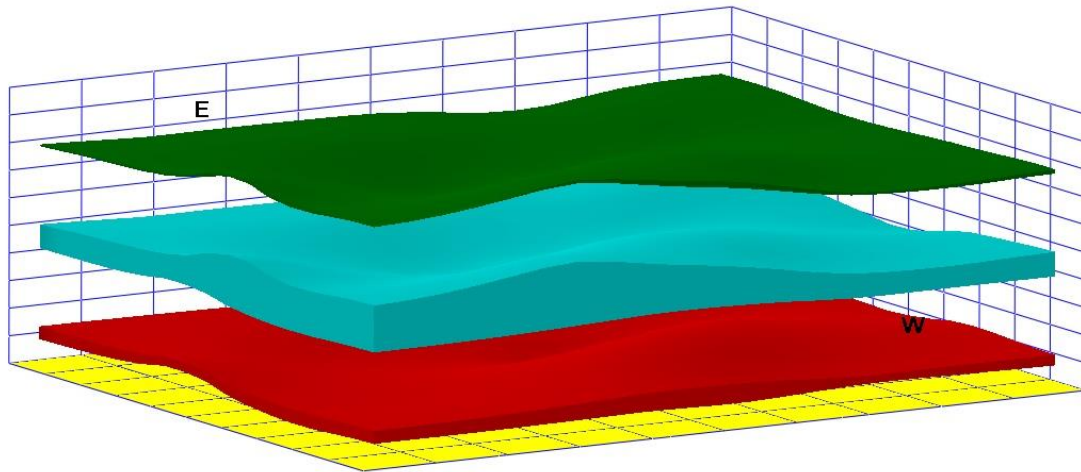


Figura 66.- Modelo mostrando las capas de Saprolito (verde), Anortosita (azul) y roca fresca (rojo)

El siguiente modelo es un mapa isópaco en 3D de la capa de Anortosita (Figura 67). En el modelo se puede observar la capa de anortositas desde los 4 puntos cardinales, para así poder analizar a detalle esta capa. Este modelo ilustra que la zona al oeste es la que se encuentra más elevada y en el centro se encuentra la zona más profunda, por lo que es la zona menos llamativa para perforar. Esto igualmente se puede observar en la figura 68 y en la figura 69, la cual es en 2D pero muestra la ubicación de los sondeos dentro del modelo.

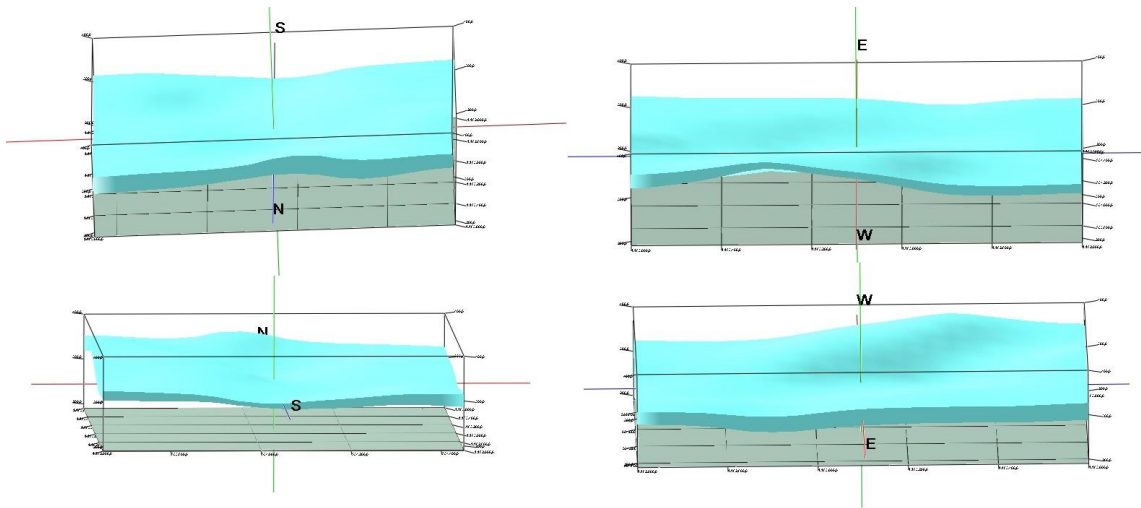


Figura 67.- Mapa isópaco 3D de la capa de Anortosita con vistas desde los 4 puntos cardinales.

