

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

La cantera San Bernardo es una vieja explotación de caliza utilizada por la empresa Asfaltos Tocarón C.A., para obtener agregados finos y satisfacer las necesidades de la planta de asfalto; así como producir agregados gruesos para la industria de la construcción de la región.

Esta cantera estuvo inactiva desde el año 2000, fecha de cese de las actividades mineras de la empresa Asfaltos Tocarón, C. A., hasta el año 2005, cuando fue reactivada por Fábrica Nacional de Cementos, SACA.

En el informe de trabajo de exploración geológica realizado por GEOCONSULTAS en el año 2000, y como consecuencias de “las pocas posibilidades de encontrar un gran yacimiento de caliza en las inmediaciones de la planta”, se le recomendó a LAFARGE-FNC la adquisición de esta cantera, que en ese momento estaba inactiva o sub-explotada.

La Fábrica Nacional de Cementos SACA, adquirió de la empresa Asfalto Tocarón C.A. “el inmueble, constituido por un lote de terreno y construcciones e instalaciones que sobre él se encuentran, ubicado en la hacienda San Bernardo, constituido por una superficie de 45,5 hectáreas”; esta propiedad constituye el espacio físico donde se encuentra localizada la Cantera San Bernardo. A partir del 01 de Enero de 2009, la FABRICA NACIONAL DE CEMENTOS S.A.C.A, comienza a efectuar sus operaciones bajo las direcciones del Gobierno Bolivariano de Venezuela, obteniendo una participación mayor del 80% de las acciones totales.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar geológicamente la cantera San Bernardo ubicada en el municipio Tomas Lander de los Valles del Tuy, en el estado Miranda, para generar un modelo geológico actualizado y estimar el volumen de reservas existentes en el yacimiento

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar levantamiento geológico del macizo rocoso.
- Realizar análisis petrográficos de muestras colectas en campo, para determinar la composición mineralógica y el tipo de roca presente.
- Realizar análisis químicos de muestras colectadas en campo mediante fluorescencia de rayos X, para determinar las concentraciones de los elementos mayoritarios SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, y CaO.
- Realizar cortes geológicos de la zona para observar la disposición y tendencia de la litología en el subsuelo.
- Realizar un estudio geoquímico de las campañas de perforación, para estimar la variación de los componentes mayoritarios con relación a la profundidad.
- Generar un modelo geológico 3D, a partir de los datos suministrados por las perforaciones realizadas en las campañas de exploración.
- Estimar la cantidad de reservas existentes en el yacimiento.
- Elaborar un mapa geológico de la zona.

1.4. UBICACIÓN Y VIAS DE ACCESO

El área de estudio se encuentra ubicada en el municipio Tomas Lander, municipio Ocumare del Tuy, al SO del estado Miranda, aproximadamente a 4 km al NE de la población de Ocumare del Tuy, en la hacienda San Bernardo, propiedad que tiene un área aproximada de 45 ha.

El acceso a la cantera se logra a través de la carretera que une la hacienda San Bernardo con la población de Ocumare del Tuy, vía Asentamiento Rangel; así como también a través de la carretera nacional que va hacia Tocarón desde la misma población de Ocumare. El área de estudio se encuentra entre las coordenadas UTM, N: 1.121.500 - E: 748.100 y N: 1.120.800 - E: 747.100.

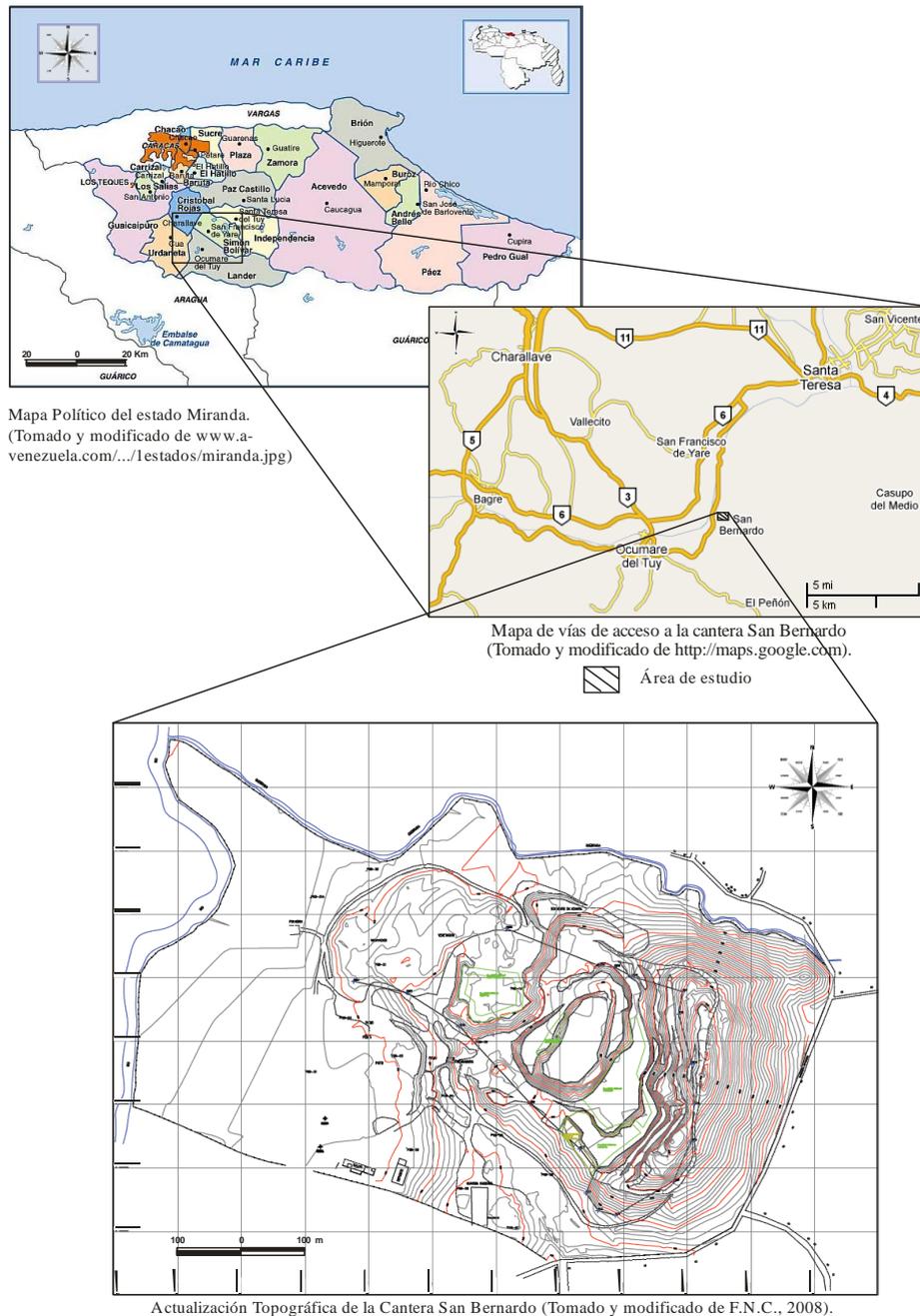


Figura 1. Ubicación regional y local del área de estudio.

1.5. JUSTIFICACIÓN

La cantera San Bernardo es una vieja explotación de caliza recuperada por F.N.C. - Fábrica Nacional de Cemento, para cubrir sus necesidades de materia prima carbonática. El último trabajo geológico en la cantera fue realizado en el año 2006. En vista de que no se han realizado estudios geológicos recientes, con este trabajo se realizó una caracterización geológica actualizada de la cantera.

El estudio está orientado a la actualización de la información geológica, a fin de agilizar y orientar las labores de extracción y producción de caliza, para establecer el marco de referencia de los futuros trabajos que se llevarán a cabo en la cantera San Bernardo.

1.6. TRABAJOS PREVIOS

- AGUERREVERE Y ZULOAGA (1937-1938). Estudiaron la geología de la cordillera de la Costa, y establecieron la primera correlación estratigráfica y dieron nombres a las formaciones. Sus conceptos sobre la estructura y estratigrafía de la región fueron bastante correctas.

- VELARDE (1954). Realizó un estudio geológico de las canteras de Carapita al Noreste Antímano Distrito Capital. Concluyó que la zona estaba compuesta esencialmente de rocas metasedimentarias formadas por esquistos micáceos-calcareos, calizas cristalinas y esquistos cuarzo-micáceos, del Precretáceo o Cretáceo y que la estructura principal de la zona es un antiformal simétrico.

- WINKLER (1953). Presenta un trabajo en el XIX Congreso Geológico Internacional, señalando haber encontrado en la zona de Ocumare del Tuy numerosos parches de sedimentos cretácicos y paleocenos sobre material

metaígneo, con contactos triturados. Dichos cuerpos de pocos metros a varios kilómetros de extensión; donde encontró algunos fósiles pobremente preservados, que no permitieron determinar edad. Concluyó que estos cuerpos se encuentran preservados en graben, y posiblemente son los remanentes de un corrimiento al norte.

- WINKLER (1956). Presenta un nuevo y más extenso informe, donde se refirió a las colinas al norte y noreste del Peñón de Ocumare, como calizas localizadas entre las quebradas Angina, Guaratara y Miguel, que reposan sobre limolitas rojas, aparentemente en la misma posición estratigráfica que las calizas de los morros, aunque con facies diferentes. También clasifica que los bloques rodados de calizas paleocenas, que se localizan cerca de La Rosa, qda. Auguina, como parte de la Formación Guárico.

- SHARP (1956). Realiza un reconocimiento geológico donde colecta varias muestras de la cantera el Peñón de Ocumare, tanto de calizas como de las rocas circundantes. Este estudio indica una edad paleocena y un ambiente correspondiente a aguas someras, arrecifal o arrecifes satélites, y por debajo de estas calizas señala haber encontrado grawaucas de grano medio con granos subangulares y subredondeados de cuarzo, calcita, augita, magnetita, hematita, pórfidos y fósiles, todos en un matriz de arcillas sericitizadas.

- PEIRSON (1965). Realiza un estudio en el norte-centro de Venezuela, donde al referirse a las calizas del Miembro Morro del Faro de la Formación Guárico, dice que “Una extensión distante al noreste, de las calizas arrecifales pueden estar representados por la calizas formadoras de el morro localizado en El peñón a, 5 km al sureste de Ocumare del Tuy”.

- PEIRSON et al. (1966). Publica un resumen del informe anterior considerando nuevamente que las calizas de los morros de El Peñón pueden ser remanentes de las facies arrecifal de la Formación Guárico, pero aclara que esto no está bien establecido.
- FURRER & URBANI (1973). Realizaron un trabajo donde estudiaron localidades fosilíferas en cuevas ubicadas en las formaciones Las Mercedes y Guárico. Determinaron que los fósiles identificados indican una edad probable paleocena, y consideran que las calizas del Peñón de Ocumare, pertenecen al Miembro Morro del Faro de la Formación Guárico.
- URBANI, FURRER & ZAPATA (1986). Realizaron un estudio de las rocas cretácicas y paleocenas en el SE de Ocumare del Tuy, estado Miranda, a través del análisis petrográfico de 8 muestras, donde concluyeron que la flora y la fauna del Peñón de Ocumare, así como la evidencia presentada por otros autores anteriores, apuntan con bastante seguridad a una edad paleoceno, correlacionable con el Miembro Morro del Faro de la Formación Guárico.
- AUDEMARD (1984). Realizó un estudio micro y meso-tectónico de la cuenca del Tuy, donde señala la existencia de deformaciones neotectónicas sin y post-sedimentarias en las unidades sedimentarias, que se ubican preferencialmente en los márgenes de la cuenca; las cuales están constituidas por fallas que indican el origen tectónico de esta depresión. Concluyó que existen dos posibles modelos genéticos para la cuenca del Tuy: cuenca graben y cuenca de tracción.
- ALBERTOS (1989). Estudió dos secciones geológicas: Altagracia de Orituco-Agua Blanca (34 km de longitud) y Gamelotal-San Francisco de

Macaíra (17 km de longitud), estados Guárico y Miranda, donde determinó las relaciones estratigráficas entre la secuencia sedimentaria y metamórfica aflorante, interpretando las discontinuidades estructurales y realizando un estudio estadístico de estructuras primarias, proporciones litológicas y variables petrográficas de la Formación Guárico y sus equivalentes laterales.

- URBANI, CHIRINOS & MARQUINA (1990), realizaron un estudio detallado en la Faja de Villa de Cura, en la región de Guatopo, describiendo detalladamente la litología del Grupo Villa de Cura, la Formación Las Hermanas y el Complejo de Apa. Establecen el grado de metamorfismo que alcanzan cada una de estas unidades.
- FABRICA NACIONAL DE CEMENTOS (1998). Empezó un proceso de exploración y análisis de las canteras con mayor potencial de yacimiento, entre las cuales se encuentran las canteras San Bernardo, El Melero y Mume. Concluyeron que San Bernardo posee mayor tenor que las otras dos.
- GEOCONSULTA, C.A. (1999-2001). Realiza la revisión geológica de superficie, descripción de los núcleos de perforación y reevaluación de los resultados químicos, con miras a una actualización de la información litológica y química, y la delimitación geográfica del yacimiento presente en la cantera San Bernardo, concluyendo que esta cantera posee un tenor alto en material carbonático para la elaboración de cemento y una vida útil aproximada de 25 años.
- GEOCONSULTA, C.A. (2001). Realizó un plan de explotación minera en la cantera El Melero, llevado a cabo por la Fábrica Nacional de Cementos, con el propósito de extraer caliza para la elaboración del cemento y agregados para usos geotécnicos.

- SAYA (2001). Realizó el plan de explotación minero de la cantera San Bernardo con el fin de establecer la planificación de las operaciones mineras para el período 2002 - 2007, donde determinó que la calidad promedio de las reservas del yacimiento de caliza presentan un contenido de 94,78% de Carbonato de Calcio (CaCO_3), 2,31% de Sílice (SiO_2), 0,66% de Alúmina (Al_2O_3) y 0,45% de Hierro (Fe_2O_3) y concluyó que los costos operativos del yacimiento, se encuentran dentro del rango rentable establecido de explotación.

- URBANI & RODRÍGUEZ (2003). Integraron la información geológica de 148 hojas geológicas a escala 1:25.000 de la cordillera de la Costa, en el cuadrángulo de Cabo Codera - Morón - Nirgua - Guatopo. Simultáneamente actualizaron los textos de las entradas de las unidades de rocas ígneo-metamórficas de la Cordillera de la Costa en el formato del Léxico Estratigráfico de Venezuela, siguiendo además un lineamiento interinstitucional para que la actualización siguiera las normas para unidades litodémicas.

1.7. METODOLOGÍA

Para la realización de éste trabajo se ejecutaron tres etapas básicas, las cuales se catalogaron como: etapa compilatoria, etapa de campo, y por último etapa de laboratorio y de oficina.

1.7.1. ETAPA COMPILATORIA

- Revisión y recopilación bibliográfica: consistió en la búsqueda y estudio de los trabajos especiales de grado, congresos y demás documentación publicada de importancia realizada en la zona de estudio, información

encontrada en la Biblioteca Dr. Virgil Dil Winkler. Esta etapa continuó durante todas las fases.

- Revisión de mapas topográficos pertenecientes a la zona, encontrados en el Instituto Geográfico Simón Bolívar y en la empresa F.N.C., entre los cuales se encontraron Súcuta 6846-II-NO a escala 1:25.000 y de la hacienda San Bernardo a escala 1:1.000.
- Preparación de un método de recolección de muestras, para una fácil identificación y realización de análisis químicos y petrográficos en la etapa de oficina.

1.7.2. ETAPA CAMPO

La etapa de campo consistió en varias fases, las cuales se describen a continuación:

- Ubicación y selección de los afloramientos y puntos importantes a estudiar en los mismos, mediante un GPS previamente calibrado.
- Realización del levantamiento geológico de la zona: consistió en el estudio de los afloramientos encontrados mayormente hacia la zona este de la cantera, donde la topografía se encuentra dispuesta en terrazas o niveles, a consecuencia de su continua explotación minera mediante el método de cielo abierto. Estas terrazas presentan una altura de 10 m, con una longitud promedio de 200 m y se encuentran desde la cota 180 m hasta la cota 240 m sobre el nivel del mar. Para el levantamiento geológico se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

Caracterización de macizos rocosos:

- Descripción general del afloramiento: consistió en la descripción geológica general en afloramientos a partir de los aspectos y características observables a simple vista, para el reconocimiento de diferentes tipos litológicos. La descripción macroscópica incluye la identificación de texturas, composición mineralógica, tamaño de grano, presencia de fósiles, grado de meteorización (tabla 1), dureza, entre otros.

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
Fresco	No hay señales visibles de meteorización. Si acaso una tenue decoloración en superficies de discontinuidades más desarrolladas
Levemente Meteorizado	Decoloración que indica meteorización de las rocas intacta y superficies de discontinuidad. La roca puede estar algo más débil externamente, que en condición fresca.
Medianamente Meteorizado	Menos de la mitad de la roca se encuentra descompuesta y/o desintegrada. La roca puede presentarse fresca o descolorada como un enrejado discontinuo o en forma de pedazos individuales.
Altamente Meteorizado	Más de la mitad de la roca se encuentra descompuesta y/o desintegrada a suelo.
Completamente Meteorizado	Todo el material rocoso está descompuesto y/o desintegrado. La estructura del macizo original está prácticamente intacta.
Suelo Residual	Todo el material rocoso está descompuesto o desintegrado a suelo. La estructura del macizo original y su textura ha sido destruida. Hay un cambio de volumen pero el suelo no ha sido transportado.

Tabla 1. Terminología utilizada para determinar el grado de meteorización en un macizo rocoso (Tomada y Modificada de ISRM 1981).

- Descripción de rasgos estructurales presentes en la zona: éstos fueron determinados por las características geométricas de las estructuras y su grado de deformación, así como la continuidad de estas deformaciones

en dicha zona. La orientación de cada discontinuidad se determinó por su dirección de rumbo y buzamiento, medidos mediante el uso de una brújula.

- Diaclasas: se agruparon en familias (cuando son paralelas entre sí) y se determinó la persistencia de éstas por unidad de longitud (tabla 2).

DESCRIPCIÓN	PERSISTENCIA
Muy baja Persistencia	< 1
Baja Persistencia	1- 3 m
Persistencia media	3 – 10 m
Alta Persistencia	10 – 20 m
Muy alta Persistencia	> 20 m

Tabla 2. Terminología utilizada para la persistencia de discontinuidades (Tomada de ISRM 1981).

- Fallas: se determinaron a través de la medición de los planos de fallas, y se estableció el movimiento y tipo de éstas, a través de los criterios y estructuras tectónicas observadas en el levantamiento geológico.

Muestreo:

- Recolección de muestras: se colectó la cantidad de muestras necesarias para la elaboración de estudios químicos y petrográficos. La recolección de las mismas se realizó tomando en cuenta que tuvieran un tamaño aproximado de un cubo de 8 x 8 cm (volumen similar al puño de la mano), para realizar tanto las petrografías como los ensayos químicos. En cuanto a las muestras de rocas carbonáticas, se

recolectaron mayormente en zonas superficiales debido a la resistencia que éstas a ser fracturadas, mientras que a las litologías con menor dureza se tomaron muestras a profundidades mayores de 30 cm, para obtener rocas frescas. Las muestras que se colectaron se enumeraron de acuerdo a los siguientes criterios:

1. Las primeras tres letras (en mayúscula) corresponde a la zona: “MSB”, Muestra San Bernardo.
- 2.- El número siguiente a las primeras letras corresponde al número de la muestra, las cuales se enumeraron del 1 al 50: “MSB 1” - “MSB 50”.
- 3.- El tercer símbolo ubicado debajo de estos dos criterios anteriores, corresponde al nivel o terraza donde se recolectó la muestra:

“MSB 1”----- “MSB 50”
N → 180 ----- N → 240

1.8.3. ETAPA DE LABORATORIO Y OFICINA

Etapa Laboratorio

- Análisis petrográfico: consistió en la selección de una cantidad de 21 muestras, de las cuales 14 son representativas del material carbonático presente en el yacimiento, y el resto de diversos tipos litológicos encontrados en la cantera. Para el análisis petrográfico se utilizaron microscopios tanto ocular como binocular de luz polarizada y el análisis se enfatizó en las siguientes características: composición mineralógica, fósiles, porosidad, procesos diagenéticos o grados de metamorfismo, según fuese el caso.

- Análisis químicos: se seleccionaron una cantidad de 34 muestras, de las cuales 28 son rocas carbonáticas, y el resto de otros tipos litológicos. Estas muestras fueron preparadas para sus posteriores ensayos químicos mediante fluorescencia de rayos X, para determinar las concentraciones en porcentaje (%) de los elementos mayoritarios SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , y CaO . Estos ensayos fueron elaborados en la planta de Ocumare del Tuy de F.N.C. (Fábrica Nacional de Cementos), tomando en cuenta las normas empleadas por la empresa. Los ensayos se realizaron de la siguiente manera:
 1. Se procedió a tomar parte de la muestra original, de un tamaño aproximado de 4 x 4 cm.
 2. La parte de la muestra obtenida se introdujo en una trituradora de mandíbula G SIST (figura 2), de la cual se obtuvo un tamaño de grano menor a 5 mm. De lo obtenido se tomaron 200 gr.



Figura 2. Trituradora de mandíbula G SIST.

3. La muestra de 200 gr luego se introdujo en un pulverizador Bico Braun UA (figura 3), para obtener un tamaño de grano de 0,0625 mm. De lo obtenido se tomaron 150 gr.



Figura 3. Pulverizador Bico Braun UA.

4. Luego se procedió a colocar la muestra en un horno a 80° - 100° C, por 24 horas, con la finalidad de secarla para hacer más eficiente el pulverizado posterior.
5. Una vez que la muestra se encuentra seca, se procedió a pulverizarla en un equipo de molienda Shatter Box HERZOG (figura 4) para obtener un tamaño de grano de 7,65 micras, utilizando capsulas o morteros de carburo de tungsteno de diámetro 17 x 4 cm de profundidad con anillos y disco de 7 y 12 cm de diámetro x 4 cm de alto. La pulverización de la muestra se llevó a cabo de la siguiente manera:
 - El primer paso fue descontaminar los equipos de molienda. Para este proceso se procedió a limpiar los discos y anillos con alcohol isopropílico y secarlos con toallas de papel y aire a presión. Luego se introdujo 10 gr de cuarzo cristalino y se pulverizó por 20 segundos para asegurar una mejor descontaminación gracias a sus propiedades abrasivas.

- Una vez descontaminado el equipo, se colocan 20 gr de la muestra pulverizada y seca en el mortero. Posteriormente se añaden dos gotas de trietanolamina, para evitar que el material se adhiera a las paredes de los discos, y se deja moliendo por 200 segundos.



Figura 4. Equipo de molienda Shatter Box HERZOG, con morteros de carburo de tungsteno.

6. Se trasladan 20 gr de la muestra pulverizada a un vaso aforado y se mezcla con 1 gr de cera "C" micro-molida, para obtener una mejor compactación. Esta mezcla se coloca dentro del cilindro de la prensa HERZOG (figura 5), previamente limpio, donde se compacta a una presión de 400 KN, para obtener finalmente la pastilla prensada de la muestra.



Figura 5. Equipo de prensa HERZOG.

7. La pastilla prensada es colocada en el espectrómetro XRF Oxford IB-LABX3000 de sobremesa (figura 6), el cual incluye la medida rápida de Mg, Al, Si, K, Ca y Fe, controlado por microprocesador interno, por lo que no necesita ordenador externo para trabajar.



Figura 6. Espectrómetro XRF Oxford IB-LABX3000 de sobremesa.

Etapas Oficina

- Realización de un mapa con la ubicación de las muestras seleccionadas, tanto para los ensayos químicos como para la elaboración de secciones finas.
- Interpretación de los análisis petrográficos realizados a las muestras seleccionadas.
- Interpretación de los análisis químicos mediante el uso de perfiles geoquímicos y análisis estadísticos.
- Realización de perfiles geológicos del subsuelo, utilizando la información bibliográfica obtenida en las campañas de perforación realizadas en los

años 1998 y 2007, pertenecientes actualmente a F.N.C. (Fábrica Nacional de Cementos). Los perfiles se realizaron mediante el manejo del *software* Rockworks 14, perteneciente a la empresa Rockware Inc.

- Generación de un modelo geológico 3D mediante el manejo del *software* Rockworks 14, teniendo como base los perfiles geológicos.
- Estimación de la cantidad de reservas geológicas existentes en el yacimiento.
- Elaboración un mapa geológico de la zona, mediante el uso del *software* Autodesk Autocad 2007.

CAPÍTULO II

GEOGRAFÍA Y FISIOGRAFÍA

2.1. GENERALIDADES

La zona de estudio se ubica en la Serranía del Interior Central, la cual se encuentra dentro del Sistema Montañoso de la Cordillera de del Caribe. Se extiende a una longitud de casi 500 kilómetros desde la serranía de Portuguesa al oeste hasta el valle del río hasta Cúpira por el este, donde cae al piedemonte de la depresión del río Unare, siendo paralela al sur la serranía del Litoral, de la que se separa por un accidente tectónico que va desde la parte plana de la depresión del lago de Valencia hasta la planicie aluvial de Barlovento.

El límite norte está definido al oeste por la falla de Boconó de rumbo noreste y en el sector oriental por la falla de La Victoria de rumbo oeste-este, como consecuencia la Serranía del Interior aparece arqueada, cóncava hacia el sureste; el acodamiento coincide aproximadamente con la depresión entre Barquisimeto y Acarigua. Su límite sur es la línea de piedemonte que la separa de la Provincia de Los Llanos (GONZALEZ DE JUANA, 1980).

2.2. FISIOGRAFÍA

La serranía del Interior Central presenta una fisiografía mucho más compleja que la Cordillera de la Costa, bastante menos elevada y formada por numerosas filas y estribos que contrastan con el carácter rectilíneo de esta última. Aunque el grado de la serranía sigue siendo predominantemente este-oeste, los cursos de las filas son más tortuosos. Sus alturas son notablemente concordantes entre 1000 y 1200 metros en cuyos toques no se ha observado remanentes de gravas ni superficies erosionales de extensión regional; su máxima elevación es el cerro Platillón en el límite entre Carabobo y Guárico con 1930 metros de altura (GONZALEZ DE JUANA, 1980).