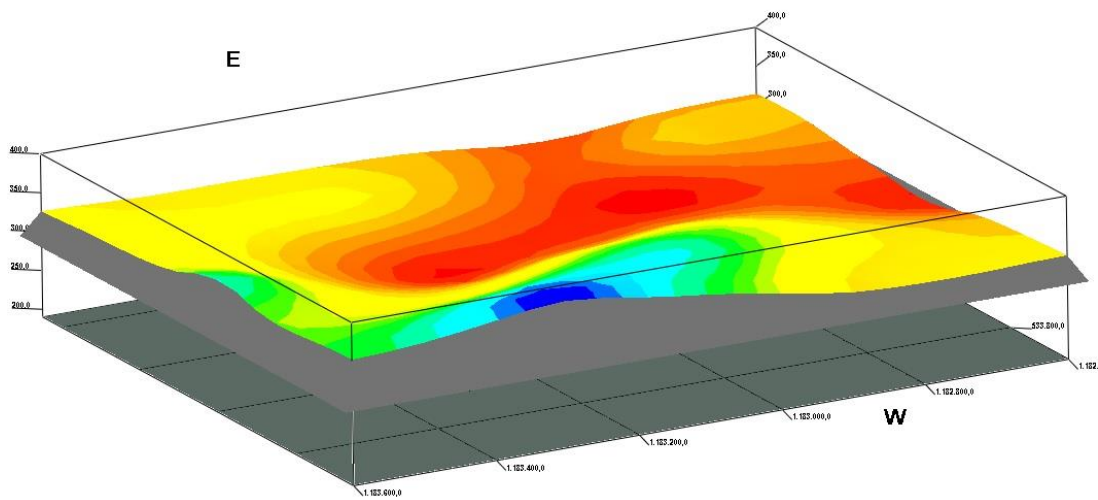


Figura 68.- Mapa estructural en 3D de la capa de Anortositas. Los rangos de alturas van de los 200 a los 400 m. El color rojo representa la zona más profunda y la azul la menos profunda.