En las zonas altas las laderas están muy disectadas con valles en “V” pronunciada, ríos de fuerte pendiente de perfil longitudinal cóncavo hacia arriba y formas de terreno bastante independientes de la composición o estructura de la roca soportante, con excepción de las calizas que forman "morros" prominentes (GONZALEZ DE JUANA, 1980).

La zona de estudio se encuentra ubicada en las estribaciones noroeste de la serranía de Guatopo, localizadas al sur de la cuenca del Tuy (figura 7). Estas estribaciones presentan alturas de 200 a 1000 m ascendiendo gradualmente al sureste, con laderas moderadas de 20° - 45° de pendiente, mayormente simétricas, cóncavas, y valles angostos y poco profundos en forma de “V”. Audemard (1984), clasifica esta área como parte de la serranía meta-volcánica correspondiente a la formación geológica de la Asociación Metavolcanosedimentaria de Villa de Cura.

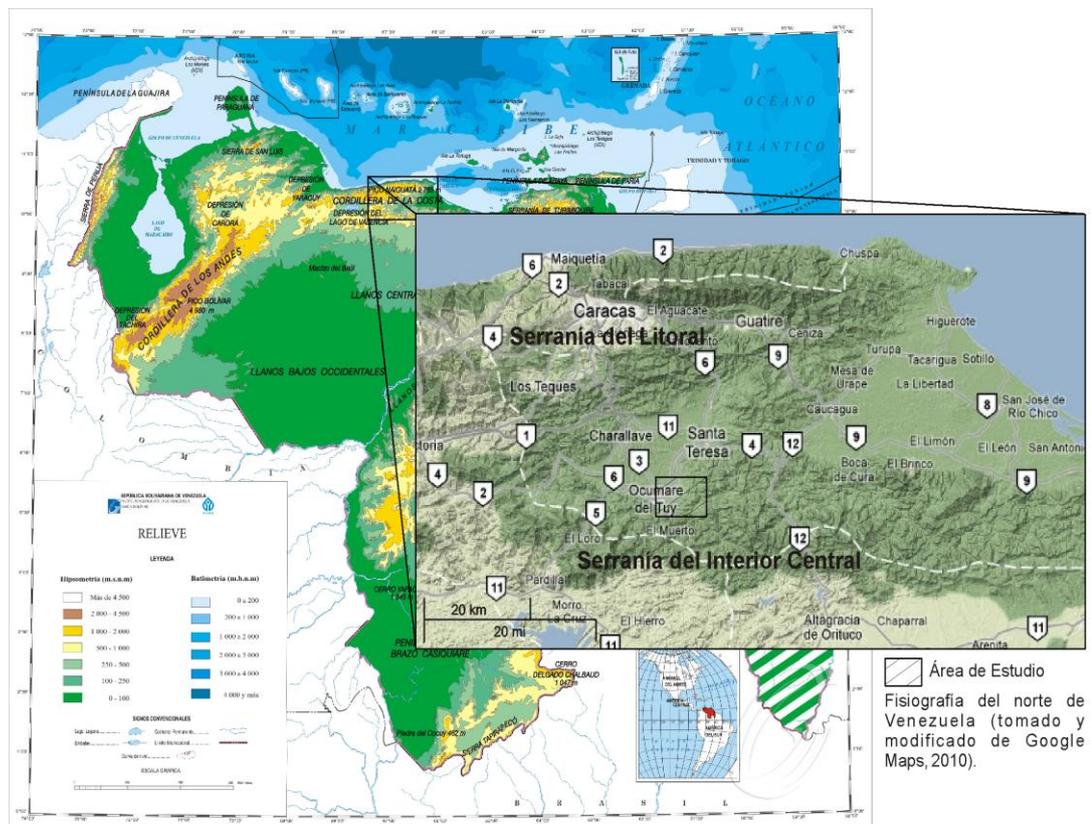


Figura 7. Mapa fisiográfico de Venezuela (tomado del Instituto Fisiográfico de Venezuela Simón Bolívar, 2010).

2.3. DRENAJE

El área de estudio se encuentra localizada fisiográficamente en la ribera oriental de la cuenca media del río Tuy, perteneciente a la cuenca hidrográfica del Caribe. En este sector la altura media (s.n.m.) del cauce del río es de aproximadamente 155 m y, el ancho del valle aluvial del río Tuy varía entre 500 y 1000 m.

Todo el drenaje regional es controlado por el río Tuy, siendo la quebrada San Miguel un curso de agua menor que bordea la parcela de la cantera por su lado noreste y que desemboca igualmente en el Tuy (figura 8). Es de considerar que el extremo occidental de la parcela (área del polvorín), se encuentra a 100 m del río Tuy.

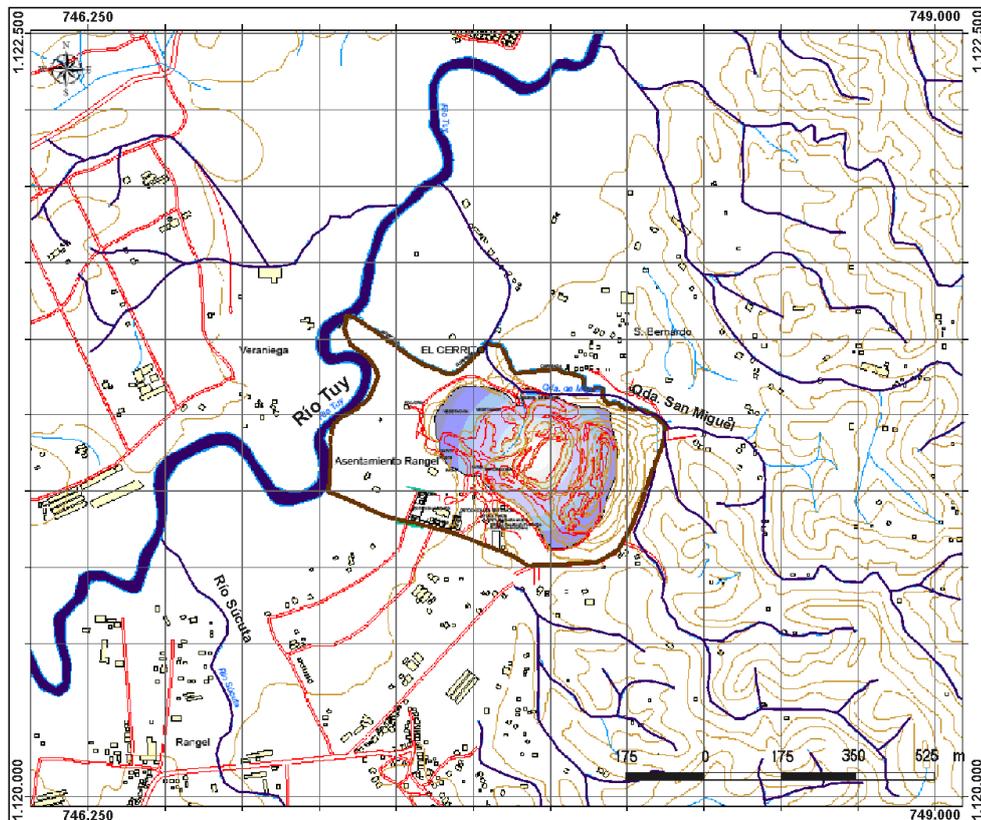


Figura 8. Mapa topográfico, donde se observa la hidrografía presente en y al alrededor del área de estudio.

Área de Estudio Drenajes

2.4. CLIMA

Zambrano (1970), determina que según la clasificación de KOEPPEN, el área de estudio entra en la clasificación del tipo Aw'gi1, donde los aspectos climatológicos que intervienen son principalmente los relacionados al relieve y la acción de los vientos alisios del noreste.

El clima es tropical lluvioso cálido, de sabana y bosques tropófilos, con temperaturas medias anual de 30 °C, con dos estaciones marcadas, una seca que se presentan entre los meses de Diciembre a Abril, y una lluviosa que se extiende hasta Noviembre con una precipitación anual: 700 a 1200 mm, e inferior a 60 mm mensualmente, durante la estación seca.

2.6. VEGETACIÓN

M.A.R.N.R. (1979), determinó que en la región se diferencian dos formaciones vegetales:

- Arbóreas (bosques de galerías): es un tipo de bosque siempre verde, monoestratificado, que crecen en las orillas de los cursos de agua (márgenes y áreas de influencia freática) con sus raíces en la zona de saturación de humedad o casi en ella.

- Arbustivas (matorral): de menos de 5 m de altura, monoestratificada, de fisonomía variable de acuerdo a las condiciones climáticas. Las especies poseen abundante ramificación desde la base. El matorral puede ser deciduo o siempre verde.

En el área central baja de la cantera predomina una vegetación de mediana altura y baja densidad, caracterizada por el predominio de cují, algunos alcornoques y escasa guayaba sabanera.

En las partes altas de la cantera, donde ha habido la intervención minera, la escasa vegetación pre-existente ha desaparecido y sólo se observan pequeñas concentraciones de cují y gramíneas de nueva generación.

2.5. FAUNA

La fauna silvestre regional tiene como mamíferos representativos al venado matacán rojizo o locho, lapa, picure y mono araguato. Entre las aves, las más comunes son: ponchas y guacamaya roja. Destacan entre los reptiles, las serpientes venenosas como cascabel y mapanare, entre las no venenosas son comunes la cazadora y tragavenado. La rana platanera y el sapo común son abundantes en las áreas boscosas.

La fauna del área a estudiar se ha limitado a la presencia de roedores, algunos reptiles y una más variada población de pájaros, donde principalmente se observan poblaciones grandes de aves de carroña hacia la zona más alta de la cantera (figura 9).



Figura 9. Aves carroñeras presentes en la cantera.

CAPÍTULO III

GEOLOGÍA REGIONAL

3.1. GENERALIDADES

El área de estudio se encuentra ubicada geográficamente al centro-norte de Venezuela, en la provincia fisiográfica de la serranía del Interior Central. Los primeros estudios geológicos realizados a nivel regional en esta zona fueron elaborados por Santiago E. Aguerrevere y Guillermo Zuloaga en 1937, quienes dividieron las rocas de la zona en: rocas gnéisicas graníticas del núcleo de la Cordillera que forman el basamento metamorfizado de la cuenca y tres series metasedimentarias, Serie Caracas, Serie Villa de Cura y Serie San Juan de los Morros.

Menéndez (1966) realiza un estudio de la parte central de las montañas occidentales del Caribe o Macizo central, donde reconoce cuatro fajas tectónicas de rumbo aproximado este-oeste y establece una edad Eoceno Tardío como la edad del principal proceso de plegamiento.

Bell (1968) amplía esta subdivisión aumentando a ocho fajas, basándose en rasgos estructurales. De norte a sur las ocho fajas tectónicas se presentan a continuación (ver figura 10):

1. Faja tectónica de la Cordillera de la Costa. Limitada al norte por el sistema de fallas del Caribe y al sur por la zona de fallas de La Victoria. Está constituida por las unidades Complejo Basal de Sebastopol, formaciones Peña de Mora, Las Brisas, Antímano y Las Mercedes.

2. Faja tectónica de Caucagua-El Tinaco. Limitada al norte por la falla de La Victoria y al sur por la zona de fallas de Santa Rosa. Incluye las unidades

Complejo Yumare, el Complejo de Yaritagua y las formaciones San Quintín, Nirgua, Aroa y Mamey.

3. *Faja tectónica de Paracotos*. Limitada entre la falla de Santa Rosa al norte y la falla de Agua Fría al sur. Constituida por bloques de rocas volcánicas dentro de una matriz filítica, conglomerados líticos y calizas microcristalinas.

4. *Faja tectónica de Villa de Cura*. Limitado al norte por la falla de Agua Fría al norte y la falla de Cantagallo al sur. Compuesta esencialmente de rocas volcánicas ligeramente metamorfizadas del Grupo de Villa de Cura.

5. *Faja Piemontina*. Limitada al norte por la falla de Cantagallo y al sur por el Corrimiento Frontal. Esta faja es la más extensa y forma el cinturón sur que bordea al Grupo Villa de Cura.

6. *Cinturón de Fallas de Corrimiento*. Se denomina así por ser un sistema discontinuo de fallas, que exponen repetidamente secciones de formaciones ubicadas al norte del mismo. Se encuentra comprendida entre la Faja Piemontina al norte y la Faja Volcada al sur.

7. *Faja Volcada*. Representada por un sector angosto de rocas terciarias volcadas hacia el sur. En esta faja afloran rocas de las formaciones Naricual, Quebradón y Quiamare, plegadas en un sinclinal, limitando al sur con la Faja de Buzamientos Suaves.

8. *Faja de Buzamientos Suaves*. Constituida por rocas sedimentarias del Eoceno que forman un homoclinal regional hacia el sur y constituyen la parte septentrional de los llanos, a medida que el buzamiento se suaviza hacia el sur. Es una faja que define una región caracterizada por capas suavemente plegadas, con fallas normales e inversas de pequeño desplazamiento cuya frecuencia disminuye hacia el sur.

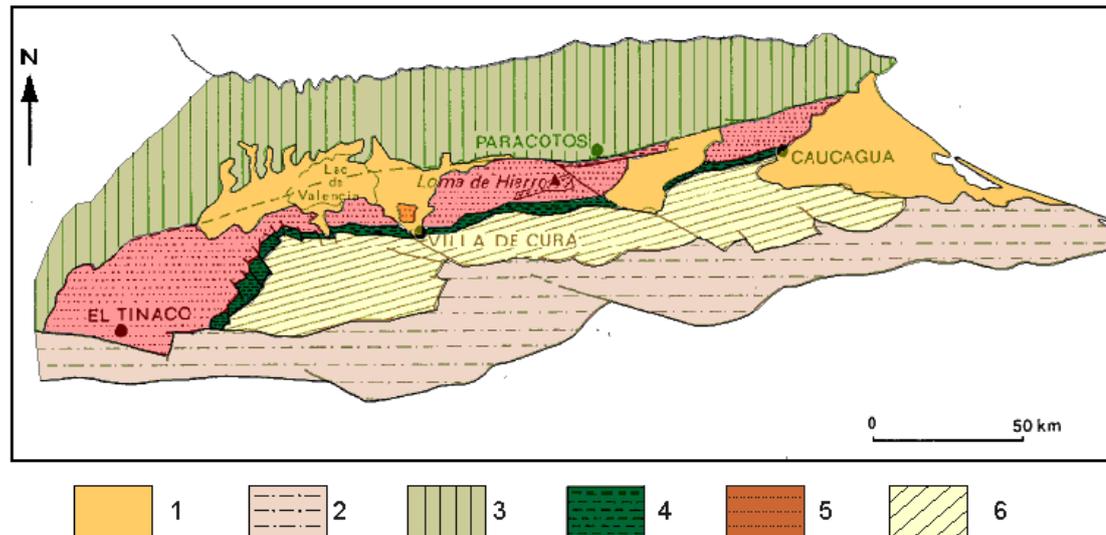


Figura 10. Fajas tectónicas de los macizos centrales de la cordillera del Caribe. Leyenda: 1. Oligoceno-Neoceno-Cuaternario, 2. Faja Piemontina (Paleógeno con facies flysch), 3. Faja de la Cordillera de la Costa, 4. Faja de Paracotos, 5. Faja de Caucagua-El Tinaco, 5. serpentinitas y peridotitas (Macizo de Loma de Hierro), 6. Faja de Villa de Cura (tomado y modificado de BECK 1985).

La clasificación actual donde se maneja el ordenamiento geológico de la cordillera de la Costa, surge como resultado del trabajo conjunto de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y la Oficina de Riesgo del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB); Según dicho trabajo se tiene un ordenamiento basado en napas tectónicas siguiendo el criterio de Beck, (1986), ampliado para adaptarlo a la actual cartografía de la Cordillera. A continuación se presentan la división realizada para la Serranía del Interior:

Napas de la Serranía del Interior:

Napa Loma de Hierro (Cretácico):

- Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro
 - Metalava de Tiara.
 - Gabro de Mesia.
 - Ultramáficas de Loma de Níquel.
- Filita de Paracotos.

- Complejo El Ocumo.
- Volcanosedimentarias de Río Guare.
- Volcanosedimentarias de Boca de Oro.
- Serpentinita de Las Peñas Negras.
- Serpentinita (cueros dispersos sin nombre formal).

La napa de Loma de Hierro es interpretada como un bloque de litósfera oceánica emplazado sobre corteza continental, el cual incluye su recubrimiento sedimentario, de edad probable Jurásico Tardío – Cretáceo. Esta napa corresponde a facies de los esquistos verdes, y posiblemente pueda atribuírsele metamorfismo correspondiente a la zona de la pumpellitita-actinolita en algunas regiones.

Napa Caucagua- El Tinaco (Precámbrico-Mesozoico):

- Complejo El Tinaco (unidad mayoritaria).
 - Gneis de La Aguadita.
 - Esquisto de Tinapú.

Unidades no agrupadas en asociaciones

- Gneis Tonalítico de Curiepe.
- Metadiorita de La Guacamaya.
- Gneis Granítico de San Vicente.
- Trondhjemitita de La Gloria
- Filita de Urape.
- Metavolcanosedimentarias de Conoropa.
- Metaconglomerado de Charallave.
- Filita de Tucutunemo.
 - Metalava de Los Naranjos.
- Volcánicas de Pílancones.
- Peridotita de Tinaquillo.
- Serpentinita de San Antonio.
- Serpentinita de El Chupón.

- Serpentinita. Cuerpos dispersos sin nombre formal.

Esta napa contiene un basamento ígneo metamórfico mezclado con unidades plutónicas, volcánicas y sedimentarias, cuyas edades probables son del Jurásico Tardío al Cretácico Temprano.

Napa Villa de Cura (Jurásico –Cretáceo)

Napa septentrional con asociaciones mineralógicas de alta P/baja T.

- Asociación Meta-volcanosedimentaria de Villa de Cura
 - Metatoba de El Caño / Metatoba de El Chino.
 - Metalava de El Carmen.
 - Granofel de Santa Isabel.

Predominan piroclastos formados probablemente en una cuenca retro arco o ante arco, que luego fueron incorporados a un complejo de arco de isla en subducción.

Napa meridional con rocas no metamórficas o con metamorfismo de muy bajo

- Asociación Ígnea San Sebastián.
 - Volcánicas de Las Hermanas.
 - Volcánicas de Tiramuto.
 - Ultramáficas de Apa.
 - Ultramáficas de El Chacao.
 - Gabro de Cantagallo.
 - Diorita Piroxénica de Platillón.

Usualmente con metamorfismo no mayor de las facies de la prehnita-pumpellita, donde el basalto indica afinidad de arco de islas de edad Cretácico medio-tardío. Estas unidades pertenecen a una parte de un arco de isla que fue emplazado tectónicamente sobre la corteza continental.

3.2. GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se localiza según la clasificación actual del ordenamiento geológico de la Cordillera del Caribe, en la napa de Loma de Hierro, la cual se encuentra dentro de la división de las Napas de la Serranía del Interior. Las unidades que afloran en el área de estudio son las Metavolcánicas de Tiara (unidad formal), y Calizas del Paleoceno (unidad informal), en contacto al noroeste con la cuenca sedimentaria del Tuy (figura 11).

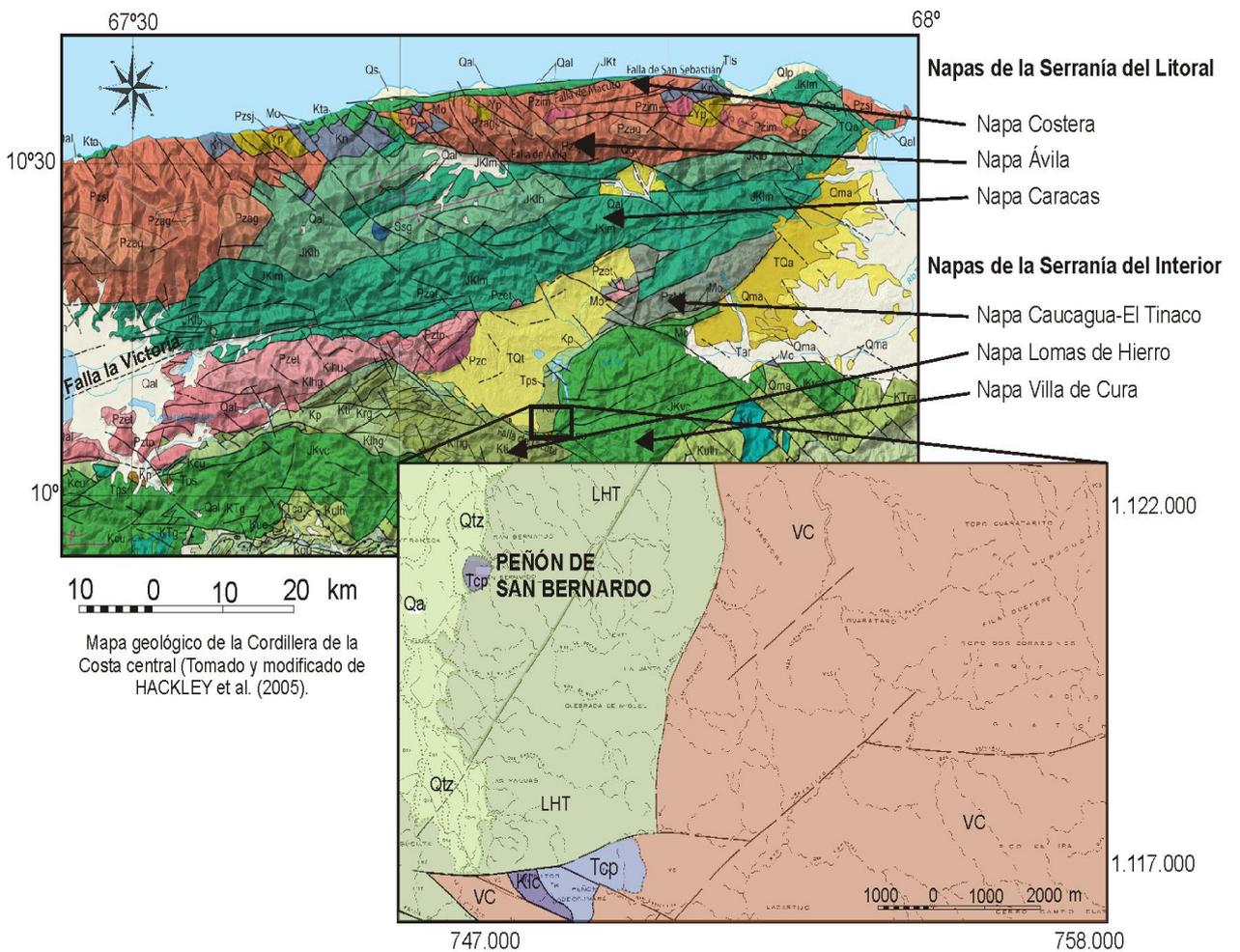


Figura 11. Ubicación regional geológica del área de estudio. Al fondo mapa geológico del norte de Venezuela, y al frente mapa Súcuta 6846-II-NO, 1:25.000. Leyenda: **Tpc**: Caliza Paleoceno, **LHT**: Metavolcánicas de Tiara, **Qtz**: Terrazas Aluviales (Pleistoceno), **Qtal**: Aluvión (Reciente), **Klc**: Caliza Las Colonias (Cretácico tardío), **VC**: Asociación Meta-volcanosedimentaria de Villa de Cura. (Tomado y modificado de URBANI F. & J. A. RODRÍGUEZ. 2003).

3.2.1. UNIDAD INFORMAL: CALIZAS PALEOCENAS (TCP)

Winkler (1956), describe en el Peñón de Ocumare una caliza gris verdosa al sur de Los Cerritos y al este de la quebrada Marare, que posee un alto contenido fosilífero, que aunque mal preservado en muchas ocasiones, ha permitido designar para la unidad una edad Paleocena.

Peirson (1965), al referirse a las calizas del Miembro Morro del Faro de la Formación Guárico, dice que “Una extensión distante al noreste, de las calizas arrecifales pueden estar representados por la calizas formadoras de El Morro localizado en El Peñón, a 5 km al sureste de Ocumare del Tuy”.

Beck (1985) presenta algunos cortes, en donde precisa la litología y disposición estratigráfica característica en la zona del Peñón de Ocumare (Figura 12, corte a, b y c). Asimismo, presenta un corte de las calizas paleocenas del Peñón de San Bernardo (figura 12, corte d).

Posteriormente Urbani, Furrer & Zapata (1986), para el mismo Peñón de Ocumare reportan rocas de edad Cretácico (Maastrichtiense) y Paleocenos, donde se observaron fragmentos de equinodermos, de algas *Lithophyllum*, de briozoarios y de moluscos, foraminíferos: *Sulcoperculina globosa*, *Sulcoperculina dickersoni ver. vermunti*, *Quinqueloculina*, *Pseudoorbitoides* y *Lepidorbitoides*, y determinaron que estas calizas masivas bioclásticas se correlacionan con el Miembro el Faro del Morro, de la Formación Guárico.

Orta (2003), reporta afloramientos de rocas aisladas, representando especies de parches al SE de Ocumare del Tuy y más específicamente en la carretera que comunica a Santa Teresa con el sector de El Peñón, donde afloran de norte a sur, el Peñón de San Bernardo y el de Ocumare. Estas unidades no poseen gran extensión, siendo muy locales. Están en contacto tectónico con las

Volcánicas de Tiara y discordante sobre las rocas de la Asociación Metavolcanosedimentaria de Villa de Cura y las sedimentarias circundantes de la cuenca del Tuy.