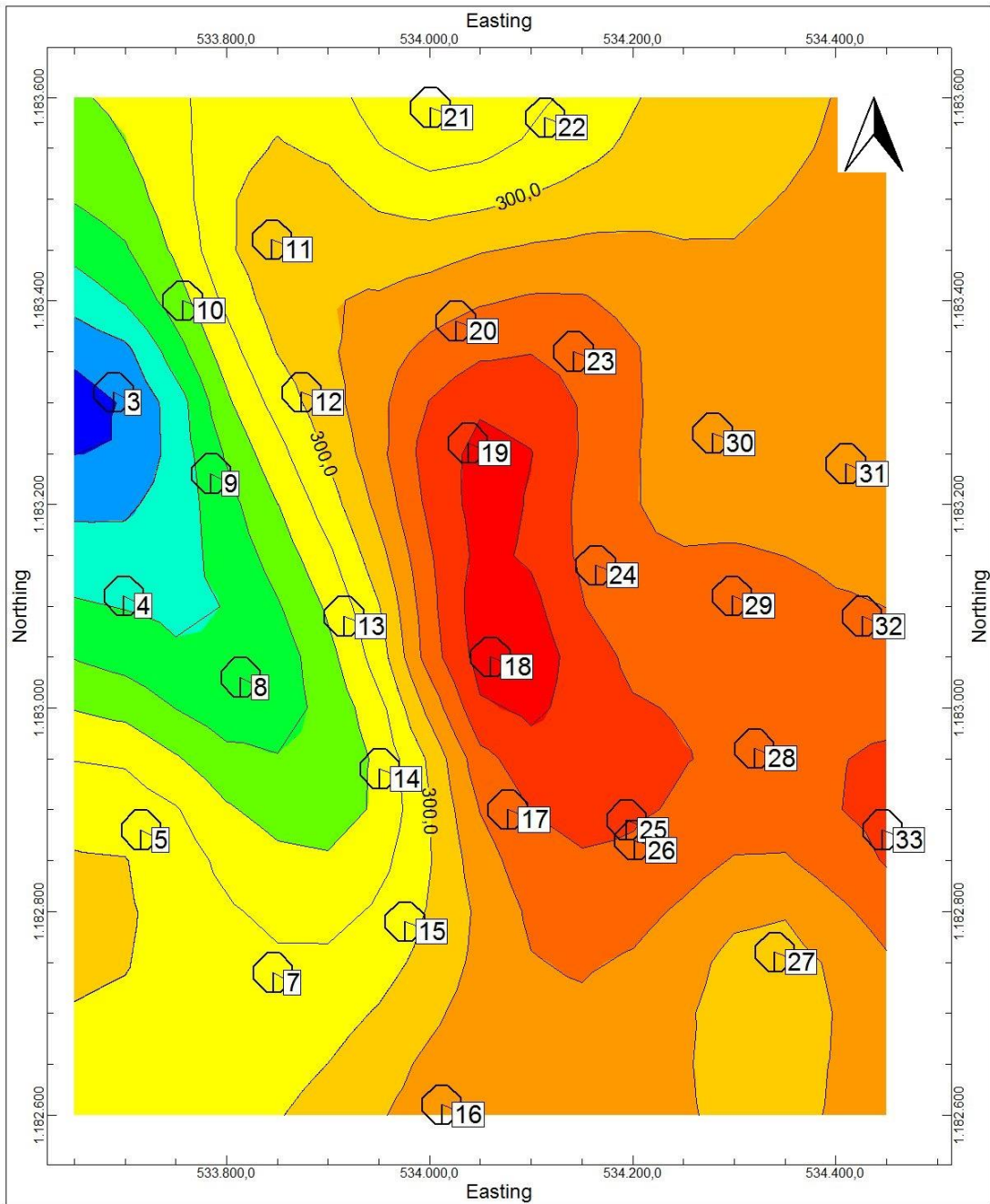


Figura 69.- Mapa estructural en 2D de la capa de Anortositas. Los puntos que se observan son la ubicación de los distintos sondeos. El color azul es la zona más cercana a la superficie y la roja la más profunda

VI.8.3 Análisis de los resultados de los datos de las perforaciones hechas por Rodríguez y Añez (1978).

Basándose en los modelos presentados, la zona con mayor facilidad para la perforación se encuentra hacia el noroeste, en donde se puede apreciar un alto estructural que hace que la zona esté más cercana a la superficie. Así mismo la zona con mayor dificultad para la perforación se encuentra en la zona central, en donde hay un bajo estructural y, por tanto, la distancia a perforar es mayor.

Igualmente, basándose en los porcentajes de TiO_2 , la zona con mayor potencial para explotación se encuentra al centro y al noroeste, en donde los sondeos 8 y 21 son los que tienen concentraciones más altas del óxido, pero especialmente los de la zona noroeste, debido a que al encontrarse más cerca de la superficie, su explotación es más sencilla y, por tanto, es la zona con mayor potencial.