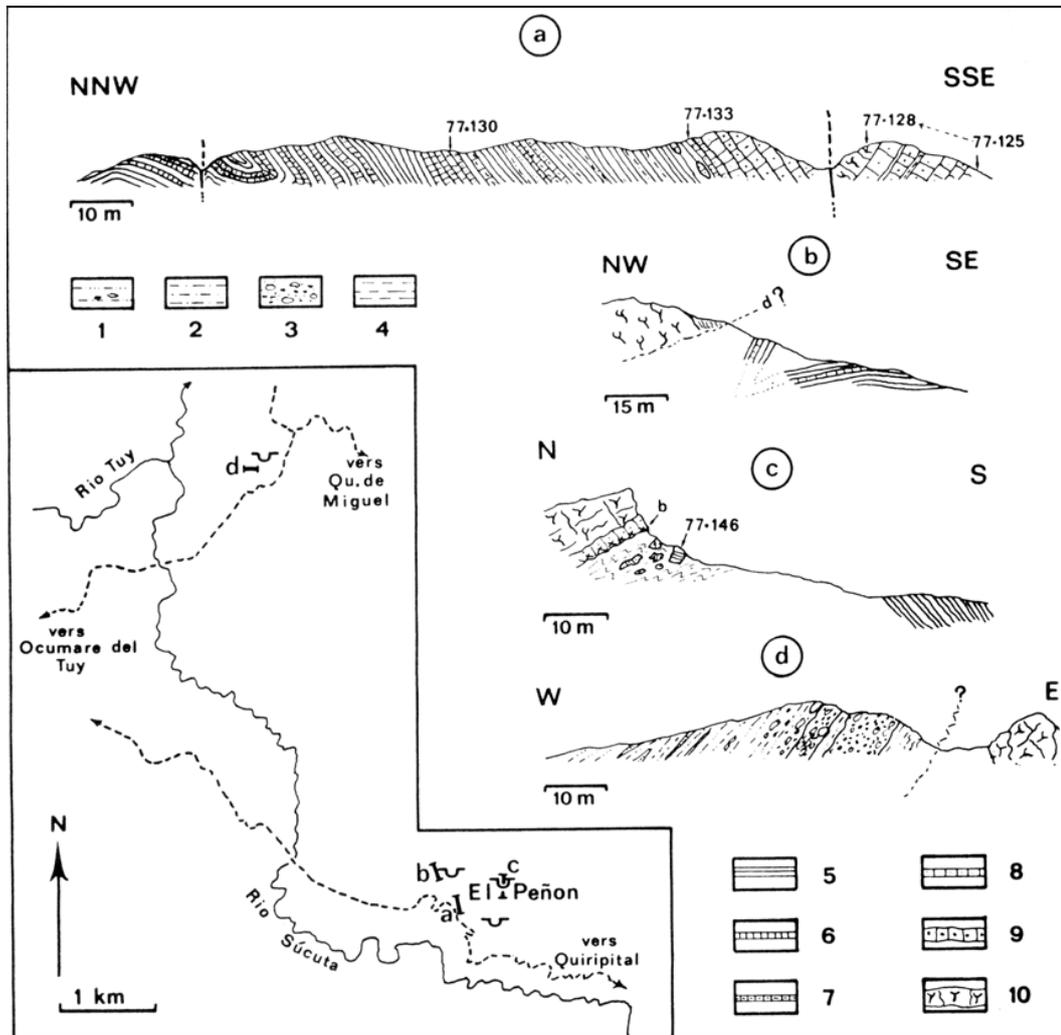


Figura 12. Cortes de unidades Paleocenas en los alrededores de Ocumare del Tuy, Napa Loma de Hierro. Tomado de BECK (1985). **Leyenda:** 1. arcilita arenosa y arenas con guijarros; 2. lutita arcillosas-limosas; 3. conglomerado poligénico arenoso, con cementación débil; 4. lutita arcillosa; 5. limolita, a menudo carbonática; 6. caliza hemipelágica en capas delgadas; 7. caliza margosa en capas delgadas; 8. caliza limosa o arenosas; 9. microbrecha calcárea con clastos ígneos y metamórficos; 10. caliza maciza, bioclástica de grano grueso, con algas y corales.

3.2.2. UNIDAD FORMAL: MIEMBRO MORRO DEL FARO, FORMACIÓN GUÁRICO (Léxico Estratigráfico de Venezuela)

Nombre propuesto por Renz (1955), este miembro se compone de calizas arrecifales extremadamente masivas (hasta 700 m), notablemente desarrolladas en el área de San Juan de Los Morros, que aparentan haberse formado dentro de la facies "peri-arrecifal" del Miembro Caramacate.

Para el Miembro Caramacate, Peirson *et.al.* (1966) propusieron este nombre para identificar la facies "cercana al arrecife" de la parte inferior de la Formación Guárico que envuelve a los diversos "morros" del flanco norte de la cuenca del flysch. Consiste en una litofacies heterogénea de 5% a 50% de limolitas silicificadas, lodolitas limosas y lutitas foraminíferales, 50% a 95% de areniscas calcáreas y calizas orgánicas y brechas y conglomerados detritales. Tanto los morros de San Juan como la facies peri-arrecifal, aparentan estar estratigráficamente relacionados estrechamente con la Formación Tiara, subyacente.

3.2.3. FORMACIÓN MORRO DEL FARO, EX-MIEMBRO MORRO DEL FARO (PROPUESTA), (Léxico Estratigráfico de Venezuela)

Consideraciones históricas

Ex-Miembro Morro del Faro de la Formación Guárico de la Napa Piemontina, L.E.V., 1956, p. 278-281; Peirson *et. al.*, 1966, p. 203; L.E.V., 1970, p. 429 y 430; González De Juana *et. al.*, 1980, p. 499 y 500; Beck, 1985, p. 547).

Vivas y Macsotay (AGUASUELOS INGENIERIA, 1990 y Vivas y Macsotay (1995-d) separan ésta unidad litoestratigráfica de la Formación Guárico y la elevan a rango de formación. Desde el punto de vista paleogeográfico la

Formación Morro del Faro forma parte de la cobertura sedimentaria de la Napa de Villa de Cura y no de la Napa Piemontina (Vivas y Macsotay, 1995-d).

Localidad tipo

Su localidad tipo es el morro El Faro, 5 km al noroeste de la ciudad de San Juan de Los Morros, estado Guárico (Peirson *et. al* 1966; Bell 1968-b, p. 332; L.E.V., 1970, p. 430).

Descripción litológica

La formación está constituida por 300 a 350 m de calizas biostromales, biodetríticas con abundancia de foraminíferos, microalgas y otros organismos carbonáticos, dispuestas en capas submétricas a plurimétricas. Las calizas son macizas, compactas de color gris claro que meteoriza a gris azulado. Estas rocas presentan un espesor de 300 a 350 m.

Contactos

En la región de San Juan de Los Morros, la Formación Morro del Faro suprayace en contacto de discordancia angular a la Asociación Metamórfica de Villa de Cura (Esquistos de Santa Isabel) en los sectores de "Los Baños Termales de San Juan" y "La Puerta" (morro La Capilla); en su localidad tipo el contacto inferior de la Formación está en relación de hiatus con la infrayacente Formación Escorzonera.

En el sector de La Puerta de San Juan, curva del río Guárico, la Formación Morro del Faro, infrayace en relación de hiatus a la Formación Caramacate. Más hacia el este, en la región de quebrada Honda-San Sebastián, la unidad aflora como megaolistolitos dentro de la Formación Caramacate.

Fósiles

Foraminíferos béticos grandes, los más comunes con taxonomía corregida por Furrer (comunicación escrita, 1997) son: *Actinosiphon barbadensis* (Vaughan), *Ranikothalia catenula* (Cushman y Jarvis), *Ranikothalia bermudezi* (Palmer), *Discocyclina (D.) barker* (Vaughan y Cole), *Discocyclina (D.) caudriae* Vaughan, *Bontourina saturniformis* M. de Cizancourt y *Laffitteina* sp.

La muestra V.V.-606 tomada por los suscritos (en AGUASUELOS INGENIERIA, 1990) de la cima del morro El Faro, corresponde a la parte superior de la Formación Morro del Faro y al microscopio es una biopelmicrita arcillosa con frecuentes algas dasycladaceas y foraminíferos (*Actinosiphon barbadensis* var. *caudriae* de Cizancourt, *Helicolepidina* sp. y *Miliolidae* no identificados). La muestra V.V.-605, tomada de la parte inferior del morro El Faro (cerca de la base de la formación) es una biopelmicrita de textura *wackestone*, arcillosa, con abundantes fragmentos de algas incrustantes y briozoarios (no se observó fauna diagnosticable).

Edad

Esta unidad fue muestreada por Caudri (1944) y Cizancourt (1951), quienes establecen la correlación y la edad de la misma. En base a la edad concomitante sugerida, del conjunto, es Paleoceno (Seller De Civrieux; L.E.V., 1956, p. 386-391, y más precisamente Paleoceno medio tardío (Furrer, 1997).

Paleoambiente

Depósitos de bancos calcáreos, biostromales de plataforma externa, formados sobre un arco volcánico insular.

3.2.4. UNIDAD FORMAL: METALAVA DE TIARA (LHT)

FORMACIÓN TIARA (Léxico Estratigráfico de Venezuela)

Ubicación y extensión

Los afloramientos de la Formación Tiara se extienden por unos 60 km en una franja discontinua desde los cerros al sur de Ocumare del Tuy y Cúa, al sur de Tácata, Altagracia de la Montaña, Agua Fría, Tiara, El Pao de Zárate y las cabeceras del valle del río Tucutunemo, en Aragua central y en el sector occidental del estado Miranda, (Beck, 1985, 1986).

Localidad tipo

Área al norte de Tiara, distrito Ricaurte, estado Aragua. (Hoja 6746, esc. 1:100.000, Cartografía Nacional).

Descripción litológica

Smith (1952) indica la presencia de basalto, así como rocas gabroides, a veces con cristales de piroxenos y plagioclasa con textura ofítica, los piroxenos a veces transformados a hornblenda y clorita, e interpreta que estos cuerpos pueden ser "sills" o diques, como equivalentes hipoabisales al basalto. Dicho metabasalto es de grano fino, denso, de color gris claro a negro, con textura sub-ofítica, algunas variedades son porfídicas, con fenocristales de plagioclasa en una matriz muy fina, a veces muy alterada. Junto a las rocas ígneas, describe una sección de metatoba, de color negro y matriz muy fina, constituida por fragmentos de rocas volcánicas, plagioclasa, cuarzo y ftanita.

Shagam (1965) describió a las lavas de la formación, como metabasalto porfídico, de color verde, de grano fino, formados por fenocristales grandes de

augita, plagioclasa, magnetita titanífera y olivino, en una matriz de microcristales de augita y plagioclasa. Indicó además, rocas de tipo intrusivo gabroicas o diabásicas, de mineralogía semejante a las de las lavas, con láminas augíticas grandes en relación ofítica y subofítica, con granos tabulares de plagioclasa.

Piburn (1968), estudió la formación en el área al norte de San Sebastián, dividiéndola en dos miembros: el inferior está formado por conglomerados volcánicos gruesos y mal escogidos, constituidos por fragmentos de lava porfirítica, en capas de 3 o más metros de espesor y tobas cristalinas en capas de hasta 30 cm, formadas por plagioclasa, hornblenda y clinopiroxena. El miembro superior está formado por tobas cristalinas líticas, en espesores de hasta 10 m, metalavas, ocasionalmente almohadilladas y lentes diseminados de ftanita negra, que llegan a 3 ó 4 m de espesor.

Graterol (1972) demuestra que los metabasaltos están constituidos por plagioclasa, piroxeno anfibolitizado, así como calcita, prehnita, pumpellita, epidoto y clorita. Estas rocas se interdigitan con los metagabros.

Según Girard (1981) esta formación representa una secuencia de diabasa, diques de microgabro y basalto con muy bajo grado de metamorfismo; menciona además la presencia de metabrechas volcánicas con fragmentos constitutivos de gabro y rocas volcánicas.

Navarro (1983), describe tobas de ceniza o de lapilli, lavas almohadilladas con plagioclasa y clinopiroxeno y aglomerados volcánicos de fragmentos de lavas y tobas, en una matriz de ceniza volcánica.

Aquino (1983) y Rodríguez (1984) señalan que estas rocas han sido sometidas a un metamorfismo de muy bajo grado en la facies de la pumpellita-actinolita.

Espesor

Smith (1952) en la localidad tipo señala un espesor de unos 900 m, Shagam (1960), estimó un espesor superior a los 400 m, Piburn (1968), da un espesor de 5000 m para la sección expuesta en el Guárico.

Contactos

La Formación yace discordantemente sobre la Formación Santa Isabel del Grupo Villa de Cura, según Shagam (1960) y Konigsmark (1965), aunque Piburn (1968) considera dicho contacto concordante en la región del Guárico. En el tope, el contacto es discordante bajo la Formación Guárico. Beck (1985, 1986) indica contactos estratigráficos con sus unidades del "Senoniense superior", "ultramáficas" y "gabros", si bien en algunas localidades señala contactos tectónicos con sus "gabros".

Edad

Hasta el presente, no se han presentado determinaciones de edad para las rocas aflorantes en la sección tipo, en el área de Tiara. Piburn (1968), reportó una edad K/Ar de 100 ± 10 m.a. en roca total para una metatoba actinolítica de la base de la unidad, en el sector de San Sebastián, lo cual equivale al límite Albiense-Cenomaniense, Loubet *et. al.* (1985), dan edades K/Ar de 112 ± 4 y 119 ± 4 m.a. para plagioclasas, tomándolas como representativas de la edad de efusión de las volcánicas. Beck (1985, 1986) presenta dos análisis por K/Ar de roca total de metalavas, aportando edades de 63,2 (2,0 m.a. y 80,0 (4 m.a. Navarro *et. al.* (1988) en su modelo evolutivo de la Cordillera de la Costa se asigna una edad Albiense - Maastrichtiense.

Geoquímica y paleoambiente

A partir de estudios geoquímicos de elementos mayoritarios y trazas, Girard (1981), Girard *et. al.* (1982) y Beccaluva *et. al.* (1995, p. 13; 1996, p. 94) señalan una afinidad MORB para las rocas basálticas.

CAPÍTULO IV GEOLOGÍA LOCAL

4.1. GENERALIDADES

El estudio geológico de superficie se llevó a cabo en afloramientos ubicados en el área de estudio, principalmente en los encontrados en el actual frente de explotación localizado en la zona este de la cantera, donde la topografía se encuentra dispuesta en niveles o terrazas, a consecuencia de su continua explotación minera a través de los años (figura 13). Los niveles o terrazas presentan taludes de 10 m de altura, con longitudes promedio de 200 m, ubicándose desde la cota 180 hasta la cota 240 sobre el nivel del mar. El estudio también se realizó en afloramientos de menores dimensiones, encontrados en la zona oeste y centro de la cantera.

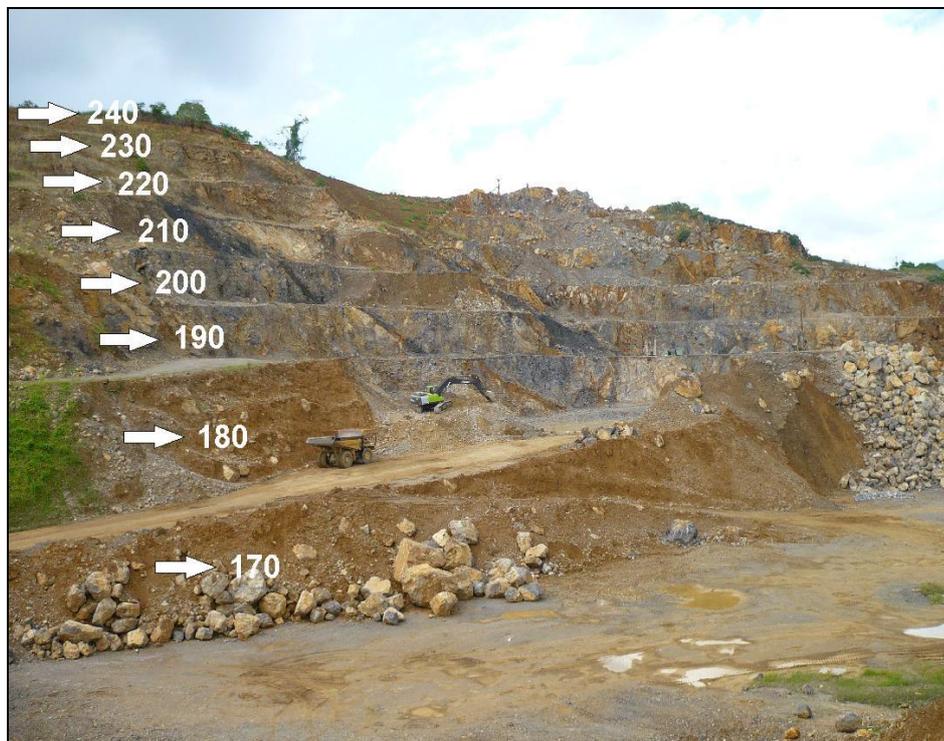


Figura 13. Actual frente de explotación ubicado al este de la cantera, donde se observan las terrazas o niveles generados por la continua explotación minera del material carbonático presente en esta zona.

4.2. UNIDADES LITOLÓGICAS

A lo largo de la zona de estudio se reconocieron tres tipos litológicos correspondientes a rocas sedimentarias, y un tipo litológico correspondiente a metaígneas, los cuales permitieron definir diferentes unidades y subunidades informales, tomando en cuenta las descripciones en afloramientos y los análisis petrográficos. A continuación se presentan las unidades definidas:

4.2.1. UNIDADES SEDIMENTARIAS

Se reconocieron tres unidades de origen sedimentario con rasgos litológicos característicos, las cuales se presentan a continuación conforme a su extensión (de mayor a menor área):

4.2.1.1. UNIDAD I. CALIZAS BIOCLÁSTICAS

La unidad de Calizas Bioclásticas se caracteriza por rocas carbonáticas constituidas mayormente por componentes bioclásticos. Esta unidad se dividió en dos subunidades, las cuales muestran características similares pero con rasgos litológicos característicos y particulares.

4.2.1.1.1. SUBUNIDAD DE CALIZAS PURAS

Extensión y Ubicación

Se ubica en la zona centro-oeste del área de estudio, abarcando un área aproximada de 103.119,3 m², lo cual representa 90% del área total. Esta unidad abarca el frente de explotación actual, localizado al este y se extiende al oeste, donde se observan afloramientos dispersos de reducidas dimensiones.

Contactos

Se encuentra en contacto concordante con la subunidad de Waca Lítica en los niveles 200, 210, 220 y 230, y en contacto tectónico con la unidad de rocas Metavolcánicas en el nivel 240, el cual no se observa aflorando.

Descripción de los Afloramientos

La zona ubicada al este de esta unidad (frente de explotación), se encuentra constituida por calizas masivas de color gris medio a oscuro, fracturadas, con bordes de meteorización pardo amarillento (figura 14) y presencia de pequeñas cavernas indicativas de disolución cárstica por acción de agua meteórica (meteorización kárstica), donde se observa calcita recristalizada en los bordes de las mismas (figura 15). Hacia la zona oeste de la unidad se observan calizas masivas de color gris claro a medio con bordes de meteorización marrón y presencia de pequeñas oquedades indicativas de meteorización cárstica.



Figura 14. Afloramiento ubicado en el nivel 230, donde se observan calizas masivas de color gris medio a oscuro, fracturadas, con bordes de meteorización pardo amarillento, definidas como la subunidad de Calizas Puras.



Figura 15. Pequeñas cavernas observadas en las calizas, producto de la acción de la meteorización kársticas.

En las dos zonas la meteorización se presenta como una decoloración indicativa de poca alteración de la roca intacta y mayor alteración en las superficies de las discontinuidades, donde la roca puede estar algo más débil externamente, que en condición fresca. También se presentan vetas de calcita con espesores variables de 0,5 a 5 cm, dispuestas mayormente con orientaciones paralelas a los planos de diaclasas, y en algunos casos rellenándolos con cristales bien desarrollados (figura 16).



Figura 16. Cristales de calcita bien desarrollados encontrados en las discontinuidades del macizo rocoso.

Se observaron microfósiles de manera muy escasa, entre los cuales se identificaron algas agrupadas y recristalizadas con tamaños promedio de 0,4 mm (figura 17), encontrados en la parte central del nivel 200.



Figura 17. Algas recristalizadas encontradas en nivel 200.

Descripción Petrográfica

Para esta subunidad se analizaron 12 muestras bajo microscopio de luz polarizante, de las cuales 8 de éstas fueron recolectadas en la zona del frente de explotación de manera que abarcaran toda su extensión, y el resto se recolectaron en afloramientos dispersos encontrados en la zona oeste de la cantera.

Las clasificaciones de rocas carbonáticas de Dunham (1962) y Folk (1962), son las más usadas para definir el tipo de sedimento o roca de acuerdo a la textura depositacional y origen (figura 18). Las dos clasificaciones utilizan patrones comunes como son los porcentajes de micrita, esparita, aloquímicos, y el grado de empaquetamiento. De acuerdo a estos parámetros, los términos utilizados para ambas clasificaciones son muy similares o equivalentes (BAAMONDE, 2009).

CLASIFICACIÓN TEXTURAL DE FOLK (1962)

	Mas de 2/3 partes con matriz de micrita				Similar en micrita y esparita	Más de 2/3 partes con esparita		
Aloquímicos %	0 - 1 %	1 - 10 %	10 - 50 %	Más de 50 %		Escogimiento pobre	Escogimiento bueno	Redondeado y retrabajado
Términos de Rocas	Micrita y Dismicrita	Micrita fosilífera	Biomicrita esparcida	Biomicrita agrupada	Bioesparita mal lavada	Bioesparita no escogida	Bioesparita escogida	Bioesparita redondeada
Terminología	Micrita Dismicrita	Micrita Fosilífera	Biomicrita		Bioesparita			
Análogos Terrígenos	Lutita o Arcillita		Arcillita arenosa	Arenisca inmadura o arcillosa	Arenisca submadura	Arenisca madura	Arenisca supermadura	

CLASIFICACIÓN TEXTURAL DE DUNHAM (1962)

Textura deposicional reconocible					Textura deposicional no reconocible
Componentes originales no enlazados durante la depositación				Sin lodo soportada por granos	
Contienen lodo (arcilla y limo fino de carbonato)			Soportada por granos		Boundstone
Soportada por lodo		Soportada por granos		Grainstone	
Granos: <10%	Granos: >10%				
Mudstone	Wackestone	Packstone			

Figura 18. Clasificaciones texturales de rocas carbonáticas propuestas por Folk (1962) y Dunham (1962). Tomado y modificado de BAAMONDE, 2009.

Las calizas se clasificaron según Duham (1962) como *packstones* (85 %) y *wackstones* (15 %); y según Folk (1962) como bioesparitas con buen escogimiento (63 %) y bioesparitas no escogidas (37 %). Las muestras son esencialmente puras, constituida principalmente por componentes carbonáticos (85 - 95 %), con poca influencia clástica (3 - 15 %) y porosidad muy baja (2 - 7%).

Los componentes ortoquímicos se encuentran representados principalmente por matriz parcialmente recristalizada a microespato, donde también se observó recristalización a espato y pseudoestapato en menor porcentaje, y matriz micrítica escasa. El cemento es esencialmente de tipo granular-mosaico, y fibroso en pocos casos.

Los aloquímicos son los componentes mayoritarios en las muestras, los cuales están caracterizados fundamentalmente por microfósiles de diversos tipos faunales y en menor proporción por peloides. Los bioclastos se presentan esencialmente recristalizados por calcita y muy raramente por óxido de Fe, mayormente fracturados, redondeados y bien preservados en algunos casos.

Entre los microfósiles identificados con mayor abundancia, están las algas rojas y foraminíferos bentónicos, seguidos de moluscos, corales e equinodermos (tabla 3).

Microfósiles Identificados	Tamaño min-max (mm)	(%) Microfósiles Identificados	Observaciones	Figura #
Algas	4,2 – 0,34	51 %	En su mayoría son algas rojas de variados tamaños, fracturados y en algunos casos se observaron bien redondeados.	19 - 20
Foraminíferos Bénticos	0,5 – 0,21	20 %	Compuestos por Miliólidos y Rotálidos bien preservados.	21 - 22
Moluscos	2,26 – 0,36	12 %	Se observaron fragmentos de bivalvos recristalizados por calcita, donde se observan cemento fibroso.	23
Briozoarios	3,26 – 0,96	7 %	Fósiles fracturados con colonias mayores a 3 mm de diámetro.	24
Corales	4,15 – 0,96	7 %	Fragmentos de corales, mayormente fracturados.	25
Equinodermos	0,41 – 0,15	3 %	Espinas de equinodermos recristalizados y corroídos, compuestos por un cristal simple de calcita con extinción unitaria.	25

Tabla 3. Microfósiles identificados en las muestras carbonáticas de la subunidad de Calizas Puras.



Figura 19. Fotomicrografía de alga roja micritizada, bien preservada en una matriz microespática. Se observa el aspecto reticulado característico de estas algas, con espacios ocupados con microespato. Muestra MSB B2, ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles paralelos. 4x



Figura 20. Fotomicrografía de algas rojas micritizadas y fracturadas, en una matriz espática. Se observa el aspecto reticulado característico de estas algas, con espacios ocupados con microespato. Muestra MSB 3, ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles paralelos. 4x

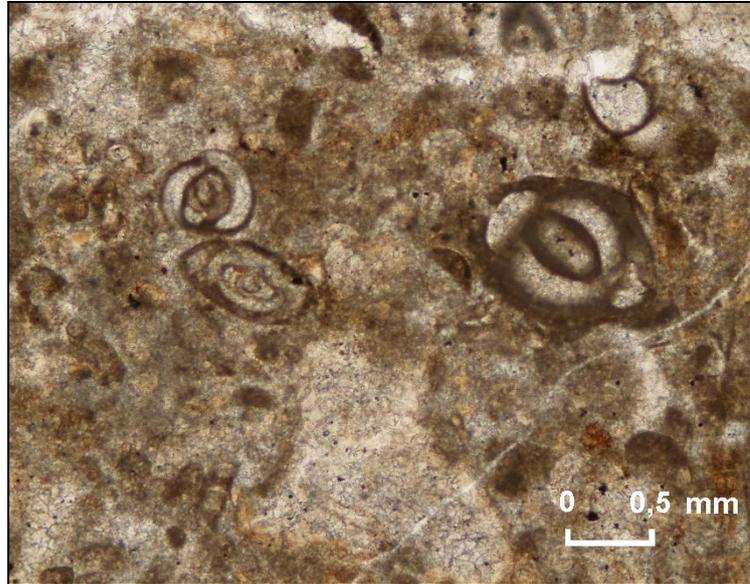


Figura 21. Fotomicrografía de foraminíferos bénticos (Miliólidos) bien preservados con paredes micritizadas y espacios ocupados por microespato, en una matriz constituida por micrita y microespato. Muestra MSB 3, ocular 10x, objetivo 10x. Nícoles paralelos.

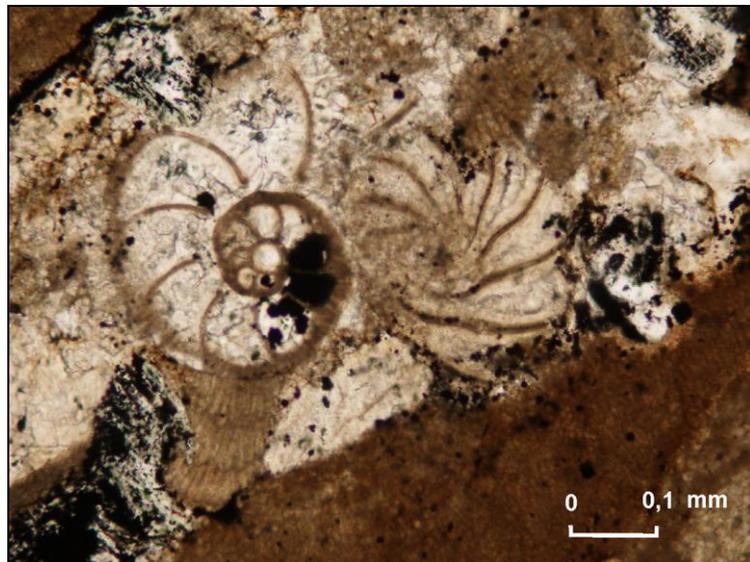


Figura 22. Fotomicrografía de foraminíferos bénticos bien preservados con paredes micritizadas y espacios ocupados por pseudoespato y óxido, en una matriz constituida por micrita y microespato. Muestra MSB B2, ocular 10x, objetivo 40x. Nícoles paralelos.

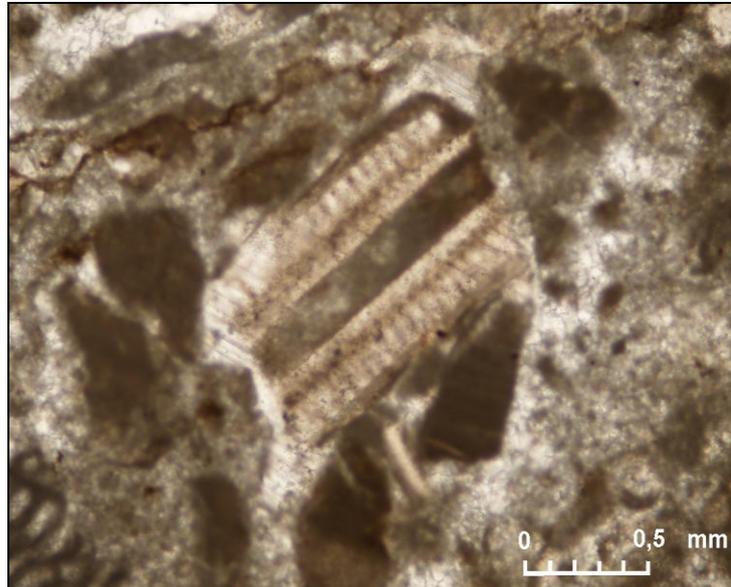


Figura 23. Fotomicrografía donde se observa un fragmento de molusco (bivalvo) con paredes y estructura interna micritizada con espacios ocupados por espato, en una matriz constituida por microespato y micrita. Muestra MSB 10, ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles paralelos.

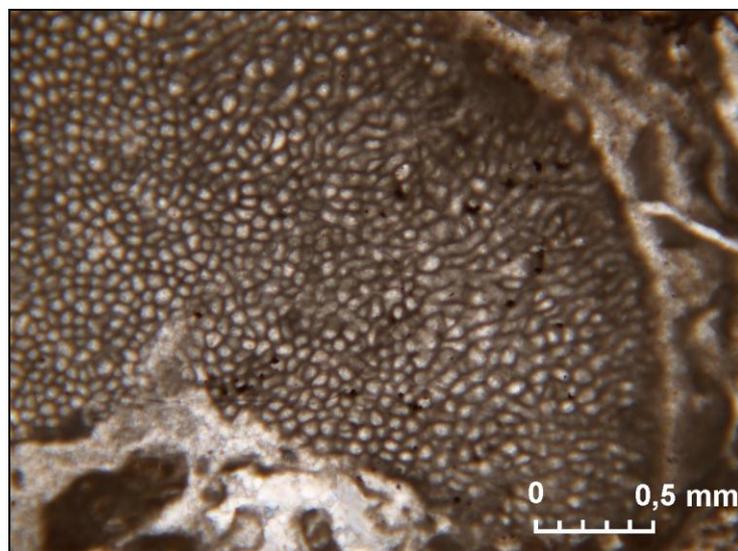


Figura 24. Fotomicrografía de briozooario fracturado con paredes micritizadas y espacios ocupados por microespato y pseudoespato, en una matriz constituida por micrita y microespato. Muestra MSB 3, ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles paralelos.

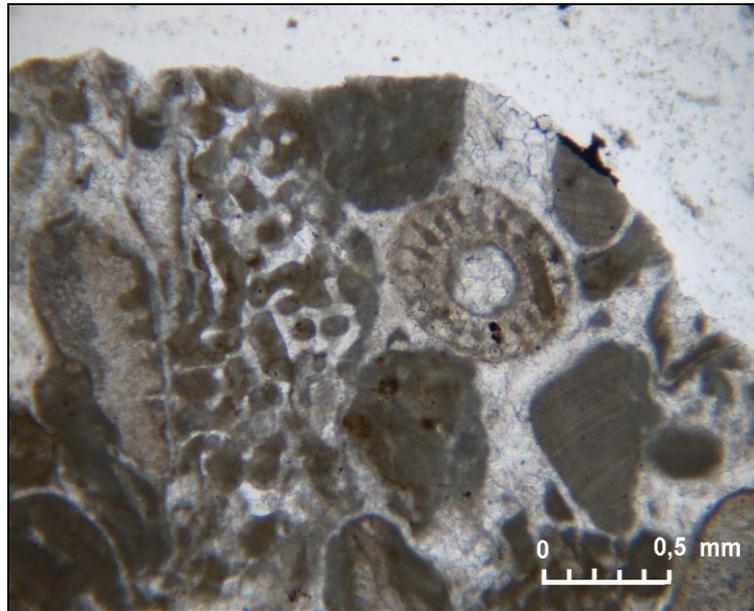


Figura 25. Fotomicrografía donde se observa a la izquierda un fragmento de coral y a la derecha una espina de equinodermo. Los dos bioclastos se presentan con paredes y estructuras internas micritizadas y espacios ocupados por espato, en una matriz constituida por espato. Muestra MSB 18, ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles paralelos.

Los extraclastos se presentan de manera escasa en todas las muestras, donde los óxidos y los cristales de cuarzo plutónico se observaron con mayor frecuencia, seguidos por materia orgánica, fragmentos de calizas y fragmentos de chert. La porosidad es otro componente que aparece de manera escasa, formada por la disolución de conchas carbonáticas.

4.2.1.2.2. SUBUNIDAD DE CALIZAS SUCIAS

Extensión y Ubicación

Se ubica en el frente de explotación en los niveles 180, 190, 200, y 210, abarcando 150 m², representando 0,55 % del área total de estudio.

Contactos

Se encuentra en contacto concordante con la subunidad de calizas puras en los niveles 180, 190, 200 y 210.

Descripción de los afloramientos

Esta subunidad se presenta como un cuerpo tabular uniforme con espesor promedio de 1,5 m, localizado entre la subunidad de calizas descrita anteriormente. En el nivel 180 se observa como una roca moderadamente competente de color marrón oscuro con bordes de meteorización marrón naranja, y en los niveles 190, 200 y 210 como una roca moderadamente competente de color gris medio a oscuro con bordes de meteorización gris oscuro (figura 26). Estas rocas se encuentran rodeadas por un material arcilloso blando y fétido de color marrón naranja y negruzco.



Figura 26. Subunidad de Calizas Sucias ubicada entre la subunidad de Calizas Puras. Obsérvese que en los niveles 190, 200 y 210 se presenta como una roca gris medio a oscuro, y en el nivel 180 como una roca marrón naranja.

Descripción Petrográfica

Para esta subunidad se analizaron 2 muestras bajo microscopio de luz polarizante. Estas muestras fueron tomadas en los niveles 180 (MSB 16') y 200 (MSB 22), donde la primera se tomó de la roca marrón oscuro, y la segunda de la roca gris medio a oscuro.

Esta calizas se clasificaron según Duham (1962) como *wackstones*; y según Folk (1962) como bioesparitas con buen escogimiento. Las muestras se encuentran constituidas por componentes carbonáticos (50 - 55%), con moderada influencia clástica (20 - 25%) y porosidad baja a media (15 - 20 %).

Los componentes ortoquímicos se encuentran representados por matriz parcialmente recristalizada a microespato, donde también se observó recristalización a espato y matriz micrítica en menor porcentaje. El cemento es esencialmente de tipo granular-mosaico y fibroso en pocos casos, observado en fragmentos fósiles.

Los aloquímicos se encuentran caracterizados fundamentalmente por peloides y microfósiles. Algunos peloides están principalmente alterados por disolución, mientras que otros se encuentran reemplazados por procesos de fosfatización, observado mayormente en la muestra MSB 22. El olor fétido en la roca se debe a este proceso de reemplazo.

Los microfósiles se presentan recristalizados a calcita y escasamente a dolomita, mayormente fracturados y redondeados, y bien preservados en pocos casos. Entre los microfósiles identificados se encuentran abundantes las algas rojas (figura 27 - 28), y en menor proporción briozoarios (figura 29), corales y equinodermos.

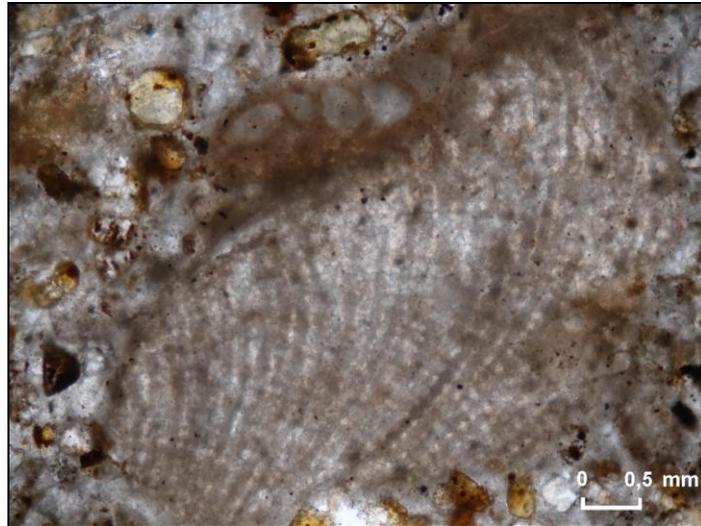


Figura 27. Fotomicrografía de alga roja micritizada, bien preservada en una matriz microespática. Se observa el aspecto reticulado característico de estas algas, con espacios ocupados con microespato. Muestra MSB 22, ocular 10x, objetivo 10x. Nícoles paralelos.

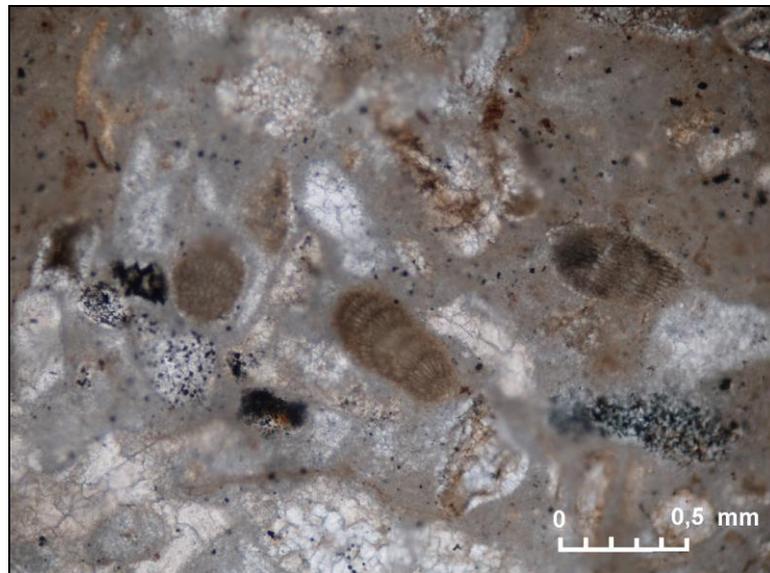


Figura 28. Fotomicrografía de algas rojas micritizadas en una matriz micrítica y espática, con formas redondas. Se observa el aspecto reticulado característico de estas algas, con espacios ocupados con microespato. Muestra MSB 16', ocular 10x, objetivo 10x. Nícoles paralelos.

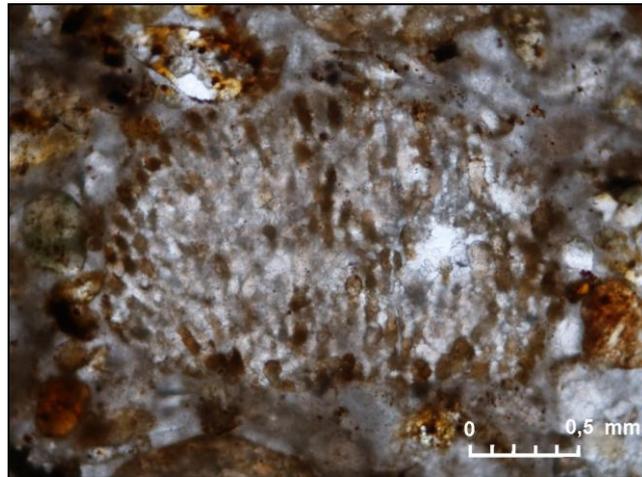


Figura 29. Fotomicrografía un fragmento de briozooario micritizado, donde se observa procesos de reemplazamiento por fosfatización. Muestra MSB 22, ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles paralelos.

Los extraclastos están compuestos mayormente por cuarzos plutónicos, seguidos de turmalina, fragmentos de chert, óxidos, materia orgánica y fragmentos de calizas. La porosidad se presenta principalmente como intrapartícula y móldica, producto de la disolución de peloides y conchas carbonáticas.

4.2.1.2. UNIDAD II. WACAS LÍTICAS

Ubicación y extensión

Se ubica en la zona norte-centro del frente de explotación en los niveles 210, 220 y 230, con un área de 6.207 m², presentando 5,55 % del área total.

Contactos

Se encuentra en contacto concordante con la subunidad de Calizas Puras en los niveles 210, 220 y 230, y posiblemente se encuentra en contacto tectónico con la unidad de rocas Metavolcánicas en el nivel 240, el cual no se observa aflorando.

Descripción de los Afloramientos

Esta unidad se encuentra representada por rocas poco competentes de grano fino, color marrón grisáceo con manchas de meteorización ocre, y presencia de delgadas vetas de calcita dispuestas de manera irregular (figura 30).



Figura 30. Afloramiento ubicado en el nivel 220, donde se observan rocas poco competentes de grano fino, color marrón grisáceo (Unidad de Wacas Líticas).

Descripción petrográfica

La clasificación de areniscas más usada es la de Pettijohn, Potter y Siever (1972). Estos autores toman en consideración el contenido de granos de cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca y porcentaje de matriz (figura 31). La clasificación permite obtener una relación entre el tipo de granos y porcentajes de los mismos y a través de la clasificación se pueden inferir la madurez textural y química, así como los ambientes sedimentarios y expectativas de porosidad (BAAMONDE, 2006).

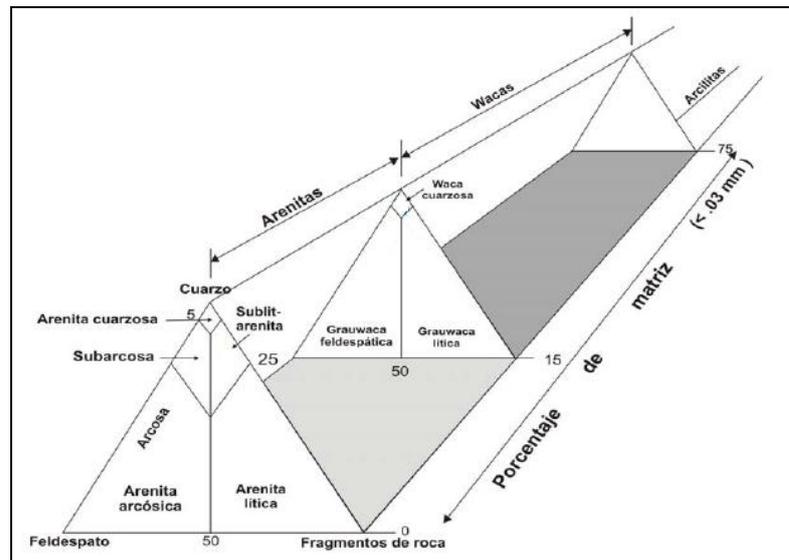


Figura 31. Triángulo de clasificación de areniscas según Pettijohn, Potter y Siever (1972).

Para esta unidad fueron analizadas bajo microscopio de luz polarizante tres muestras, las cuales se clasificaron según Pettijohn, Potter y Siever (1972), como wacas líticas de grano fino, con buen escogimiento y granos subredondeados a angulares, cuyos contactos más abundantes corresponden al grano-cemento, longitudinal y grano-matriz. Las muestras están constituidas mayormente por granos (60 %), seguido de matriz (20 %), cemento (10 %), y porosidad (10 %).

El componente detrítico principal es el cuarzo plutónico monocristalino (28 %), seguido en menor proporción por cuarzo plutónico policristalino (4 %). Las micas son otro componente frecuente, mayormente alineadas en una dirección principal y otras dispuestas irregularmente, representadas por muscovitas (13 %), biotitas y cloritas (2 %), seguidas por fragmentos de chert (3 %) y rocas volcánicas (5 %), y feldespatos, los cuales corresponden a ortosa (5 %).

Los tipos de matriz más abundantes corresponden a minerales de arcilla y material carbonático (micrita). El cemento es mayormente silíceo (sobrecrecimiento de cuarzo), carbonático (microespato), y en menor proporción de óxido (figura 32). Por otro lado se encontraron otros minerales como circón, hematita, glauconita y muy escasamente fragmentos fósiles sin identificar. En

general, la porosidad observada es de tipo interpartícula y por disolución de la matriz arcillosa o de cemento calcáreo.

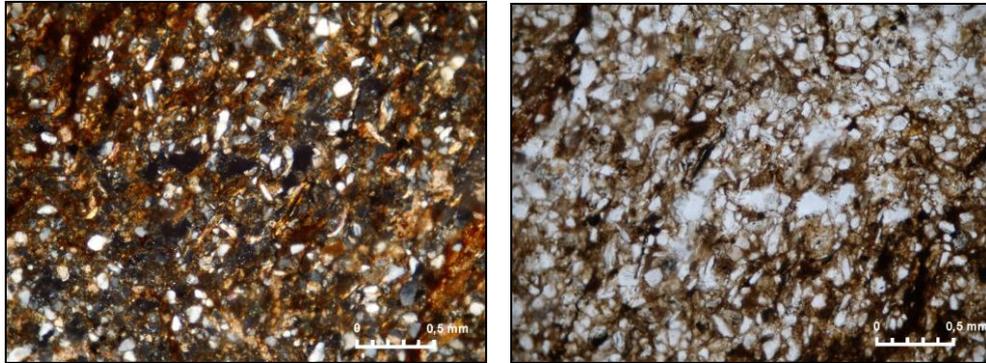


Figura 32. Fotomicrografía de Waca Lítica. Obsérvese en la foto derecha la matriz arcillosa (color marrón) y micrítica (color marrón oscuro), y cemento de óxido (color negro). Muestra MSB 39. Ocular 10x, objetivo 10x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

4.2.1.3. UNIDAD III. ARENISCA LÍTICA VOLCÁNICA

Ubicación y extensión

Esta unidad se encuentra ubicada en la parte central del frente de explotación, desde el nivel 190 al 230, abarcando un área de 1.121 m², lo que representa 1,54 % del área total.

Contactos

Se encuentra en contacto concordante con la subunidad de Calizas Puras en los niveles 180, 190, 200, 210, 220 y 230.

Descripción afloramiento

Se presenta como un cuerpo irregular que se encuentra aflorando entre subunidad de Calizas Puras con un espesor promedio de 7 metros, donde se observa como una roca poco competente de color gris oscuro, con tamaño de

grano fino a medio embebido en una matriz fina. Presenta vetas delgadas de calcita dispuestas irregularmente (figura 33).



Figura 33. Afloramiento ubicado en el nivel 230, donde se observan rocas poco competentes de color gris oscuro con tamaño de grano fino a medio (Unidad de Areniscas Líticas Volcánicas)

Descripción petrográfica

Scasso y Limarino (1997), modificaron la clasificación de Pettijohn, Potter y Siever (1972), dividiendo la clasificación de areniscas líticas en: areniscas líticas volcánicas con más de 50 % de líticos de vulcanitas y piroclásticas, y areniscas líticas dominadas por fragmentos de rocas metamórficas y sedimentarias.

Para esta unidad se analizaron bajo microscopio de luz polarizante tres muestras tomadas en los niveles 190 y 210, las cuales se clasificaron según Pettijohn, Potter y Siever (1972) como areniscas líticas, y según Scasso y Limarino (1997) como areniscas líticas volcánicas. Esta roca está compuesta por granos de tamaño fino a medio, embebidos en una matriz fina de manera caótica (figura 34).

La roca se encuentra constituida mayormente por fragmentos volcánicos (20 %) de grano a fino a medio, generalmente redondeados (figura 35). Estos fragmentos llegan a presentar texturas ígneas (figura 39), porfidoblásticas (figura 36), las cuales son características de rocas volcánicas. También se observaron fragmentos de chert (10 %), seguidos de cuarzo policristalino (8 %); cuarzo plutónico monocristalino (5 %); cuarzo calcedonio volcánico (1 %); óxidos (7 %); biotita y clorita (5 %); calcita (2 %); plagioclasas (1 %), minerales accesorios (1 %), matriz limosa-arcillosa-fosfática (15 %), cemento de cuarzo (sobrecrecimiento), y óxidos (10 %), y porosidad (15 %).

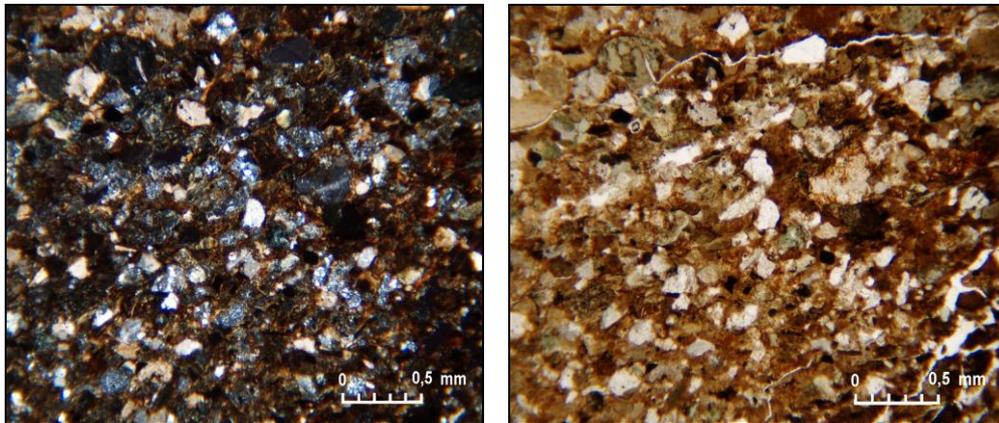


Figura 34. Fotomicrografía de Arenisca Lítica Volcánica. Obsérvese los fragmentos volcánicos embebidos en una matriz limo-arcillosa de manera caótica. Muestra MSB B5. Ocular 10x, objetivo 4x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

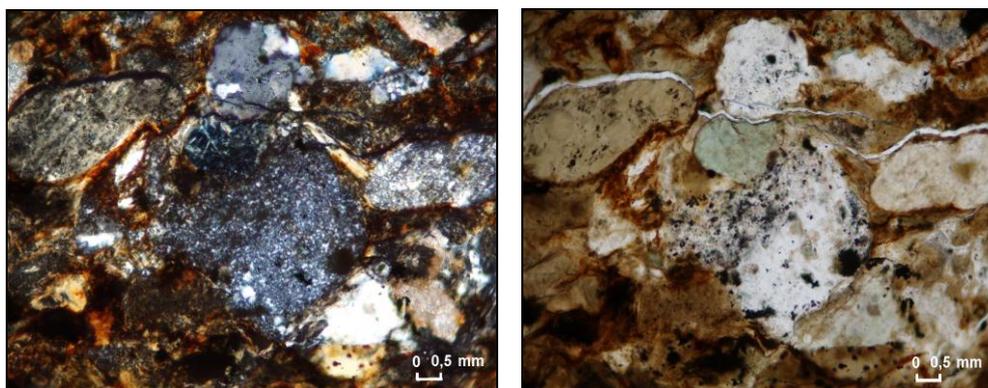


Figura 35. Fotomicrografía de Arenisca Lítica Volcánica. Obsérvese los cristales de cuarzo monocristalino y policristalino en la parte superior e inferior respectivamente, y los fragmentos volcánicos a la derecha e izquierda de éstos. Muestra MSB B5. Ocular 10x, objetivo 10x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

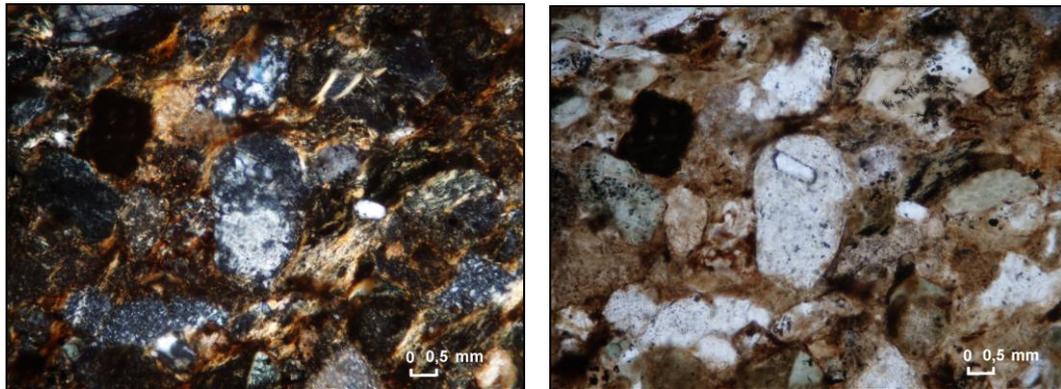


Figura 36. Fotomicrografía de Arenisca Lítica Volcánica. Obsérvese el fragmento de volcánico con textura porfidoblastica. Muestra MSB 44. Ocular 10x, objetivo 10x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

4.2.2. UNIDAD METAÍGNEA

4.2.2.1. UNIDAD I. METAVOLCÁNICA

Ubicación y extensión

Esta unidad se encuentra en la parte superior del frente de explotación, en el nivel 240, con un área de 1.727 m^2 , que representa el 1,55 % del área total.