VI.9 INTEGRACIÓN DE DATOS

Uno de los objetivos planteados es hacer la integración de datos, tanto de geología, geoquímica y geofísica, para así poder delimitar la mejor zona prospectiva. Estos datos geofísicos no aportan mucha información, únicamente que en San Quintín existen niveles muy altos en cuanto a las anomalías gravimétricas y magnéticas, y que gracias a ellos se puede inferir el origen de estas rocas. Sin embargo, la escala a la cual Gomes y Sandoval (2008) realizaron su trabajo, no permite indicar en cuales zonas del cerro se encuentran las respuestas más elevadas de gravimetría y magnetometría.

A través de los mapas generados, se pudo conocer el relieve superficial del Cerro San Quintín, lo cual, a la hora de crear los modelos fue de mucha ayuda, ya que

da la información superficial, para así crear modelos más realistas. Y también, gracias a los lineamientos estructurales interpretados en esta investigación, se puede conocer que el Cerro San Quintín parece tener un movimiento aparente hacia el norte o NW, y lineamientos tienen una dirección preferencial de NW-SE, lo que concuerda con lo propuesto por Audemard (1997) y Monsalve (2019).

Con respecto a los datos geológicos y geoquímicos, si se puede hacer una integración. La geoquímica arroja que, por un lado, que estas rocas son muy ricas en plagioclasas, y ya que las anortositas están compuestas casi en su totalidad de plagioclasas, estas rocas son prácticamente pura anortosita, lo cual concuerda con lo encontrado por Grande (2014), que luego de realizar los análisis petrográficos, indica que las rocas encontradas en el Cerro San Quintín, poseen más de 90% de plagioclasas.

Además, los datos químicos también indican zonas donde los porcentajes de TiO_2 son mayores a 4,5%, lo cual ya se considera explotable (Figura 70). Estas zonas se pueden dividir en dos, una central y otra hacia el noroeste. Sin embargo, al analizar los modelos creados, se observa que, si bien la zona central posee altos porcentajes, se encuentra en un bajo estructural. En cambio, la zona al noroeste, se encuentra en un alto estructural, posee zonas donde los sondeos indican porcentajes de TiO_2 mayores a 5% y los espesores de anortositas son mayores a 15m, por lo que esta se propone como la mejor zona de interés para las anortositas titaníferas, como se observa en la figura 71.