Contactos

Se encuentra en contacto tectónico, con las subunidades de Calizas Puras y Waca Líticas en los niveles 230 y 240. El contacto no se observa aflorando.

Descripción en afloramiento

Roca masiva de color marrón verdoso afanítica, levemente meteorizada a color marrón grisáceo con delgadas vetas de calcita dispuestas irregularmente. El afloramiento se encuentra mayormente cubierto por suelo residual heterogéneo y capa vegetal (figura 37).

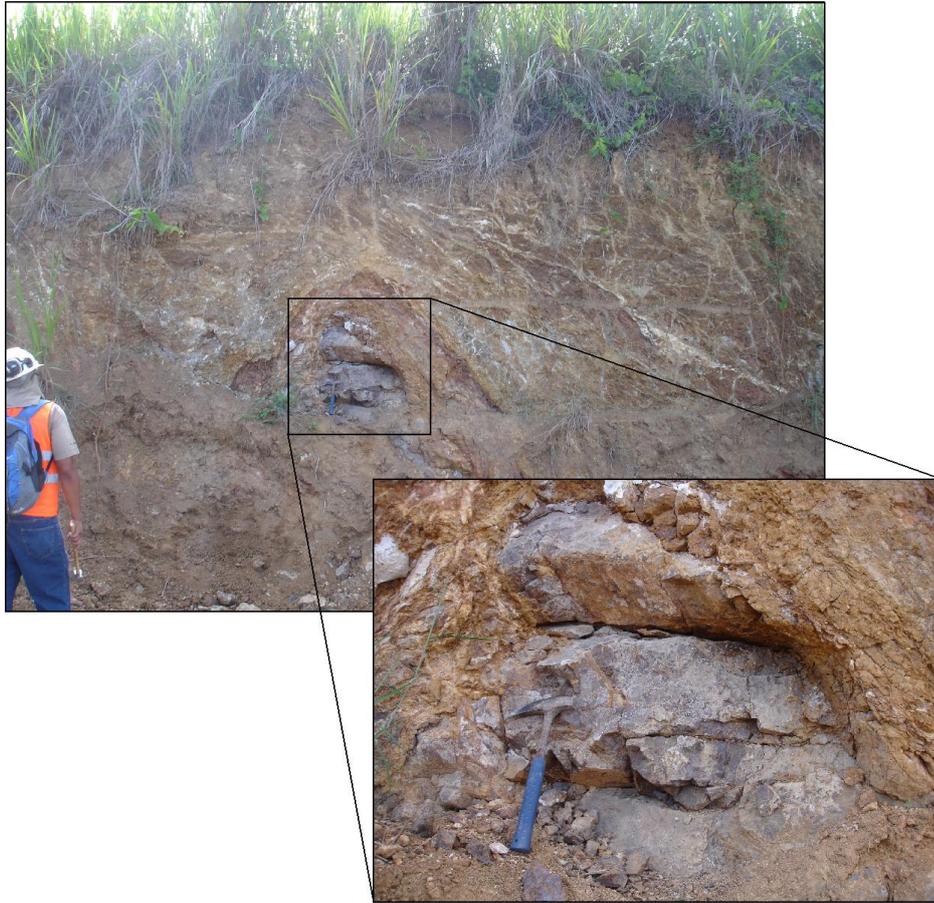


Figura 37. Aforamiento ubicado en nivel 240, donde se observa Roca masiva de color marrón verdoso afanítica, rodeada de suelo residual heterogéneo y capa vegetal (Unidad Metavolcánica)

Descripción Petrográfica

El magma, del cual provienen las rocas ígneas, está compuesto fundamentalmente por ocho elementos químicos que a su vez son los constituyentes principales de los silicatos: oxígeno, silicio, aluminio, calcio, sodio, potasio, magnesio, hierro, titanio y fósforo. El silicio y el oxígeno son los constituyentes mayoritarios de las rocas ígneas (se indica como concentración de SiO_2 o sílice de un magma). En cuanto al contenido de sílice las rocas ígneas se dividen en: máficas (45 a 52% de sílice), intermedias (52 á 65% de sílice) y félsicas (> 65% de sílice) (BAAMONDE, 2006). Clasificación observada en la figura 38.

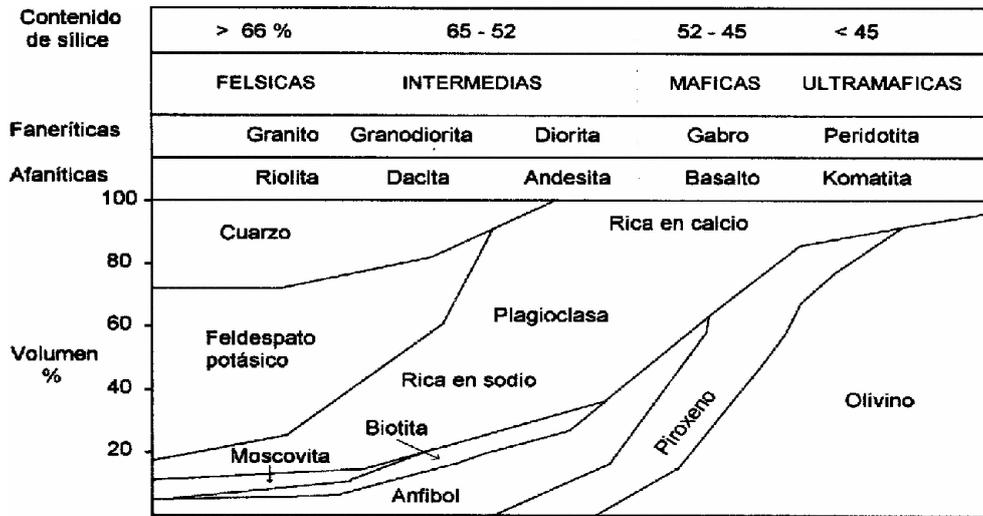


Figura 38. Clasificación de rocas ígneas volcánicas y plutónicas. (Tomado de BAAMONDE, 2006).

Las rocas volcánicas en general pueden tener texturas vítreas o cristalinas de grano muy fino dependiendo del grado de enfriamiento. Dentro de una misma colada de lava suele ocurrir que la parte más externa, al experimentar mayor grado de enfriamiento, es esencialmente vítrea, y la parte interna es esencialmente cristalina afanítica (BAAMONDE, 2006). Las texturas holocristalinas más frecuentes en rocas volcánicas se observan en la figura 39.

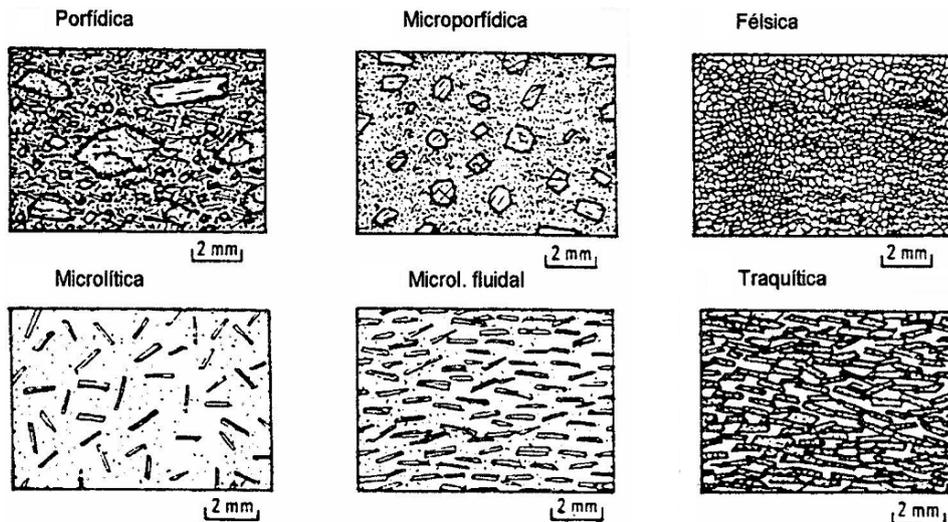


Figura 39. Texturas de rocas volcánicas holocristalinas (tomado y modificado de BAAMONDE, 2006).

Para esta unidad se analizaron dos muestras bajo microscopio de luz polarizante, de las cuales se clasificó la roca según su constitución mineralógica como una metatoba máfica, con textura traquítica y porfídica (figura 40), presentándose con microlitos en diferentes direcciones, y otros en una dirección principal.

Entre los minerales presentes, está la plagioclasa (65 %) esencialmente alterada, que se presentan en forma de microlitos (labradorita), y porfidoblastos (oligoclasa) mayores a 1,5 mm de manera escasa; óxidos, mayormente con cristales de epidoto (10 %); microlitos de piroxenos muy alterados (8 %); matriz afanítica (7 %), clorita y biotita (5 %), prehnita y posiblemente pumpellyíta (1 %), circón (1 %) y calcita relleno vetas (3 %). Se observaron escasas amígdalas, poco deformadas, rellenas principalmente por clorita, y procesos de zonación en cristales de plagioclasas (figura 41).

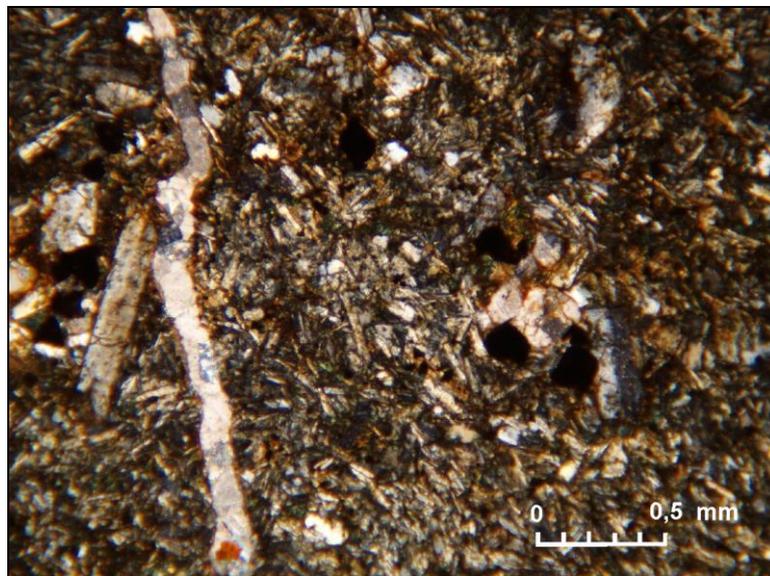


Figura 40. Fotomicrografía de Metatoba. Obsérvese la textura traquítica, donde algunos cristales de plagioclasas presentan diferentes orientaciones y otros una dirección preferencial. También se observa textura porfidoblastica con cristales de plagioclasas mayores a 0,5 mm. Muestra MSB B1. Ocular 10x, objetivo 4x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

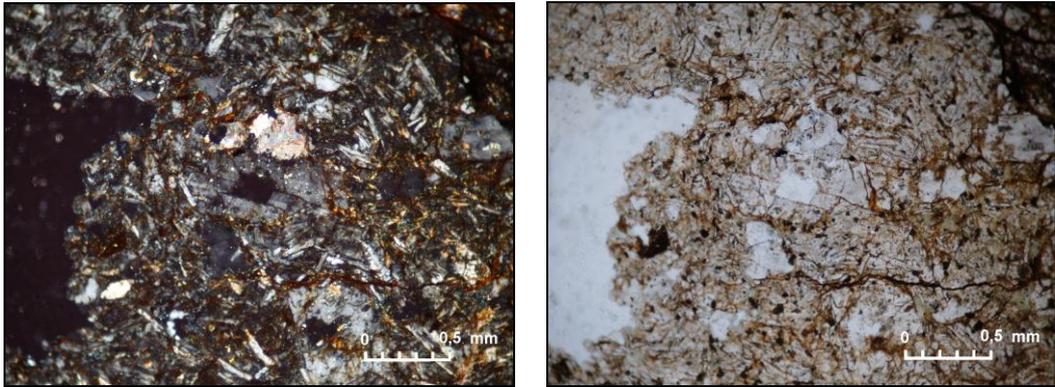


Figura 41. Fotomicrografía de Metatoba. Obsérvese el cristal de plagioclasas en el centro, el cual presenta procesos de zonación. Muestra MSB B1. Ocular 10x, objetivo 4x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

4.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La zona de estudio se presenta como un macizo rocoso fracturado, donde afloran rocas principalmente sedimentarias y en menor proporción rocas metaígneas. A continuación se presentan los rasgos estructurales observados en las diferentes unidades litológicas:

4.3.1. UNIDADES SEDIMENTARIAS

4.3.1.1. DIACLASAS:

Las discontinuidades que se presentan con mayor frecuencia en el macizo rocoso ubicado en el frente de explotación, vienen dada por la presencia de diaclasas, observadas únicamente en la subunidad de Calizas Puras. Éstas se distribuyen entre 3 y 4 familias con persistencias de 6 a 2 diaclasas por metro, y orientaciones de rumbo y buzamiento variados. La rugosidad se presenta mayormente como ondulada-rugosa, con aperturas entre 0,5 a 5 cm, la cual en algunos casos se encuentra rellena por material limo-arcilloso.

Los planos de diaclasas medidos a lo largo del frente de explotación se agruparon y representaron en estereogramas, mostrándose la distribución de los polos de dichos planos y su densidad. Los planos medidos en campo se muestran a continuación (tabla 4), de norte a sur:

	Diaclasa # 1	Frecuencia	Diaclasa # 2	Frecuencia	Diaclasa # 3	Frecuencia
N	N-S, 40°E	4:1	N80°E, 60°S	5:1	N-S, 60°W	4:1
	N75°W, Pv	3:1	N15°E, Pv	3:1	N20°W, 30°S	4:1
	N75°W, 35°S	5:1	N15°E, 65°S	5:1	N75°W, 65°N	5:1
	N45°E, Pv	4:1	N55°W, 65°N	5:1	N30°W, 40°S	5:1
	N-S, 55°W	3:1	N60°E, 62°S	3:1	N10°W, Pv	4:1
	N45°E, 55°S	5:1	N-S, Pv	5:1	E-W, 45°N	5:1
	N10°W, 65°S	6:1	N75°E, 65°S	6:1	N70°E, 65°N	5:1
	N65°W, 70°N	4:1	N35°E, 30°S	3:1	N83°W, 63°S	3:1
	N45°W, 30°S	3:1	N35°E, Pv	2:1	N55°W, 80°N	3:1

	Diaclasa # 1	Frecuencia	Diaclasa # 2	Frecuencia	Diaclasa # 3	Frecuencia
	N40°W, 70°S	2:1	N70°E, 45°S	3:1	N55°E, Pv	3:1
	N23°W, 63°S	3:1	N63°W, 33°N	2:1	N30°E, Pv	2:1
	N25°W, 45°S	4:1	N15°W, 65°N	3:1	N70°E, 65°N	3:1
	N45°E, Pv	2:1	N50°W, 43°N	3:1	N50°W, 70°S	2:1
	N45°W, 30°S	2:1	N30°W, 75°N	2:1	N30°E, 70°N	3:1
	N50°E, 50°N	3:1	N50°W, Pv	4:1	N30°E, 40°S	3:1
	N62°W, 37°N	4:1	N35°E, 80°S	4:1	N45°W, 55°S	3:1
	N25°W, 65°S	3:1	N60°W, 45°N	2:1	N30°E, Pv	2:1
S	N15°E, 45°N	6:1	N-S, Pv	5:1	N45°W, 64°S	6:1

Tabla 4. Planos de diaclasas medidos en campo con su frecuencia y ubicación general.

La tabla 4, muestra las diferentes familias de diaclasas presentes en el macizo rocoso, donde se observa una persistencia promedio de tres familias de diaclasas por metro (figura 42a), mientras que en algunos casos se observan persistencias altas de 6 a 5 familias por metro. Las mayores persistencias están localizadas al norte del frente de explotación con promedios de 5 familias por metro (figura 42b).



Figura 42a. Afloramiento ubicado al sur del frente de explotación, donde se observan 3 familias de diaclasas por metro.



Figura 42b. Afloramiento ubicado al norte del frente de explotación, donde se observan 5 familias de diaclasas por metro.

En las siguientes figuras se encuentra representada en estereogramas la distribución de las familias de diaclasas, seguido por la densidad de polos y orientaciones preferenciales de las mismas (figura 43a-b).

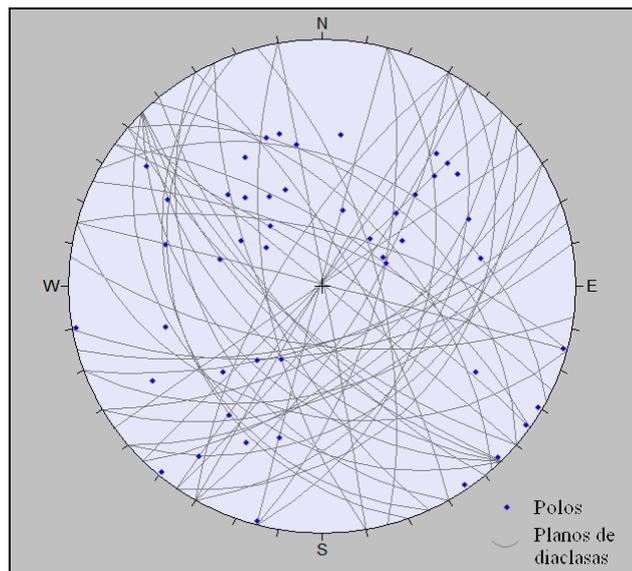


Figura 43a. Distribución de planos de diaclasas y polos de los mismos.

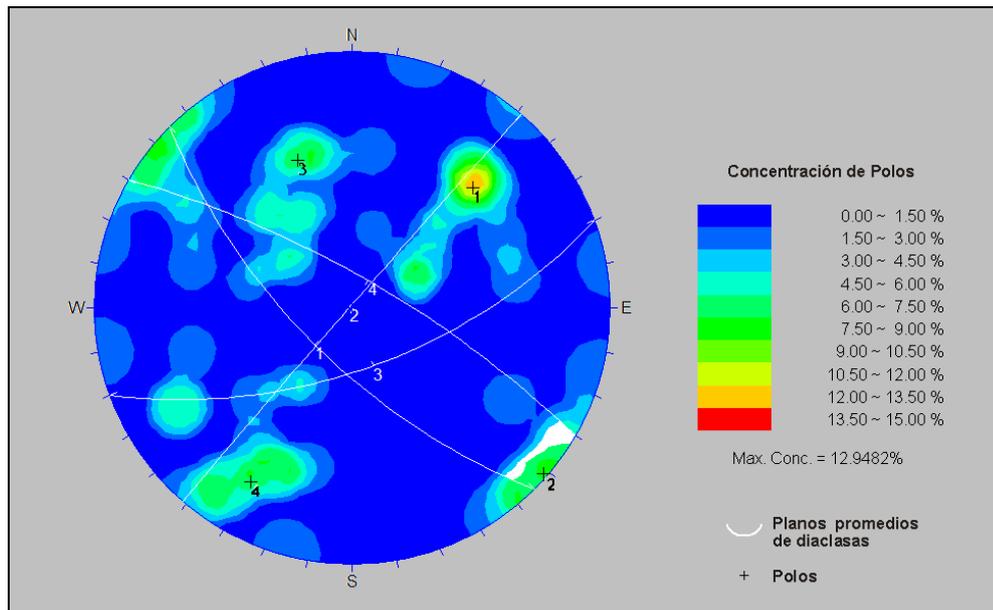


Figura 43b. Concentración de densidad de polos y planos promedios de diaclasas.

En la figura 43b, se observa la concentración de densidad de polos, donde se presentan 4 orientaciones preferenciales representadas por los siguientes planos de diaclasas:

Plano Promedio #	Dip Dip	Notación Norteamericana
1	67;225	N45°W 67°S
2	89;311	N41°E 89°N
3	63;160	N70°E 63°S
4	76;30	N60°W 76°N

Tabla 5. Orientaciones preferenciales de las familias de diaclasas.

4.3.1.2. ESTRATIGRAFÍA

La unidad sedimentaria se caracteriza por ser un bloque alóctono, el cual fue emplazado tectónicamente en un sitio muy diferente de donde éste se sedimentó, por lo que la estratigrafía actual no representa la original.

La subunidad de Calizas Sucias y la unidad de Areniscas Líticas Volcánicas se presentan como cuerpos tabulares subparalelos encontrados entre la subunidad de Calizas Puras. Estas dos subunidades poseen planos con orientaciones casi paralelas ($N80^{\circ}W\ 45^{\circ}S$), lo que evidencia posibles rasgos estratigráficos del material sedimentario. Es de notar también, que en la subunidad de Calizas Puras y la unidad de Wacas Líticas no se presentan patrones estratigráficos bien definidos, por lo que no se asegura la existencia definitiva de planos de estratificación en toda la unidad sedimentaria.

4.3.2. UNIDAD METAÍGNEA

4.3.2.1. DIACLASAS

Esta unidad se presenta como un afloramiento de pocas dimensiones donde se observaron algunos planos de diaclasas, entre los cuales se tienen las siguientes familias: $N15^{\circ}W\ 70^{\circ}S$, $N10^{\circ}E\ 15^{\circ}N$ y $N70^{\circ}E\ 70^{\circ}S$ observadas en la figura 44.



Figura 44. Orientaciones preferenciales de las familias de diaclasas observadas en la unidad metaígneas.

4.4. DIAGÉNESIS Y METAMORFISMO

4.4.1. DIAGÉNESIS: UNIDADES SEDIMENTARIAS

4.4.1.1. UNIDAD I. CALIZAS BIOCLÁSTICAS

Arche (1992), define que los procesos diagenéticos provocan en los sedimentos carbonáticos cambios mineralógicos y geoquímicos, cambios text-estructurales y litificación, esta última implica compactación, cementación y recristalización. Estos procesos dependen de las características hidroquímicas de las aguas intersticiales, P CO₂, mineralogía, pH, etc.

Baamonde (2009), define que la diagénesis de carbonatos involucra todos los procesos de disolución, cementación, litificación y alteración de los sedimentos durante el intervalo entre la depositación y el metamorfismo. Estos factores diagenéticos permiten preservar la porosidad inicial o modificarla en su totalidad, creando una porosidad secundaria completamente a la original.

4.4.1.1.1. PROCESOS DIAGENÉTICOS

- ***Procesos Orgánicos***

Micritización y formación de Envoltorios Micríticos

La micritización de partículas esqueléticas y la formación de envoltorios micríticos ocurren cuando un grano esquelético es reemplazado por micrita. Se forma debido a un proceso en el cual pequeños organismos crean una perforación en el esqueleto y, al morir, dejan dicha perforación vacía, la cual es rellenada por cemento micrítico de calcita o aragonito; la repetición de estos procesos produce un envoltorio micrítico en los granos fósiles (BAUTISTA Y BORNEO, 2003).

La micritización de partículas esqueléticas se observó muy frecuente en todas las muestras, mientras que la formación de envoltorios micríticos está presente de manera escasa y aleatoria, en los cuales se pueden observar algunos fragmentos fósiles dentro de estos mismos envoltorios (figura 45).

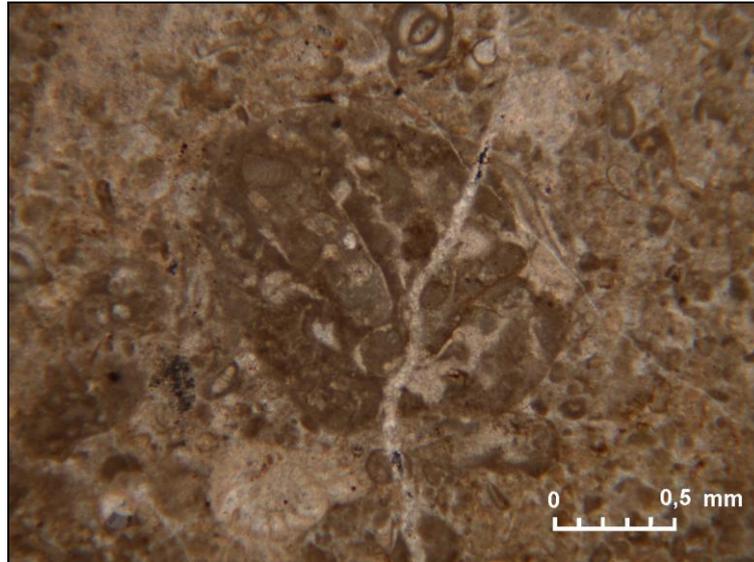


Figura 45. Fotomicrografía de Caliza *Packstone* de la subunidad de Calizas Puras, donde se observa envoltorio micrítico y partículas esqueléticas micritizadas (foraminífero en la parte superior). Muestra MSB 17. Ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles cruzados.

- **Procesos Físico-Químicos**

Compactación Física

Además de la cementación, el principal proceso que conduce a la reducción de la porosidad en los sedimentos es la compactación. Las etapas más tempranas de la compactación en sedimentos sin cementar, comprenden procesos como el reajuste de los granos con estructuras laxas para generar fábricas más empaquetadas, la rotura de las conchas delicadas, el aplastamiento de los granos menos competentes y la expulsión de parte del agua de imbibición del barro carbonatado (ADAMS *et. al*,1997). Por lo tanto, la diagénesis física o mecánica ocurre por incremento de la densidad de empaquetado de las partículas.

Cementación.

Es un proceso post-depositacional que consiste en la precipitación, dentro de los poros del sedimento, de un fluido de poro sobresaturado en ciertos componentes. Por lo tanto, la cementación representa la formación de minerales autigénicos que contribuyen con la disminución parcial o total de la porosidad del sedimento original.

El aspecto fundamental para el mecanismo de la cementación según Baamonde (2009), es la disponibilidad de carbonato disuelto para su posterior precipitación como cemento. Los diversos tipos de cementación dependerán de una serie de factores físico-químicos y bio-químicos relacionados con el ambiente de formación de los minerales iniciales, del ambiente diagenético en el cual ocurre la cementación, y del grado de estabilidad de los minerales a la disolución. En lo que se refiere al grado de estabilidad, de mayor a menor, de los minerales de carbonato más importantes se tienen:

En ambiente marino: calcita > calcita Mg > aragonito.

En ambientes meteóricos: calcita > aragonito > calcita Mg.

Los cementos carbonáticos ocurren en formas muy diferentes y sus texturas, posiciones relativas y características geoquímicas, tales como isótopos y elementos traza proveen las mayores pistas para distinguir el ambiente diagenético en el cual ocurrió la cementación (LONGMAN, 1982).

Según los procesos de cementación es posible estimar el ambiente diagenético temprano en el que se comienzan a litificar las rocas: las rocas carbonáticas estudiadas presentan abundante cemento equigranular, observándose en forma de microspato y espato principalmente; lo que coloca a estas muestras probablemente en la zona activa de un ambiente freático de agua fresca, donde ocurre diagénesis meteórica. Algunas de las evidencias son:

- Abundante cemento de calcita
- Reemplazamiento de aragonito por calcita
- Engrosamiento de los cristales hacia el centro de los poros
- Porosidad relativamente baja
- Cemento de calcita equigranular rellenando los espacios porosos creados o entre los granos.

El proceso de cementación es muy frecuente en todas las muestras estudiadas, fundamentalmente con cementos microespáticos granulares-mosaico, y en menor proporción cementos espáticos y pseudoespáticos granulares-mosaico. También se observó escaso cemento de tipo fibroso, presente en mayor proporción en la subunidad de Calizas Sucias.

Disolución

Es la destrucción selectiva de ciertos constituyentes depositacionales de las rocas carbonáticas por la acción de los procesos diagenéticos. La disolución es la principal generadora de la porosidad secundaria. Según Arche (1992) la disolución en las rocas carbonáticas depende de los siguientes factores:

- Valores composicionales del agua como son la temperatura, pH, presión, salinidad y velocidad del flujo.
- Propiedades propias del material, puesto que la disolución es directamente proporcional al grado de estabilidad mineralógica de los elementos constituyentes de la roca. Por ejemplo, el orden decreciente de solubilidad de los siguientes minerales es calcita muy magnésiana, aragonito, calcita magnésiana, calcita y dolomita.

Este proceso es responsable de la formación de porosidad secundaria en las rocas estudiadas, ocurriendo principalmente en la subunidad de Calizas Sucias, observándose como disolución de componentes aloquímicos como peloides y fragmentos de fósiles (figura 46).

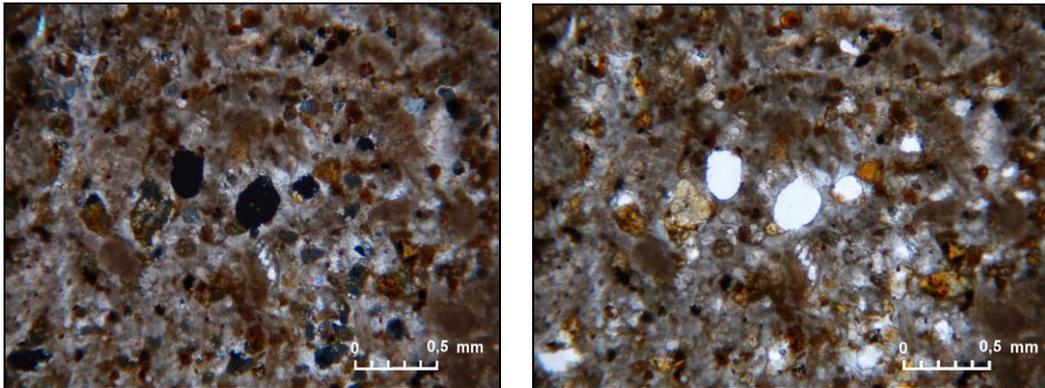


Figura 46. Fotomicrografía de Caliza *Packstone* de la subunidad de Calizas Sucias. Se observa procesos de disolución en peloides, generando porosidad secundaria. Muestra MSB 22. Ocular 10x, objetivo 4x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

Reemplazo

Este proceso diagenético involucra variación desde el punto de vista mineralógico en el material preexistente y está estrechamente ligado con la ocurrencia de cambios en la cristalinidad (ARCHE, 1992).

Ambos minerales involucrados, tanto el reemplazado como el reemplazante están constantemente en contacto y sólo los separa una película delgada de líquido que actúa para el paso de iones (ZAPATA, 1983).

En las rocas carbonáticas se pueden presentar procesos de reemplazamiento como: glauconitización, silicificación, fosfatización, dolomitización, entre otros. Los procesos observados en el análisis petrográfico son los siguientes:

- ***Fosfatización***

Los minerales fosfáticos se generan por la precipitación de las aguas intersticiales en la interfase agua-sedimento y requieren para su formación de temperaturas cálidas y de la presencia de componentes orgánicos. Están asociados a zonas donde las corrientes de surgencia contribuyen con la productividad primaria y en sedimentos con características anóxicas en la que se encuentra reemplazando los carbonatos. (ZAPATA, 2003).

Este proceso es frecuente en la subunidad de Calizas Sucias, donde se observó principalmente como reemplazo en peloides y en algunos casos en partículas esqueléticas (figura 47).

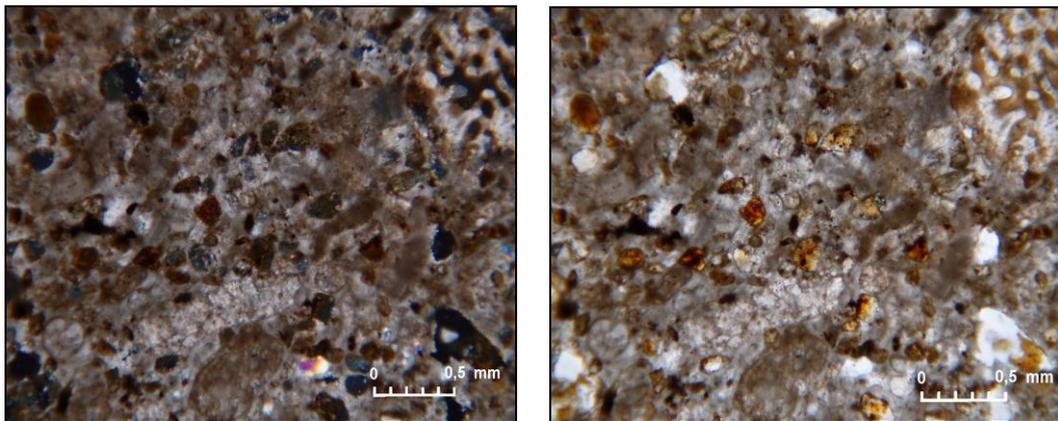


Figura 47. Fotomicrografía de Caliza *Wackstone*, de la subunidad de Calizas Sucias. Se observa reemplazamiento por procesos de fosfatización, mayormente en peloides. Muestra MSB 22. Ocular 10x, objetivo 4x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

- ***Dolomitización***

La dolomitización es la conversión de minerales CaCO_3 en dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ debido al reemplazo de Ca por el Mg en el enrejado cristalino, o por la formación directa del $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ debido a soluciones ricas en Mg con respecto al Ca, en combinación con factores físico-químicos. La formación de

dolomita es favorecida por una relación baja de $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{CO}_3^{2-}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$, y por altas temperaturas.

La terminología utilizada para la clasificar la dolomitización y su origen varía de acuerdo el autor que aborda el tema. El principal problema en las clasificaciones de la dolomita en su aspecto genético radica en el tipo de frontera o marcador que ha de separar los tipos de dolomita. Como dolomita primaria, se considera exclusivamente la que proviene de soluciones ricas en Mg^{2+} con relación al Ca^{2+} . En el caso de la dolomita derivadas de procesos diagenéticos, la división es complicada, puesto que algunos autores pueden considerar una cementación temprana o la litificación del sedimento como marcador.

Para este trabajo se utilizará la clasificación de Larsen y Chillingar (1979) donde consideran tres tipos esenciales de dolomita, excluyendo la originada por metamorfismo, de la siguiente manera:

1. Primaria. Formada en la interfase aguas-sedimento por precipitación directa de una solución.
2. Diagenética. Formada por reemplazo del carbonato de calcio en los sedimentos post-depositacionales, pero antes de la litificación. Se refiere a una dolomita penecontemporánea en los estados iniciales de la diagénesis, pero seguida directamente por una epigénesis.
3. Epigénica o catagenética. Formada esencialmente por reemplazo de carbonato de calcio en sedimentos litificados o rocas. La dolomita epigenética abarca el periodo desde la consolidación del sedimento hasta que la roca arriba a la superficie y es expuesta a la meteorización, donde la desdolomitización puede predominar.

Este proceso es observado en la subunidad de Calizas Sucias de manera escasa, presentándose mayormente en conchas fósiles con cristales de tamaños medio a gruesos, y como recristalización de la matriz a cemento microespato dolomítico (figura 48).

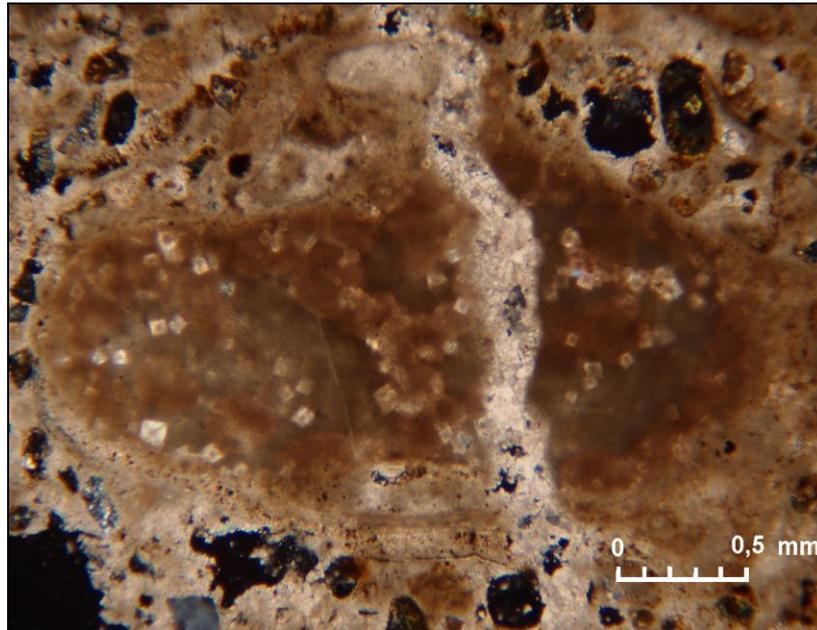


Figura 48. Fotomicrografía de Caliza *Wackstone*, de la subunidad de Calizas Sucias. Se observa reemplazamiento por procesos de dolomitización en una alga roja. Muestra MSB 22. Ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles cruzados.

Procesos Neomórficos

El neomorfismo es la transformación que ocurre entre un mineral y él mismo o un polimorfo, donde se mantiene su composición original pero varía su forma, tamaño de los cristales y orientación (Bathurst, 1975).

Durante la diagénesis, el aragonito puede transformarse en calcita, sin desarrollo de una porosidad significativa. Habitualmente, esta transformación conlleva un aumento en el tamaño de grano (neomorfismo agradante) (ADAMS *et. al*, 1997).

Muy frecuentemente, la micrita componente de las calizas puede resultar transformada en calcita de grano más grueso. Los términos microesparita y pseudoesparita se emplean para describir los mosaicos de origen neomórfico con tamaño medio de grano de 4-10 μm y $> 10 \mu\text{m}$, respectivamente (ADAMS *et. al*, 1997).

Por su parte, la inversión es un proceso que incluye la transformación de un polimorfo a otro, permaneciendo la composición química constante. La inversión más común en rocas carbonáticas es la transformación de aragonito a calcita, debido que el aragonito es un mineral muy inestable en condiciones subaéreas de temperatura y presión, por lo que pasa a una fase más estable (ADAMS *et. al*, 1997).

Los procesos de inversión se pueden clasificar en dos tipos: inversión homoaxial y heteroaxial. La inversión homoaxial ocurre por solución y precipitación *in situ* en ambientes acuosos donde se conserva la forma de los cristales aragoníticos. Por su parte, en la inversión heteroaxial no hay correspondencia óptica o estructural entre los cristales de aragonito y calcita ya que el cambio o transformación ocurre por la variación de posición de los iones en la película cristalina sin presencia de líquido ni largo transporte de iones (ZAPATA, 1983).

En las muestras analizadas se observan fragmentos de fósiles que se encuentran recristalizados a calcita, conservado la forma de los cristales de aragonito, indicando una inversión de tipo homoaxial (figura 49), y también se observaron fragmentos fósiles que presentan una inversión de tipo heteroaxial (figura 50), de forma recristalizada sin correspondencia óptica ni estructural del componente original. El neomorfismo agradante se presenta en todas la muestras como recristalización de la matriz a microespato.

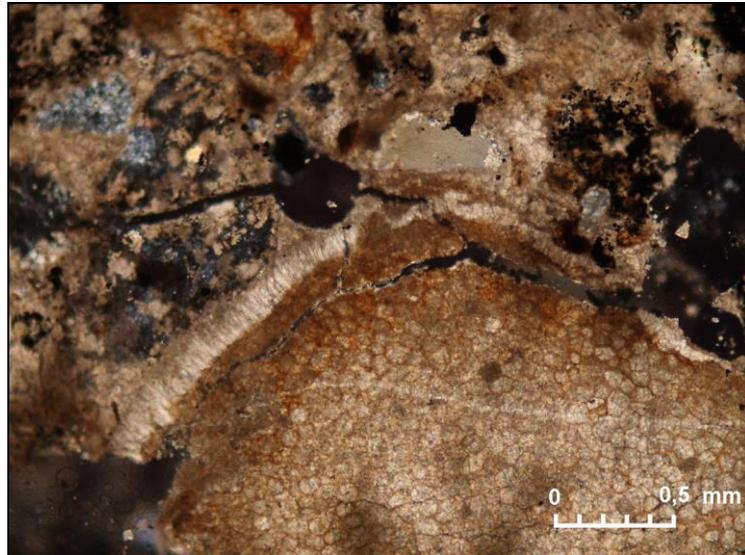


Figura 49. Fotomicrografía de Caliza *Wackstone*, de la subunidad de Calizas Sucias. Se observa cemento fibroso en el borde del bioclasto (briozooario), indicando inversión homoaxial. Muestra MSB 16'. Ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles cruzados.

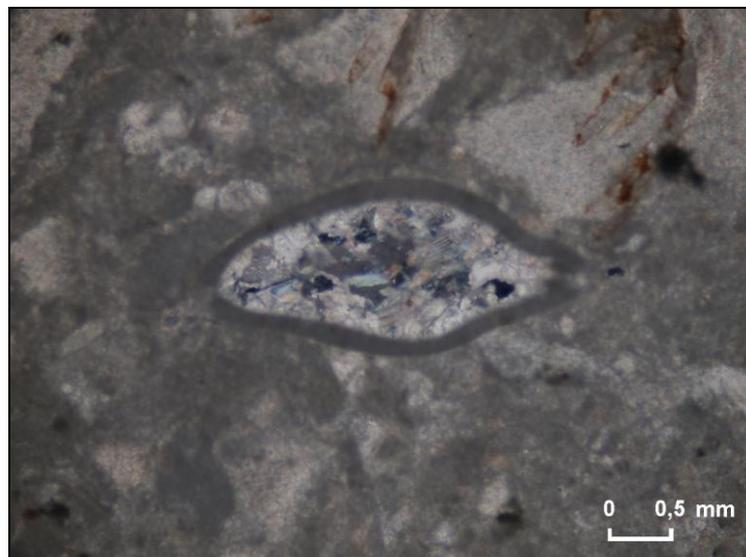


Figura 50. Fotomicrografía de Caliza *Packstone*, de la subunidad de Calizas Puras. Bioclasto sin diferenciar, posiblemente un braquiópodo, con inversión heteroaxial. Muestra MSB G4. Ocular 10x, objetivo 10x. Nícoles cruzados.

Porosidad

Cualquier descripción de una roca carbonatada debe incluir una estimación de la cantidad y tipo de la porosidad en el sedimento original. La porosidad puede ser primaria, es decir, estaba presente y a en el sedimento original, o secundaria, desarrollada como resultado de la diagénesis. Una clasificación de los tipos de porosidad se muestra en la figura 51.

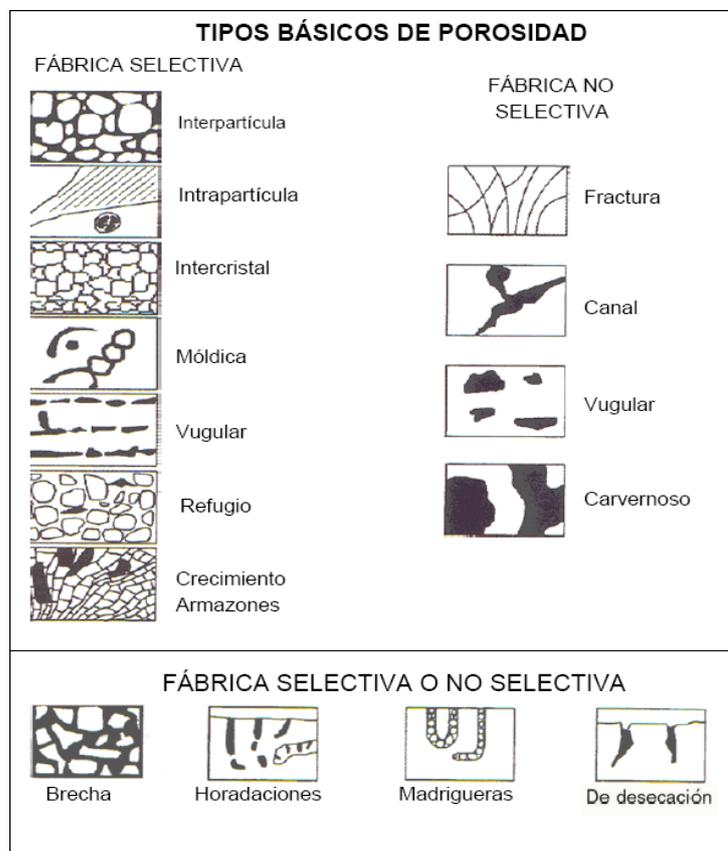


Figura 51. Clasificación de porosidad según Choquette y Pray (1970). Tomado y modificado de Longman (1982).

En la subunidad de Calizas Puras la porosidad es escasa y se presenta de tipo, en cambio en la subunidad de Calizas Sucias se presenta en mayor proporción, observándose mayormente de tipo intrapartícula y mórdica. En las dos subunidades la porosidad se de tipo secundaria (figura 52).

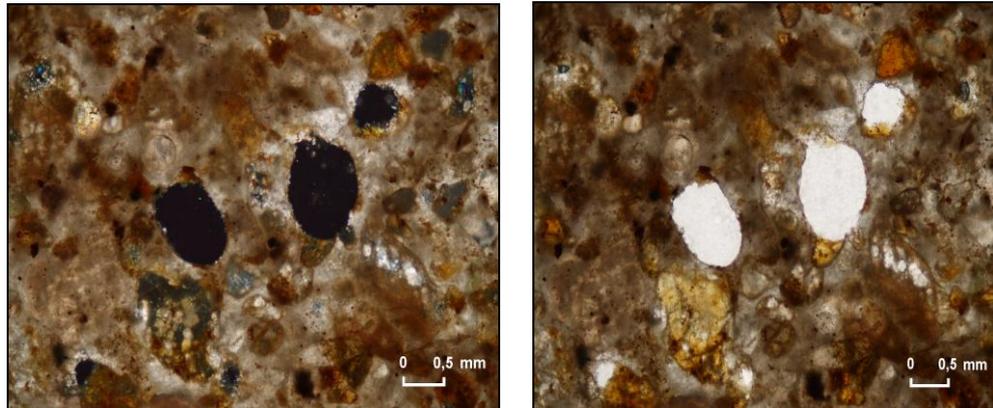


Figura 52. Fotomicrografía de Caliza *Wackstone*, de la subunidad de Calizas Sucias. Se observa porosidad secundaria generada por disolución de peloides. Muestra MSB 22. Ocular 10x, objetivo 10x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

Presión-Solución

El proceso de presión-solución es el principal proceso físico-químico que afecta a los sedimentos después de su depositación, y consiste en la disolución de los minerales o materiales sedimentarios por efecto del aumento de la presión litostática. Uno de los procesos comunes en carbonatos durante la diagénesis tardía son las estilolitas (figura 53), definido por residuos insolubles del material disuelto encima y debajo de este contacto. Las estilolitas son formadas por el efecto de presión-disolución durante la compactación (BAAMONDE, 2009).

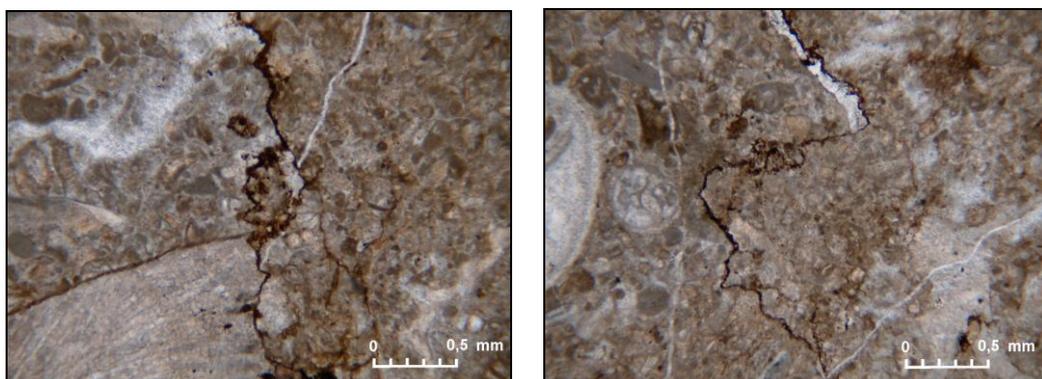


Figura 53. Fotomicrografía de Calizas *Packstones*, de la subunidad de Calizas Puras. Se observan estilolitas con formas irregulares y aserradas, rellenas con óxidos. Muestra MSB 25 y MSB 21. Ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles paralelos.

Las estilolitas son frecuentes, observándose en la todas las muestras de la unidad carbonática con formas irregulares y aserradas, rellanadas por óxidos y calcita espato, producto de las altas presiones litostáticas.

4.4.1.1.2. EFECTOS DIAGENÉTICOS

Diagénesis temprana

Esta evidenciada en esta unidad por la inversión homoaxial de aragonito a calcita, conservando la estructura fibrosa observada en algunas conchas fósiles como cemento fibroso con bajo contenido de Mg, presentándose de manera escasa y aleatoria en las muestras. Este cemento se caracteriza por agregados de prismáticos alargados y de tamaños muy variables, formándose a velocidades de cristalización lentas y mineralógicamente pueden estar constituidos por aragonito, calcita magnesiana y calcita con bajo Mg por inversión. La morfología fibrosa es la más característica en el medio diagenético marino, siendo muy raros en ambientes marinos profundos (BAAMONDE, 2009).

La presencia de Envoltorios Micríticos encontrados de forma escasa, es otra evidencia de diagénesis temprana, producto de la alteración biogénica o acción bacteriana en ambientes depositacionales carbonáticos.

Diagénesis intermedia

El aumento de la temperatura contribuye con la diagénesis, derivada de la acción de los fluidos intersticiales, sin embargo los procesos de disolución y cementación son muy lentos y los cristales de calcita formados son relativamente más largos que los formados en los ambientes diagenéticos en o cerca de la superficie en contacto con las aguas frescas. Los cristales que se forman son del tipo granular o mosaico (blocky) de calcita con bajo Mg (BAAMONDE, 2009).

Esta etapa esta evidenciada en esta unidad por la transformación neomórfica agradante de la matriz micrítica a cemento microespato y espato en menor proporción, donde se genera el cemento tipo granular o mosaico. Este proceso es observado en todas las muestras, donde también se presenta rellenando oquedades en la matriz y en las cavidades fósiles.

En la subunidad de Calizas Puras la alta recristalización de matriz micrita a microespato y espato, origina una disminución parcial de la porosidad, por lo que ésta se encuentra de manera escasa, mientras la subunidad Calizas Sucias la porosidad se presenta con mayor porcentaje, observándose mayormente de tipo intrapartícula y móldica (porosidad secundaria), producto del aumento de la presión litostática, lo que genera la disolución de peloides y conchas carbonáticas.

También se observaron procesos de disolución y precipitación, presentándose en algunas conchas fósiles formadas por aragonito originalmente, que luego se disuelven por el aumento de las temperaturas y presiones, y son recristalizadas a calcita microespato y en otros casos por espato, sin conservar su estructura interna, lo que se denomina como inversión heteroaxial.

Diagénesis tardía

Las estilolitas son frecuentes, observándose en la todas las muestras de la unidad con formas irregulares y aserradas, rellanadas por óxidos y calcita espato, las cuales son producto del aumento de la presión listostática. Los esfuerzos ejercidos también generan un reacomodo de los granos, los cuales originan contactos entre los mismos, lo que genera procesos de disolución granos-granos, observado de manera frecuente en las muestras.

En la subunidad Calizas Sucias se observan procesos de dolomitización, presentándose mayormente en conchas fósiles como reemplazo de CaCO_3 a dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, con cristales de tamaño medio a grueso, debido a la

conversión de Ca por el Mg en el enrejado cristalino. Según Larsen y Chillingar (1979) este proceso en rocas litificadas es producto de una diagénesis tardía.

4.4.1.2. UNIDAD II. WACAS LÍTICAS

La diagénesis es areniscas es principalmente dependiente de varios factores como son: ambientes sedimentarios del depósito, composición y textura del sedimento, profundidad de soterramiento, y migración de las por los poros durante los procesos de compactación y presión solución (BAAMONDE, 2006).