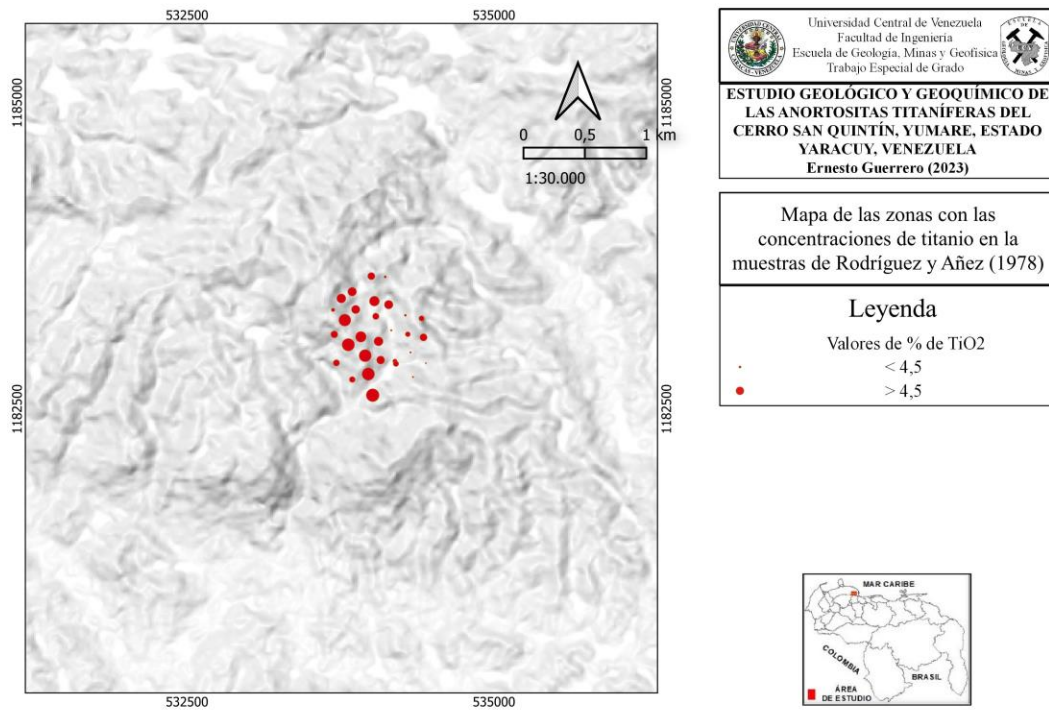


Figura 70.- Mapa con las ubicaciones de las zonas con las concentraciones de titanio en la muestras de Rodríguez y Añez (1978)

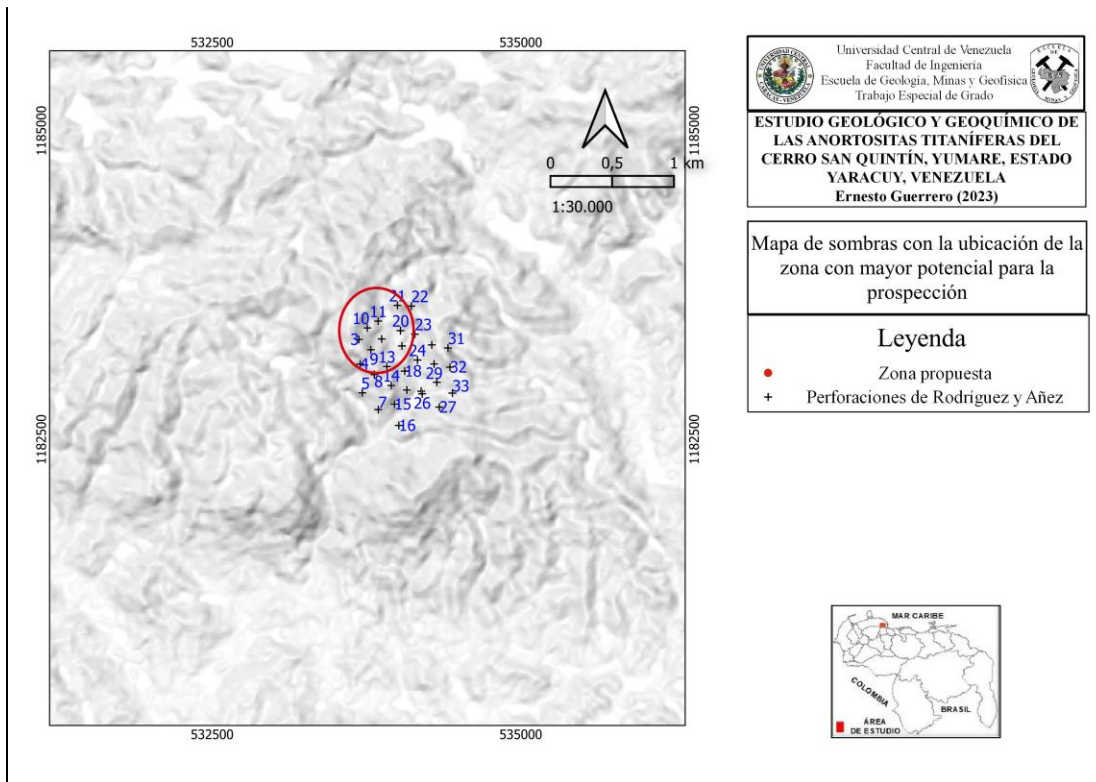


Figura 71. Mapa con las ubicaciones de las perforaciones realizadas por Rodríguez y Añez (1978). En rojo la zona que se propone como la de mejor potencial, que posee las mayores concentraciones de titanio y con mayor cercanía a la superficie.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1 CONCLUSIONES

- Basado en las imágenes satelitales, la cantidad de sedimentos observables en el Cerro San Quintín es de baja a prácticamente inexistente, por lo que se infiere que la roca se encuentra expuesta.
- Se infiere que en el Cerro San Quintín está la mayor respuesta a datos gravimétricos y magnetométricos, y estos coinciden con las anortositas encontradas, que a su vez poseen las concentraciones de titanio más altas hacia el centro del Cerro San Quintín.
- Los lineamientos estructurales presentan una dirección preferencial NW, lo que coincide con las propuestas de Lozano y Mussari (2007) y Monsalve (2019), y que a su vez Audemard (1997) propuso como esfuerzo principal para la zona. Además, la zona con mayor densidad de estructuras se ubica al NW y al este del Cerro San Quintín.
- Hay zonas donde la concentración de titanio supera el 4,5% y se encuentran hacia la parte central y oeste, dentro de la zona de perforaciones realizada por Rodríguez y Añez (1978), sin embargo, la zona centro-sur corresponde con la parte más profunda de la zona de estudio.
- A partir de los datos de los modelos obtenidos de las perforaciones de Rodríguez y Añez (1978), la zona más adecuada para estudiar se encuentra al noroeste, ya que es la zona que se encuentra más cercana a la superficie, en un alto estructural, posee espesores mayores a 15 m y es una de las zonas que poseen las concentraciones de titanio más altas.

VII.2 RECOMENDACIONES

- Se sugiere recolectar más muestras para estudios mineralógicos, para hacer una caracterización avanzada de la mineralogía en todo el cerro, ya que hay varias zonas de las que no se tiene información.
- Se recomienda realizar estudios a escala 1:10.000 para obtener información detallada del cerro, y poder delimitar el tamaño real del depósito.
- Realizar más perforaciones hacia la parte central y norte del Cerro San Quintín, ya que esta zona no posee casi información y, según los modelos, es la zona con mayor potencial.
- Se recomienda usar métodos geofísicos como el eléctrico, gravimétrico y magnetométrico, a escala local.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Ashwal, L.D. (1988). Anorthosite: Classification, Mythology, Trivia and a Simple Unified Theory. Lunar and Planetary Institut.
- Ashwal, L.D. (2010). The temporality of anorthosites. *The Canadian Mineralogist*. 48. Pag. 712.
- Ashwal, L. D. (1993). Anorthosites. Springer-Verlag. 422 p.
- Ashwal, L. D., Grant M. Bybee (2017). Crustal evolution and the temporality of anorthosites, *Earth-Science Reviews*
- Ashwal, L.D., Morrison, D.A., Phinney, W.C., Wood, J. (1983). Origin of Archean Anorthosites: Evidence from the Bad Vermilion Lake Anorthosite Complex, Ontario. *Contribution to Mineral and Petrol.* 82: 259-273.
- Audemard, F. (1995) La Cuenca Terciaria de Falcón, Venezuela Noroccidental Síntesis Estratigráfica, Génesis e Inversión Tectónica. IX Congreso Latinoamericano de Geología. Caracas: Venezuela.
- Audemard, F. (1997) Tectónica activa de la región septentrional de la cuenca invertida de Falcón, Venezuela occidental. VIII. Memorias del Congreso Geológico Venezolano, tomo 1, pp. 93-100. Caracas: Venezuela.
- Baillargeon, S. (2005). Le krigeage: revue de la théorie et application a l'interpolation spatiale de données de précipitations. Faculté des études supérieures de l'Université Laval. Quebec. Canada.
- Baquero, M. (2015). Evolución geodinámica del noroccidente de Venezuela, basado en nuevos datos de geocronología, geoquímica e isotópicos. Tesis doctoral. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Bellizzia A., Rodríguez G. (1976). Geología del estado Yaracuy. Mem. IV Congr. Geol. Venezolano, Caracas 1969. Bol. Geol. Public. Esp. 6: 3317-3417.
- Bolzoni, L. (2011). Diseño y Procesado de Aleaciones de Titanio mediante Técnicas Pulvimetalúrgicas Avanzadas .Universidad Carlos III De Madrid. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10016/13707>.
- Chuvieco E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. Rialp, S.A. Madrid 2da Edición. 450 pp.
- Chuvieco, E. (2008). Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Tercera edición. Editorial Ariel, S.A. Barcelona.
- Escalona, A. & Mann, P. (2010). Tectonics, basin subsidence mechanisms, and paleogeography of the Caribbean-South American plate boundary zone. *Marine and Petroleum Geology*, Num. 28, pp. 8–39