4.4.1.2.1. PROCESOS DIAGENÉTICOS

- **Procesos físico-químicos**

Compactación

La compactación es la disminución en el volumen o espesor de un sedimento, producto de la reducción de la porosidad, del contenido de agua y del aumento del grado de empaquetamiento, causado por el incremento de la profundidad de soterramiento o efecto de la carga litostática. El grado con el que se presenta depende de una serie de factores como características texturales de las partículas constituyentes, composición mineralógica, profundidad de soterramiento y efecto del tiempo geológico. Generalmente se expresa por la disminución de la porosidad, formación de un empaquetamiento apretado, expulsión de fluido intersticial y por la deformación y fracturamiento de los granos (SANDOVAL, 2000).

En las muestras estudiadas se observaron efectos de compactación principalmente en micas, (moscovita, biotita y clorita), las cuales se encuentran

con una orientación preferencial y en algunos casos presentan deformaciones dúctiles, debido a las presiones litostática del soterramiento (figura 54a). Además de estos efectos los procesos de compactación se evidencian por la reducción de la porosidad y el empaquetamiento moderado de los granos.

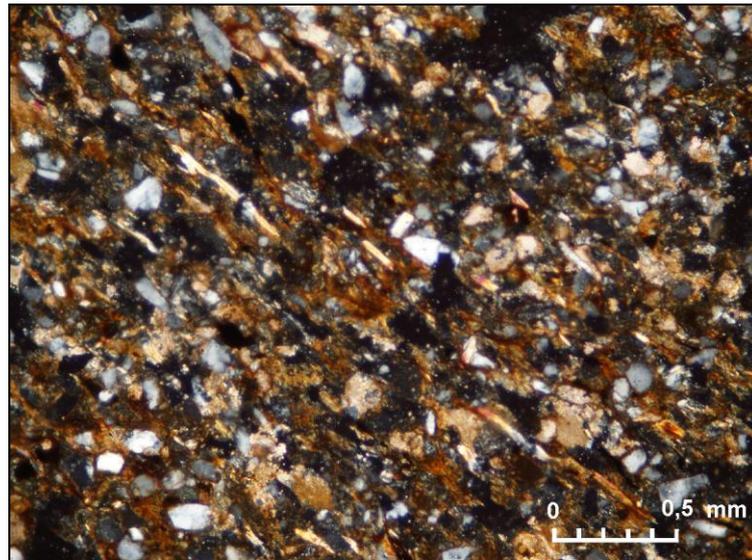


Figura 54a. Fotomicrografía de Waca Lítica. Obsérvese la orientación preferencial y la deformación dúctil que presentan las micas (moscovita, biotita y clorita), y, producto de la compactación litostática. Muestra MSB 39. Ocular 10x, objetivo 4x. Nícoles cruzados.

Cementación

El proceso de cementación es conocido como la formación de una serie de minerales autigénicos (minerales tanto de origen precipitado como reemplazado, recristalizado y alterado), por precipitación directa de las soluciones contenidas en los poros, la cual tiene lugar debido a la sobresaturación de ese fluido en ciertas sustancias (SANDOVAL, 2000). La formación de minerales de esta naturaleza es común observarla en las muestras analizadas, encontrándose cemento de minerales calcáreos, óxidos de hierro y minerales de arcilla.

El tipo de cemento más común en las muestras, está formado por minerales calcáreos, observándose como microesparita granular de pocas micras

de diámetro, rellenando poros, y espato en vetas que atraviesan las rocas. El cemento de minerales de arcilla también se observó frecuentemente de forma diseminada, como parches rellenando poros.

Disolución

Las arenitas que no han sido cementadas en una etapa diagenética precoz habitualmente muestran señales de compactación. Como la mayoría de sus granos son rígidos por lo general hay pocas evidencias de texturas y fracturas en ellos. Por tanto, excepto ligeras modificaciones con el empaquetamiento de los granos que se producen durante la diagénesis precoz, los procesos más efectivos de compactación son los procesos de disolución por presión. Este término designa a los procesos por los cuales un sedimento bajo carga litostática desarrolla fenómenos de disolución selectiva (ADAMS et. al ,1997).

El proceso de disolución es observado en las muestras estudiadas, presentándose principalmente como disolución parcial de matriz arcillosa en la mayoría de las muestras (figura 54b); también es común encontrar disolución parcial de cemento de minerales de arcilla y, en menor ocurrencia, de calcita.

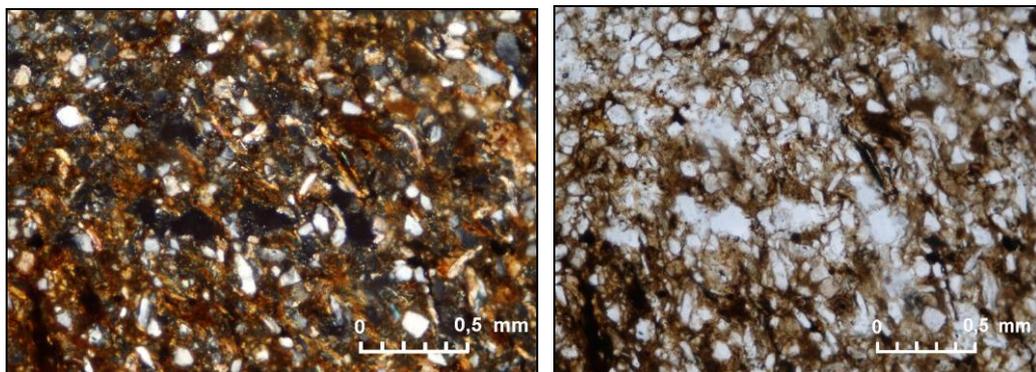


Figura 54b. Fotomicrografía de Waca Lítica. Obsérvese en la parte central, procesos de disolución de la matriz. Muestra MSB 40. Ocular 10x, objetivo 4x. A la izquierda nícoles cruzados y a la derecha nícoles paralelos.

Alteración

La alteración, también conocida como “disolución incongruente”, tiene lugar cuando ocurre una disolución selectiva del material, por lo que el mineral cambia su composición, bien sea porque solo se han disuelto partes de sus componentes o porque el mineral reacciona con iones presentes en el fluido de poro (SANDOVAL, 2000).

Este proceso fue reconocido en algunos granos de feldespato, principalmente en cristales de ortosa, los cuales pueden presentarse alterando a minerales de arcillas. También se presenta en las micas, donde se observan algunas moscovitas alterando a clorita.

Presión-Solución

El proceso de presión-solución es el principal proceso físico-químico que afecta a los sedimentos después de su depositación, y consiste en la disolución de los minerales o materiales sedimentarios por efecto del aumento de la presión litostática. Esto modifica las características originales de las areniscas, ocasionando la disminución de la porosidad y permeabilidad después que la compactación pasó el límite del fracturamiento de las partículas dúctiles (SANDOVAL, 2000).

Este proceso diagenético queda evidenciado en las muestras analizadas a través de los contactos entre los granos, entre los cuales se observó con mucha frecuencia el de tipo grano-matriz, grano-cemento y longitudinal, y, con menor ocurrencia, el cóncavo-convexo, aunque también es posible encontrar contactos tangenciales o puntuales entre los granos, de manera muy escasa. Los contactos grano-matriz y grano-cemento son típicos de etapas tempranas del proceso de presión-solución.

4.4.1.2.2. EFECTOS DIAGENÉTICOS

Diagénesis Temprana

Becerra y Gómez (1987), mencionan que la presencia de óxidos de hierro, observados en las muestras analizadas principalmente como cemento y la formación de nuevos minerales tales como glauconita, son evidencia de procesos de óxido-reducción, característicos de una diagénesis temprana.

Diagénesis Intermedia

Becerra y Gómez (1987) señalan que la precipitación de cemento en los poros con la consiguiente reducción de la porosidad primaria, la formación de sobrecrecimiento de granos de cuarzo y la deformación de micas por efectos de la presión, son características petrográficas que evidencian una diagénesis en etapa intermedia.

Las muestras estudiadas están caracterizadas mayormente por la precipitación de cemento carbonático (microesparita) en los poros, los cuales representaban porosidad primaria, y que luego son reducidos por los procesos de precipitación. El cemento formado por el sobrecrecimiento de cuarzo también es frecuente, el cual ocurre por un proceso de nucleación y engrosamiento de los granos de cuarzo.

A estas evidencias se le agrega la presencia de porosidad secundaria generada por disolución de compuestos inestables como feldespatos, la presencia de escasos fragmentos de fósiles presentando inversión heteroaxial, contactos entre los granos de tipo longitudinal y cóncavo-convexo, y la presencia de abundantes minerales de arcilla como matriz y cemento.

Diagénesis Tardía

Esta unidad se ubica al inicio de este grado diagenético, evidenciado por la marcada orientación que presentan las micas y el desarrollo de micas autigénicas, las cuales se originan por precipitación química, producto de los procesos de presión solución.

4.4.1. METAMORFISMO: UNIDAD METAÍGNEA

4.4.1.1. UNIDAD I. METAVOLCÁNICA

Las facies metamórficas son una noción fundamental de la petrología metamórfica. El concepto de facies fue definido por Eskola (1920), quien la definió como un grupo de rocas caracterizadas por conjunto definido de minerales que, bajo las condiciones de su formación, alcanzaron el equilibrio perfecto entre ellos. La composición mineral cualitativa y cuantitativa, en las rocas de una facies dada varía gradualmente en correspondencia con las variaciones en la composición química de las rocas.

La IUGS en 1990, define las facies metamórficas, siguiendo a Eskola y otros autores, como un conjunto de asociaciones minerales repetidamente asociadas en el tiempo y el espacio y que muestran una relación regular entre composición mineral y composición química global, de forma que diferentes facies metamórficas (conjunto de asociaciones minerales) se relacionan con las condiciones metamórficas, en particular temperatura y presión, aunque otras variables, como P_{H_2O} pueden ser también importantes.

La unidad Metavolcánica estudiada y analizada se encuentra ubicada en la en la facies de la prehnita-pumpellíta indicativa de metamorfismo de muy bajo

grado (figura 55 y tabla 6). Esta clasificación se determinó por la presencia de minerales de tamaño muy fino, característicos de esta facies como lo son: prehnita y clorita. La prehnita se observó como componente de la matriz, con cristales aciculares muy finos de débil pleocroismo.

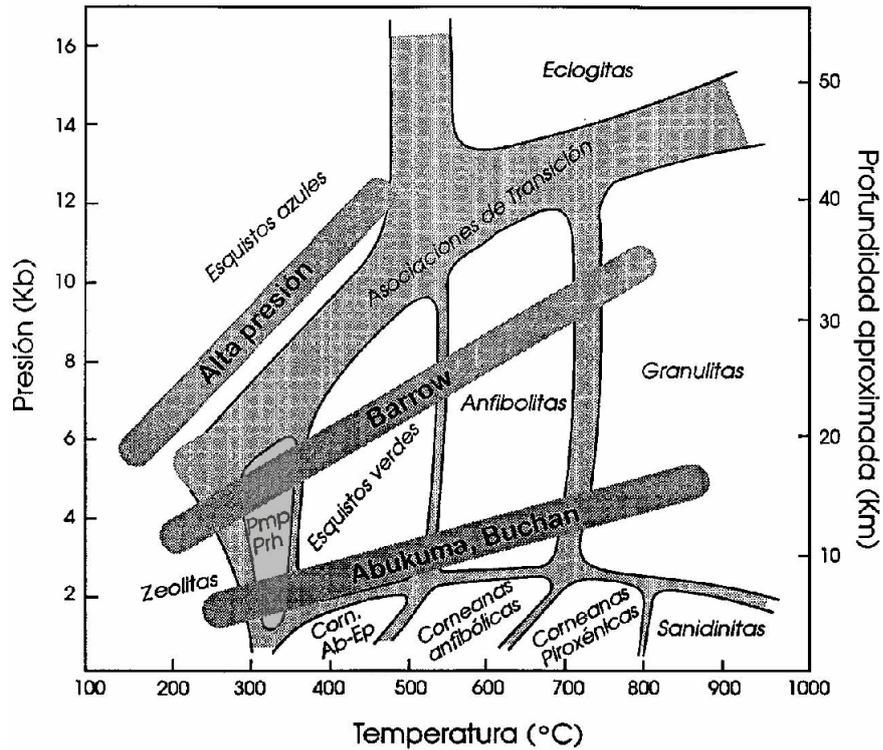


Figura 55. Esquema de la distribución general de las facies metamórficas en el espacio P-T. La zona marcada en gris representa las facies de la Unidad de rocas ígneas. (prehnita-pumpellyíta). Tomado de Yardley, 1997.

Facies	Metabasitas	Metapelitas
Prehnita-pumpellyíta	Prehnita + pumpellyíta ± clorita ± albita ± epidota ± (zona de baja temperatura) Pumpellyíta + actinolita (zona de alta temperatura) Lawsonita + albita (zona de mayor presión)	Illita/moscovita + clorita + albita + cuarzo

Tabla 6. Asociaciones minerales de la facies de la Prehnita-pumpellyíta (tomado de Yardley, 1997).

4.5. AMBIENTES DE SEDIMENTACIÓN

Aunque se tiene poca información de este bloque sedimentario, ya que probablemente se encuentra emplazado tectónicamente en un sitio muy diferente de donde se sedimentó, se puede establecer su ambiente de depositación mediante la fauna identificada. Entre los microfósiles identificados en la unidad de Calizas Bioclásticas con mayor abundancia, están las algas rojas y foraminíferos bentónicos seguidos de moluscos, corales y equinodermos.

Las algas rojas se encuentran en substratos rocosos y en substratos no consolidados. Las formas incrustantes tienen una distribución cosmopolitana respecto a la temperatura (tropical-polar), sin embargo las articuladas tienen una menor distribución latitudinal (tropical-templada). Al ser fotosintetizadoras, la intensidad de la luz es un factor significativo que controla su crecimiento y su distribución batimétrica. Se encuentran desde medio intermareales hasta unos 230 m de profundidad (MOLINA, 2002).

Los foraminíferos béticos identificados en mayor proporción son los miliólidos, los cuales son dominantes en ambiente de laguna, tolerando inclusive zonas restringidas y de altas temperaturas. Algunas formas se adhieren a las hierbas marinas y algas, y otras se incrustan en las superficies duras del suelo marino o corales (BAAMONDE, 2009).

Wilson (1975), realiza un modelo de microfacies (figura 56a), tomando en cuenta la caracterización de cambios paleográficos y estratigráficos en base a la biota o ensamblajes de esta, textura depositacional, estructuras sedimentarias, mineralogía, entre otras. Para determinar el ambiente de sedimentación en esta unidad, también se emplearon estas microfacies, tomando en cuenta principalmente la biota identificada.

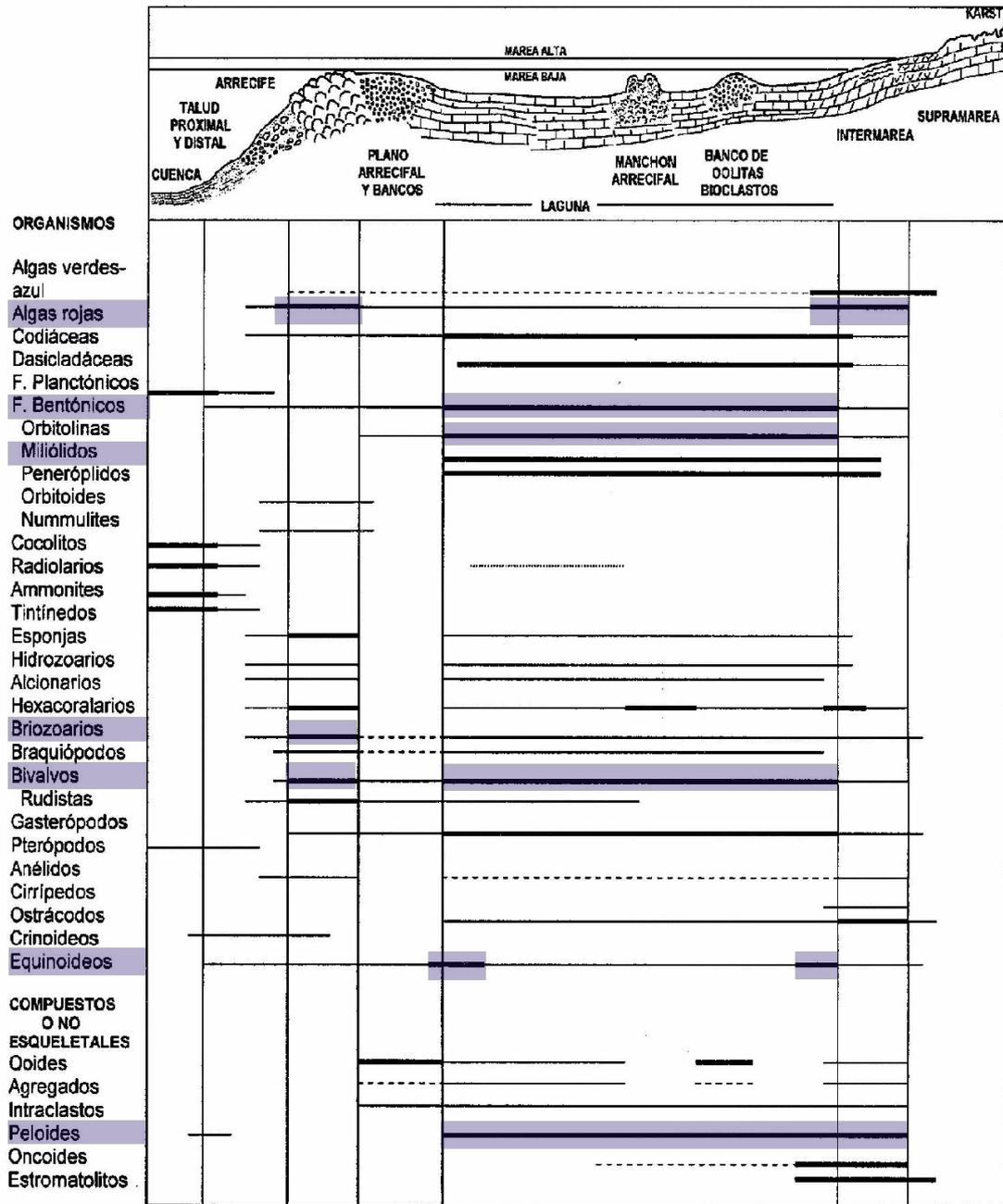
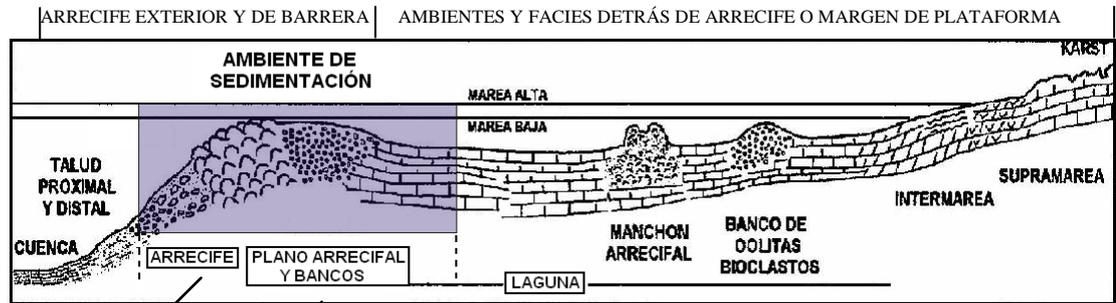


Figura 56a. Distribución de organismos y constituyentes inorgánicos en los ambientes depositacionales de un complejo de carbonatos. Resaltado en Azul se observa los microfósiles identificados en las muestras y su distribución en un complejo carbonático (tomado y modificado de BAAMONDE, 2009).

Según la clasificación de Wilson (1975), tomando en cuenta la biota identificada esencialmente, la unidad carbonática estudiada corresponde a un

ambiente marino-costero de aguas someras, en los subambientes de arrecife, plano arrecifal y parte de laguna interna (figura 56b).



ARRECIFE	PLANO ARRECIFAL	LAGUNA INTERNA
Corales	Barras,	Profundidad muy somera. Variedad de ambientes. Influencia de las mareas. Algas verdes (Codiáceas y Dasicladáceas), gasterópodos, pelecípodos, ooides, equinodermos, briozoarios, braquiópodos, foraminíferos bentónicos, ostrácodos, esponjas, calciesferas, corales (colonias pequeñas) en los manchones arrecifales, ocasionalmente algo de algas rojas, intraclastos, oncolitos, peloides, algas verde y azules y estromatolitos inframareales. Arenas y lodo calcáreo.
Algas rojas	Islas	Arenas y algo de gravas cerca de los montículos. Lodo calcáreo en zonas tranquilas de las lagunas. Bancos de bioclastos y oolitas.
Rudistas	Canales	Canales. Lagunas restringidas cerca de la costa con más salinidad y propicias a la formación de dolomita. Bioturbación importante.
Hidrozoarios	Dunas	Materia orgánica en sectores de poca circulación. Desarrollo de islas, algunas por el crecimiento de manglares. Barras de oolitas.
Equinodermos,	Facies de	Grainstone y packstone en barras, bancos y manchones.
Bloques,	oolitas	Ocasionalmente boundstone en manchones, predominio de wackestone y mudstone por el alto contenido de lodo. Porosidades: intergranular, interpartícula, móldica, hoquedad, madrigueras, refugio, crecimiento orgánico, fracturas, intercrystalina, horadación.
Gravas,	Bioclastos.	Estratificación cruzada en bancos, festones, paralela en zonas de oleaje suave. Facies con gran extensión lateral. La plataforma marina interna o laguna detrás del arrecife cuando es de profundidad somera y no hay muchas variaciones, las barras de oolita y bioclastos se mueven por la acción de las mareas y pueden originar facies muy extensas o facies con festones que se entrelazan. Capas onduladas originadas por el oleaje. La bioturbación intensa crea un desarrollo masivo nodular en las texturas de mudstone y wackestone. Dolomita relleno de los espacios de las madrigueras. Colores claros y oscuros de acuerdo al subambiente. Claros en packstone y grainstone, oscuros en wackestone y mudstone.
Arenas calcáreas.	Corales pequeños.	
Boundstone	Arenas y	
Rudstone	Gravas	
Grainstone	Grainstone	
Porosidades:	Packstone	
Intrapartícula	Porosidades:	
Intergranular	Intergranular,	
Orgánica	Móldica,	
Framestone	Hoquedad	
Bindstone	Estratificac.	
Masivo con cavidades	cruzada	
Estromatactis	en barras y	
Horadación	eolianitas	
Alcionarios	Festones	
Braquiópodo	Bioclastos	
Crinoideos	redondeados	
Color claro.	por oleaje	
	Color claro.	

Figura 56b. Subambientes más importantes en un sistema de plataforma con un arrecife en el margen. Las características generales están relacionadas con las texturas depositacionales (tipos de rocas), estructuras sedimentarias, biota más importante y común, porosidades, color característico de los sedimentos, entre otros. (Tomado y modificado de BAAMONDE, 2009).

Este bloque sedimentario depositado en un ambiente de arrecife de barrera y detrás de arrecife o margen de plataforma, en los subambientes antes mencionados, en conjunto con las otras unidades informales definidas en este trabajo, es muy posible que se depositaran en una cuenca encontrada sobre una zona volcánica, evidenciado principalmente por la unidad de Areniscas Líticas Volcánicas, la cual presenta una fuerte influencia clástica de origen volcánica, con fragmentos líticos redondeados de volcanitas poligenéticas, lo que demuestra la formación de rocas ígneas generadas por erupciones volcánicas, cercanas a la cuenca sedimentaria.

La unidad de Wacas Líticas también presentan influencia de clastos volcánicos, como fragmentos de rocas volcánicas y cuarzos plutónicos, observados en menor proporción que la unidad de Areniscas Líticas, al igual que la unidad de Calizas Bioclásticas, pero en esta caso con cuarzos plutónicos observados de manera muy escasa. Estos fragmentos volcánicos presentes en estas unidades, también evidencian el aporte clástico de rocas ígneas, formadas en erupciones volcánicas en zonas cercanas a la cuenca sedimentaria.

Esta zona volcánica corresponde muy posiblemente a un arco de isla volcánico insular, donde la depositación de la secuencia sedimentaria se llevo a cabo en una cuenca *fore arc*. Actualmente se pueden observar en el Caribe arcos de isla volcánicos insulares donde son muy frecuentes los bancos de arrecifes, generados en una cuenca *fore arc*, lo que evidencia que la sedimentación de las unidades sedimentarias definidas en este trabajo tuvieron un origen similar.

4.6. ANÁLISIS QUÍMICOS

4.6.1. FUNDAMENTOS DE RAYOS X

Los rayos X son una radiación electromagnética de una longitud de onda corta, producida por el frenado de electrones de elevada energía y/o por transiciones electrónicas de electrones que se encuentran en los orbitales internos de los átomos. El intervalo de longitudes de onda de los rayos X comprende desde aproximadamente 10^{-5} Å hasta 100 Å (SKOOG, et. al, 2001).

Cuando se trata de fines analíticos, los rayos X se obtienen de cuatro maneras: (1) por bombardeo de un blanco metálico con una haz de electrones de elevada energía, (2) por exposición de una sustancia a un haz secundario de fluorescencia de rayos X, (3) utilizando una fuente radiactiva cuyo proceso de desintegración da lugar a una emisión de rayos X^2 , y (4) a partir de una fuente de radiación sincrotrón (SKOOG, et. al, 2001).

Los métodos de análisis que emplean rayos X son tres:

- Absorción de rayos X
- Difracción de rayos X
- Fluorescencia de rayos X (empleado en este trabajo)

Fluorescencia de rayos X por dispersión de energía

La espectrometría o fluorescencia de rayos X es actualmente la técnica analítica más ampliamente usada en la determinación de elementos mayoritarios y traza en muestras de rocas. Constituye una herramienta muy versátil que permite

analizar más de 80 elementos bajo un amplio rango de sensibilidades, detectando concentraciones desde 100 % hasta pocas partes por millón (ppm). Consiste de un método rápido que puede llevar a cabo una gran cantidad de mediciones precisas, utilizando un espacio de tiempo relativamente corto. Sin embargo, la principal limitación de este método es que los elementos más livianos que el Na (número atómico 11), son de difícil detección (SKOOG, et. al, 2001).

Cuando un material es irradiado por un rayo proveniente de un tubo emisor de rayos x, sus átomos constituyentes son excitados y producen una emisión secundaria de rayos x denominada fluorescencia. Cada elemento en la muestra emite su propia, única y característica radiación fluorescente, con una intensidad directamente proporcional a la concentración del elemento en el material (MARTÍNEZ & CAMPOSANO, 2002).