- ESRI (2018). ¿Qué es ArcGIS?: <http://resources.arcgis.com/es/help/gettingstarted/articles/026n00000014000000.htm>. Consulta 4 enero de 2023.
- Ferreira, A. (2006). Técnicas De Interpolacion Espacial Utilizadas En La Evaluacion De Reservas Geologica. 17-21 Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Franco, R. (2017). Composiciones Landsat en Arcgis.
- Gil Mur, F., Manero, J., Rodríguez, D., Andrés, A., Arandés, J., Planell, J. (2001). Aleaciones ligeras. Ediciones UPC. Barcelona. 158 p.
- Giraldo, R. (S.f.). Geoestadística. Aplicación en la caracterización de yacimientos. Universidad Nacional de Colombia. 49 p.
- Gomes, F., Sandoval, R. (2008). Estudio geofísico integrado en la zona de Yumare-Aroa, Estados Yaracuy y Falcón. Tesis de pregrado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- Grande, S. (2000). Guía de yacimientos minerales metálicos (Sin publicar). Escuela de geología, minas y geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.
- Grande, S., Urbani, F. Mendi, D. (2007). Presencia de un Basamento Grenvilliano en el Noroccidente de Venezuela. IX Congreso Geológico Venezolano. Caracas.
- Grande, S., Urbani, F. (2009). Presence of high-grade rocks in NW Venezuela of possible Grenvillian affinity. Geological Society, London, Special Publications, 328(1), 533–548.
- Grande, S. (2012a). Modelos evolutivos de la Cuenca de Falcón. Revista Geos 42. IV Simposio Venezolano de Geociencias de las Rocas Ígneas y Metamórficas. Universidad Central de Venezuela. Caracas: Venezuela, pp. 52-55.
- Grande, S. (2012b). Terreno Falconia: Bloque alóctono Neoproterozoico en el NO de Suramérica. Revista Geos 42. IV Simposio Venezolano de Geociencias de las Rocas Ígneas y Metamórficas. Universidad Central de Venezuela. Caracas: Venezuela, pp. 56-60.
- Grande, S. (2013). Petrología de las rocas de alto grado metamórfico presentes en el noroccidente de Venezuela. Tesis de Maestría. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- Gupta, A y Rao, K., (2001) Weathering índices and their applicability for crystalline rocks. Bull Eng Geol Env 60:201-221.
- Gupta, R. (2013). Remote sensing geology 2. Elsevier (vol. 33).

- Le Maitre, R. W. (2002). *Igneous rocks. A classification and glossary of terms*. 2nd edition. Cambridge University Press. Pag. 57.
- Lozano, F., Mussari, A. (2007). *Geología de los macizos ígneo-metamórficos del norte de Yumare, estados Yaracuy Y Falcón*. Tesis de pregrado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- Lugo, R. (2020). *Estudio geoquímico de los procesos de meteorización de la anortosita del Cerro San Quintín, Estado Yaracuy-Venezuela*. Tesis de pregrado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela.
- Meschede, M. & Frisch W. (1998). A plate-tectonic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Caribbean plate. *Tectonophysics* Vol. 296, p. 269-291.
- Monsalve, J. (2019). *Evolución tectonoestratigráfica de la cuenca Agua Salada – subcuenca El Tocuyo, Estado Falcón*. Tesis de maestría. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Navarro Poppe, G. (2020). *Comparación entre la aplicación de kriging y cokriging para estimar especies de cobre en un yacimiento tipo pórfido cuprífero*. Tesis de grado. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería de Minas.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. 854 p.
- Pérez del Pino, A. (2003). *Coloración del titanio mediante el tratamiento superficial de oxidación por láser*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. Departament de Física Aplicada i Òptica.
- Pindell, J. y Kennan, L. (2009). *Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update*. *Tectonic Analysis Geological Society of London, Special Publication*, pp. 1-60.
- Porras Velázquez, A. (s.f.) *Método Kriging de inferencia espacial*. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo". México.
- Rey-Moral, C., Mochales, A., Merino Martínez, E., García Lobón, J., López Bahut, M., Martín-Banda, R., Carmen Fera, M., Ballesteros, D., Machado, A., Alves, D. (2022). *Recording the largest gabbro-anorthositic complex worldwide: The Kunene Complex (KC), SW Angola*. *Precambrian Research* 379.
- Ringrose, P., Bentley, M. (2015). *Reservoir Model Design*. In *Reservoir Model Design*.

- Rodríguez, S., Añez, G. (1978). Los depósitos de mena titaníferas de San Quintín Central, Estado Yaracuy, génesis, caracteres geológicos y estimación de reservas. *Boletín de geología* número 24. Pag. 84-95.
- Rodríguez, A. (2020). Caracterización geoquímica de la anortosita del Cerro San Quintín, Yumare, Edo. Yaracuy–Venezuela. Tesis de pregrado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela.
- Romero, E. (2019). Actualización geológica-cartográfica de la hoja 6448 ubicada al sur-este de Falcón oriental, mediante el uso de sensores remotos. Tesis de pregrado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- Sotiriou, P., Polat, A. (2023). Petrogenesis of anorthosites throughout Earth history. *Precambrian Research* 384. 24 p.
- Soto, M. (1997). “Fumarolas” del Estado Lara: estudio geológico de los procesos de combustión espontánea de rocas carbonosas. Tesis de pregrado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth Sci.* 12, 1-33.
- Suarez, C., Candela, L. (2018). Uso de Sensores Remotos y Software Libre en la Cartografía de Lineamientos Geológicos: Caso de estudio, Flanco Occidental del Macizo de Santander, Colombia. 9 Congreso de la ciencia cartográfica.
- Tejada, J. (2019). Caracterización de lineamientos estructurales aplicando imágenes de satélite Landsat TM y su significado tectónico en la franja suroccidental de la zona Moquegua-Tacna. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Unidad de Posgrado de la Facultad de Geología, Geofísica y Minas, Arequipa.
- Torres Roldan, R. L., García-Casco, A., Molina Palma, J. F. (2004). Petrología metamórfica. Asistente de prácticas. Departamento de mineralogía y petrología. Universidad de Granada.
- Urbani F., Lozano, F., Mussari, A., Grande, S., Mendi, D., Wright, J. E. (2012). Geología de los macizos de Tarana, San Quintín, La Zurda y Salsipuedes, norte de Yumare, estados Yaracuy y Falcón, Venezuela. *Geos, UCV, Caracas*, 42: 151-155.
- Urbani, F. et al. (2014). Geología de la región septentrional de los estados Lara y Yaracuy. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Pag. 171, 438-446.
- Urbani, F. et al. (2015). Petrología de las unidades metamórficas de la región de Yumare, estados Yaracuy y Falcón, Venezuela. *Bol. Acad. C. Fís., Mat. y Nat.* Vol. LXXV No. 2.

- Valderrama, L. (2008). Concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playas de la región de atacama-chile. HOLOS, vol. 1, 2008, pp. 119-130.
- Vargas, C. (s.f.). Imágenes de satélite en la exploración geológica – minera. RS-GEOIMAGE.