La radiación secundaria emitida por una muestra puede ser analizada de dos formas: por longitud de onda, caso en el cual los elementos son identificados por sus longitudes de onda características y por las concentraciones calculadas a partir de la intensidad de sus líneas; o por dispersión de energía (MARTÍNEZ & CAMPOSANO, 2002).

4.6.2. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS QUÍMICOS

El análisis de los datos de los datos químicos de las muestras esencialmente se traduce en la presentación, ilustración y cuantificación de las características esenciales, su tendencia central, dispersión, correlación interna y su distribución espacial. Esta información puede ser representada en una gran variedad de formas, entre las cuales se mencionan a continuación:

Media de la población (μ). La medida de la población o media límite, de un conjunto de replicados.

Donde x_i representa el valor de la i -ésima medida. Como indica esta ecuación, la medida de un conjunto de medidas se aproxima a la medida de la población cuando N , el número de medidas, tiende a infinito. Es importante añadir que en ausencia de sesgo, μ es el valor verdadero de la cantidad medida (SKOOG, et. al, 2001).

$$\mu = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=0}^N x_i}{N}$$

Desviación estándar de la población (σ) y varianza de la población (σ^2). La desviación estándar de una población y la varianza de la población proporcionan medidas estadísticamente significativas de la precisión de los datos de una población. La desviación estándar de la población viene dada por la ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=0}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

Donde x_i representa, de nuevo, el valor de la i -ésima medida. Obsérvese que la desviación estándar de la población es la raíz cuadrada media de las desviaciones individuales respecto de la medida, para la población (SKOOG, et. al, 2001).

Media de la muestra (\bar{x}). La media de la muestra es la media o promedio de un conjunto finito de datos. Como N , en este caso, es un número finito, \bar{x} difiere, con frecuencia, de la medida de la población μ , y, como consecuencia, difiere del verdadero valor de la cantidad medida. El uso de un símbolo diferente para la media de la muestra enfatiza esta importante distinción (SKOOG, et. al, 2001).

4.6.3. CÁLCULOS PARA OBTENER LA CONCENTRACIÓN DEL CaCO_3 (P/P)

Para calcular la concentración del CaCO_3 a partir del CaO , se utilizaron dos procedimientos:

- Mediante un factor multiplicador que resulta de la adición del PM (peso molecular) de la fórmula necesaria (CaCO_3) / PM y de la fórmula original (CaO).

$$\frac{\text{PM} (\text{CaCO}_3)}{\text{PM} (\text{CaO})} = 1,784$$

Con el valor del factor de relación (1,784), se multiplica por la concentración de CaO previamente obtenido del análisis de fluorescencia de rayos X, se obtiene la concentración del CaCO_3 (p/p).

- A partir del valor del dióxido de carbono (CO_2). En rocas muy carbonáticas la mayor parte del calcio se encuentra asociado al CaCO_3 , de manera que a partir del porcentaje de CO_2 asociado al CaO , se puede calcular la concentración de CaCO_3 . El CO_2 se determinó por medio de la siguiente ecuación (GONZÁLEZ & SÁNCHEZ, 2001):

$$\% \text{CO}_2 = \frac{\% \text{CaO} * \text{PM CO}_2}{\text{PM CaO}}$$

Sabiendo que la ecuación estequiométrica es:



Hay que mencionar que esta segunda manera de calcular el porcentaje de calcita, se realizó para corroborar los porcentajes calculados en el primer caso, que fue por el factor multiplicador.

Ejemplo

Muestra #	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)
MSB 11	0,51	0,68	1,55	0,47	53,62

- Factor Multiplicador:

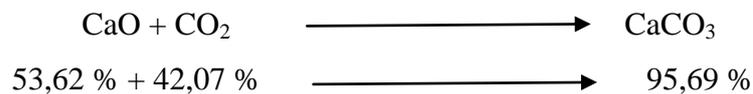
$$\frac{\text{PM (CaCO}_3\text{)}}{\text{PM (CaO)}} = \frac{40,07 + 12 + (16*3)}{40,07 + 16} = 1,784$$

$$\% \text{ CaO} * 1,784 = 53,62 * 1,784 = 95,60 \% \text{ CaCO}_3$$

- A partir del dióxido de carbono (CO₂):

$$\% \text{ CO}_2 = \frac{\% \text{ CaO} * \text{PM CO}_2}{\text{PM CaO}} = \frac{53,62 \% * (12 + 16*2)}{40,07 + 16} = 42,07 \%$$

Por estequiometría:



Mediante los dos procedimientos la concentración de CaCO₃ resulta de manera muy similar con una variación mínima del 0,094 %, lo que verifica que para cualquiera de los dos casos el resultado es confiable.

4.6.4. ANÁLISIS QUÍMICOS DE MUESTRAS COLECTADAS EN CAMPO

Los análisis químicos fueron realizados únicamente en las unidades sedimentarias, mayormente en las rocas carbonáticas presentes en la subunidad de Calizas Puras, y en menor cantidad en el resto de las unidades y subunidades.

Estos análisis se efectuaron con el fin de determinar la composición química mayoritaria, la variación química que puedan presentar y la relación de los resultados con los obtenidos a través de los análisis petrográficos.

4.6.4.1. UNIDAD I. CALIZAS BIOCLÁSTICAS

4.6.4.1.1. SUBUNIDAD DE CALIZAS PURAS

Mediante la técnica de fluorescencia de rayos X, se analizaron un total de 26 muestras correspondientes a esta subunidad, de las cuales se tomaron 22 muestras del frente de explotación y el resto en afloramientos dispersos ubicados al centro-oeste de la cantera. Estos resultados arrojaron concentraciones en porcentaje (%) de los elementos mayoritarios SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, y CaO. De norte a sur se presentan los resultados químicos obtenidos en el frente de explotación (tabla 7), seguido de los resultados obtenidos en otros afloramientos, ubicados al oeste de la cantera (tabla 8).

Frente de Explotación								
	Nivel	Muestra #	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	CaCO ₃ (%)
S	200	MSB 11	0,51	0,68	1,55	0,47	53,62	95,60
	200	MSB 19 *	0,53	0,52	1,26	0,58	53,65	95,65
	200	MSB 12	0,45	0,64	1,33	0,58	53,31	95,05
	200	MSB 13	0,73	0,97	2,85	0,89	51,51	91,84
	200	MSB 36	0,41	0,6	0,86	0,45	54,07	96,40
	220	MSB 37	0,35	0,36	0,29	0,15	54,74	97,60
	230	MSB 3 *	0,49	0,22	0,58	0,15	54,43	97,04
	200	MSB 14	1,04	1,18	4,17	0,94	50,62	90,25
	200	MSB 15 *	0,71	0,77	2,86	0,75	52,04	92,78
	220	MSB 38	0,4	0,38	0,32	0,13	54,95	97,97
	220	MSB 10	0,36	0,2	0,24	0,14	54,74	97,60
	220	MSB 10' *	0,44	0,52	1,98	0,65	53,58	95,53
	220	MSB 34	0,45	0,47	1,65	0,56	53,23	94,90
	180	MSB 21 *	0,35	0,61	0,86	0,96	49,52	88,29
	200	MSB 20	0,38	0,35	0,54	0,35	53,81	95,94

	Nivel	Muestra #	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	CaCO ₃ (%)
	220	MSB 7	0,44	0,47	1,87	0,26	53,64	95,64
	200	MSB B1	0,65	0,59	1,18	0,15	54,07	96,40
	220	MSB 47	0,34	0,26	0,21	0,26	54,31	96,83
	210	MSB B2 *	1,73	2,49	10,3	0,98	44,62	79,55
	190	MSB 17'	0,31	0,05	0,53	0,38	53,48	95,35
	210	MSB 35 *	0,38	0,38	1,01	0,35	52,99	94,48
N	190	MSB 17 *	0,29	0,22	0,28	0,45	53,64	95,64

Tabla 7. Resultados químicos obtenidos en el frente de explotación con su ubicación general. Las muestras con el símbolo *, fueron analizadas mediante estudios petrográficos.

Otros Afloramientos							
Nivel	Muestra #	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	CaCO ₃ (%)
180	MSB G1 *	0,19	0,11	0,16	0,12	55,89	99,65
180	MSB G2 *	0,17	0,13	0,12	0,09	55,76	99,42
180	MSB G3 *	0,12	0,06	0,11	0,13	55,21	98,43
180	MSB G4 *	0,19	0,11	0,16	0,15	55,89	99,65

Tabla 8. Resultados químicos obtenidos en otros afloramientos ubicados al oeste de la cantera. Las muestras con el símbolo *, fueron analizadas mediante estudios petrográficos.

	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	CaCO ₃ (%)
Media	0,47	0,51	1,43	0,42	53,35	95,13
Desviación Estándar	0,32	0,49	2,0	0,29	2,33	4,15

Tabla 9. Análisis estadístico (media y desviación estándar), de los ensayos químicos realizados en la subunidad de Caliza Puras.

Los resultados químicos obtenidos tanto en el frente de explotación como en otros afloramientos, evidencian el alto grado de pureza de esta unidad de calizas, las cuales llegan a tener altas concentraciones de CaCO₃ limitadas entre un rango de 88% a 99,7%, con un promedio de 95,13% (tabla 9). Los resultados obtenidos se representan en la figura 57, donde se observa la variación del CaCO₃, con respecto su ubicación.

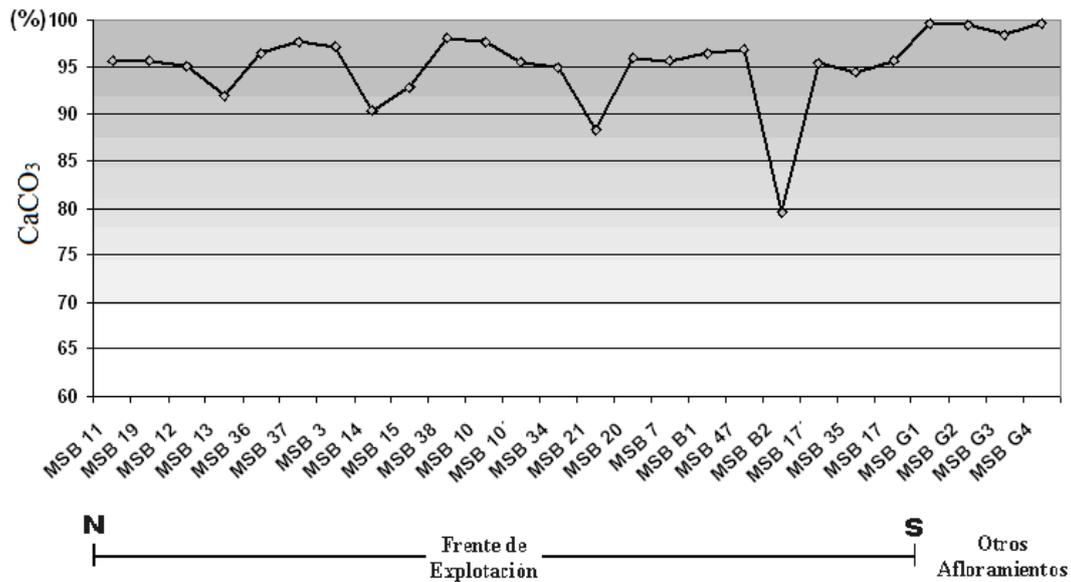


Figura 57. Variación del CaCO₃ con respecto a su ubicación en la cantera.

Hacia el frente de explotación las concentraciones de CaCO₃ varían mayormente entre 88,15 % a 97,64 %, siendo valores muy altos, con excepción de la muestra MSB B2 ubicada al sur, presentándose con concentraciones de 79,51 %, lo cual no representa una variación significativa. La variación del CaCO₃ con respecto a la ubicación de las muestras, se observa de manera uniforme con mayores variaciones hacia el sur, presentadas por la muestras MSB B2 y MSB 21. Hacia la zona centro-oeste de la cantera, donde se ubican los afloramientos dispersos, las concentraciones son muy altas y uniformes, con concentraciones promedio de 99,61 % de CaCO₃.

Tanto los análisis químicos como los petrográficos, demuestran la alta pureza de esta subunidad, donde la principal concentración es de CaCO₃ representada por los componentes aloquímicos y ortoquímicos observados en las petrografías.

En cuanto a los constituyentes restantes obtenidos en los análisis químicos, las mayores concentraciones están representadas por el SiO₂ (0,11 – 10,3 %), seguido del Al₂O₃ (0,11 – 2,49 %), Fe₂O₃ (0,12 – 1,73) y MgO (0,12 – 0,98 %).

Estos óxidos representan esencialmente las impurezas encontradas en esta subunidad. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 58, tomando en cuentas las concentraciones de los óxidos con respecto a su ubicación.

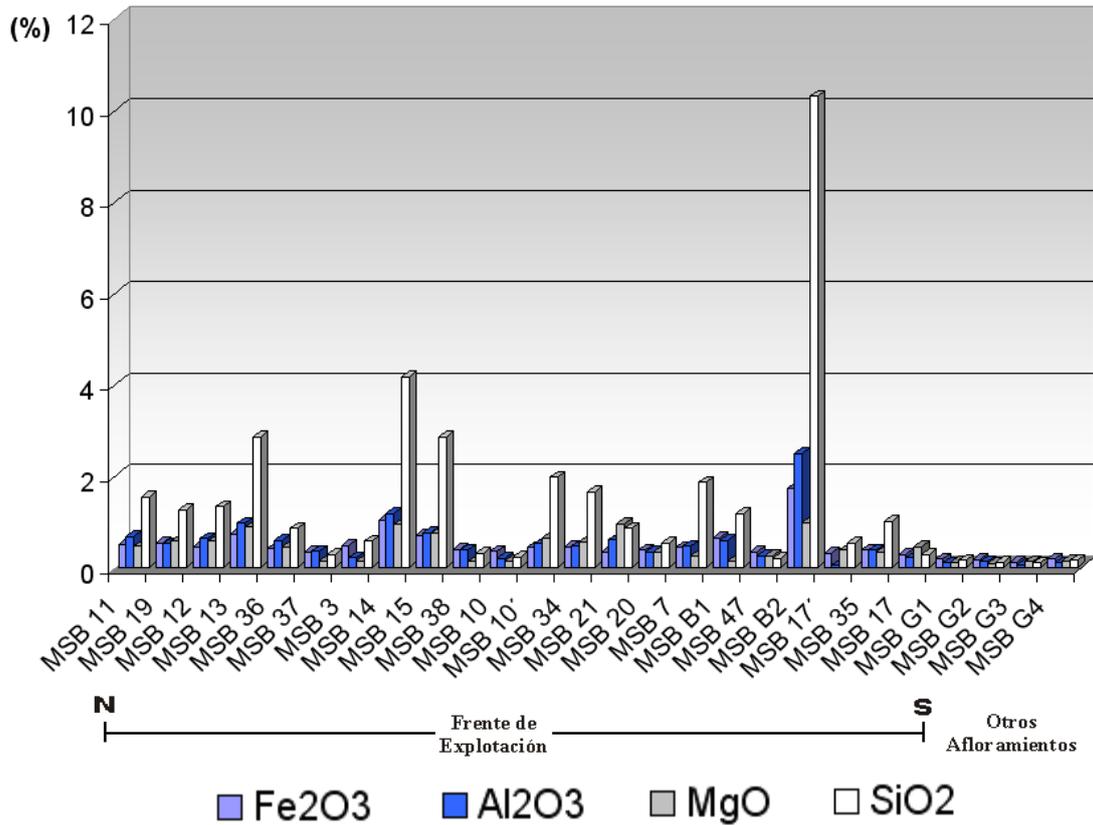


Figura 58. Concentraciones en porcentajes del SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y MgO, con su ubicación general en la cantera.

Hacia el frente de explotación se presentan las mayores concentraciones de estos óxidos, observadas en las muestras MSB 13, MSB 14, MSB 15, MSB B2 y MSB 21, teniendo concentraciones máximas que no pasan del 15 %. Las mayores concentraciones de estos elementos, la presenta fundamentalmente el SiO₂, con valores promedios de 1,73 %, y variaciones leves al centro-sur donde se llegan a observar los valores máximos, seguido de Al₂O₃ con valores promedios de 0,51 %, Fe₂O₃ 0,47 % y MgO 0,42 %. Estos tres últimos óxidos se presentan esencialmente de manera uniforme.

El SiO₂ presente en los análisis petrográficos, se encuentra asociado a cristales de cuarzo plutónico y fragmentos chert, mientras que el Al₂O₃ y Fe₂O₃ se presentan como óxidos y escasos minerales accesorios. El MgO se presenta con muy baja concentración, posiblemente encontrándose asociado a cristales de dolomita en los componentes ortoquímicos, los cuales no se observaron en las petrografías.

Es de notar que la muestra MSB B2 ubicada al sur del frente de explotación, representa la muestra con mayores concentraciones de impurezas, mientras que la muestra MSB 14 no presenta variaciones altas en los óxidos (<1%), pero la concentración del CaCO₃ es de 88,01 %, por lo que se asume que el porcentaje faltante puede estar dado esencialmente por materia orgánica, siendo la muestra con mayor cantidad de este componente.

4.6.4.1.1. SUBUNIDAD DE CALIZAS SUCIAS

Se realizaron análisis químicos a 3 muestras de esta subunidad, colectadas en los niveles 180, 190 y 200. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la tabla 10.

Nivel	Muestra #	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	CaCO ₃ (%)
200	MSB 16*	3,49	6,32	27,42	0,15	30,78	54,88
190	MSB 48	5,42	7,54	22,32	0,10	26,45	47,16
180	MSB 22*	4,95	8,38	25,52	0,25	28,15	48,19

Tabla 10. Resultados químicos obtenidos en la subunidad de Calizas Sucias. Las muestras con el símbolo *, fueron analizadas mediante estudios petrográficos

Estos resultados evidencian que esta subunidad se encuentra caracterizada por carbonatos de mezcla, donde la concentración mayoritaria es de CaCO₃, (52%

de promedio), con impurezas que llegan a tener un porcentaje promedio de 45 %, constituidas mayormente por SiO₂, seguido de Al₂O₃, Fe₂O₃, y MgO.

La concentración de CaCO₃ está representada en las petrografías por los componentes aloquímicos y ortoquímicos, cuyo promedio es muy similar al obtenido en los ensayos químicos (45 – 55%). Mientras que el SiO₂ se encuentra asociado mayormente a cristales de cuarzo plutónico y fragmentos chert, y en menor proporción a cristales de turmalina ((Na,Ca)(Al,Fe,Li)(Al,Mg,Mn)₆(BO₃)₃(Si₆O₁₈).(OH,F)₄), los cuales también están asociados al Al₂O₃ y Fe₂O₃, al igual que los óxidos presentes. El MgO se presenta de manera escasa como cristales recristalizados de dolomita de tamaños medios a grueso, observándose mayormente como procesos de reemplazo en fragmentos fósiles.

4.6.4.2. UNIDAD II. WACAS LÍTICAS

Se analizaron químicamente 3 muestras colectadas en la parte central de los niveles 220 y 230. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 11.

Nivel	Muestra #	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	CaCO ₃ (%)
230	MSB 6*	8,09	8,75	54,34	0,64	13,17	23,48
220	MSB 39*	8,42	16,91	60,44	0,55	9,35	16,68
220	MSN 40*	7,32	8,45	52,36	0,25	8,13	14,49

Tabla 11. Resultados químicos obtenidos en la unidad de Wacas Líticas. Las muestras con el símbolo*, fueron analizadas mediante estudios petrográficos

El elemento mayoritario es el SiO₂ con promedio de 57,37 %, evidenciando que la roca está constituida esencialmente por silisiclastos. Entre los otros componentes con menores concentraciones, se tienen el CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ y MgO, los cuales llegan a tener un promedio de 30 % en total, donde los tres primeros tienen concentraciones mucho mayores que el último componente.

El SiO₂ se encuentra mayormente asociado en las muestras petrográficas a cristales de cuarzo plutónico, micas, fragmentos de rocas volcánicas y chert. El CaCO₃ se presenta en mayor proporción como cemento y matriz, y en escasos fragmentos fósiles, mientras que el Al₂O₃ y Fe₂O₃ se asocia a fragmentos de rocas volcánicas, micas y óxidos.

4.6.4.2. UNIDAD III. ARENISCA LÍTICA VOLCÁNICA

Se realizaron 3 ensayos químicos correspondientes a esta unidad, con muestras colectadas en los niveles 190 y 210 (tabla 12).

Nivel	Muestra #	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	CaCO ₃ (%)
210	MSB 44*	10,15	20,48	64,35	0,13	1,98	3,53
190	MSB B4*	12,16	22,93	59,95	0,15	2,92	5,20
190	MSB B5*	10,69	23,48	60,57	0,11	1,92	3,42

Tabla 12. Resultados químicos obtenidos en la unidad de Areniscas Líticas Volcánicas. Las muestras con el símbolo *, fueron analizadas mediante estudios petrográficos

Los resultados obtenidos indican que la unidad está representada por una roca mayormente aluminio-siliciclástica con concentraciones menores de Fe₂O₃, seguida de CaO y MgO, donde estas dos últimas presentan concentraciones muy bajas.

Las altas concentraciones de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ están asociadas principalmente a los fragmentos líticos volcánicos y a la matriz limo-arcillosa, y en menor proporción a cristales de cuarzo (SiO₂), micas (SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃) y óxidos (Al₂O₃ y Fe₂O₃). Las bajas concentraciones de CaO y MgO indican la escasa presencia de materiales carbonáticos o dolomíticos (calcita o dolomita).

4.6.5. ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS SONDEOS EXPLORATORIOS

Con el objeto de conocer las características litológicas, estructurales y químicas de la caliza a profundidad, y tener un concepto del volumen de las reservas geológicas, en el año 1998, se ejecutó un programa de perforación con mecha de diamante, bajo la dirección del geólogo Manuel Erminy, que abarcó el área total de la cantera. El programa se fundamentó en una malla de 50 x 50 metros para distribuir 18 sondeos (tabla 13 y figura 59), que alcanzaron distintas profundidades y que sumaron 1.424 metros de perforación (ver anexo 10).

PERFORACIÓN	NORTE	ESTE	PROFUNDIDAD (m)
PSB-01	1.121.108,48	747.798,78	35,65
PSB-02	1.121.137,95	747.757,86	65,00
PSB-03	1.121.052,80	747.702,43	118,20
PSB-04	1.121.165,17	747.716,83	100,70
PSB-05	1.121.074,24	747.671,53	121,05
PSB-06	1.121.038,36	747.648,01	120,25
PSB-07	1.121.004,27	747.688,63	60,05
PSB-08	1.120.927,25	747.777,78	85,80
PSB-09	1.121.206,80	747.746,46	72,15
PSB-10	1.121.154,51	747.811,69	20,30
PSB-11	1.121.216,10	747.791,44	19,95
PSB-12	1.121.210,92	747.521,88	115,00
PSB-13	1.121.270,84	747.603,49	26,50
PSB-14	1.121.298,22	747.480,42	108,90
PSB-15	1.121.253,69	747.552,75	50,90
PSB-16	1.121.153,07	747.502,37	84,45
PSB-17	1.121.202,12	747.709,52	99,70
PSB-18	1.121.090,50	747.621,56	118,00

Tabla 13. Ubicación y profundidad de los sondeos de perforación realizados en el año 1998.

Varias perforaciones atravesaron la secuencia entera del yacimiento de caliza y algunas llegaron al basamento volcánico (tope de roca). También unas pocas no cortaron material calcáreo, pero permitieron delimitar la geometría del yacimiento.

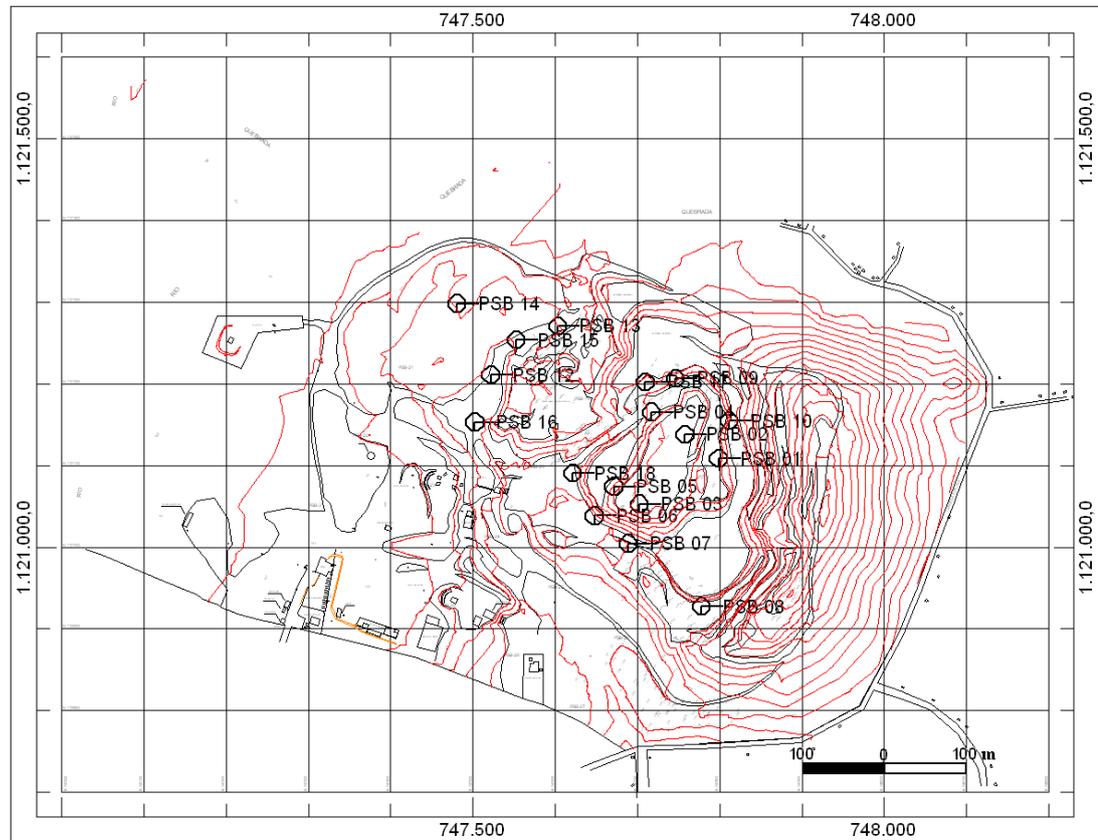
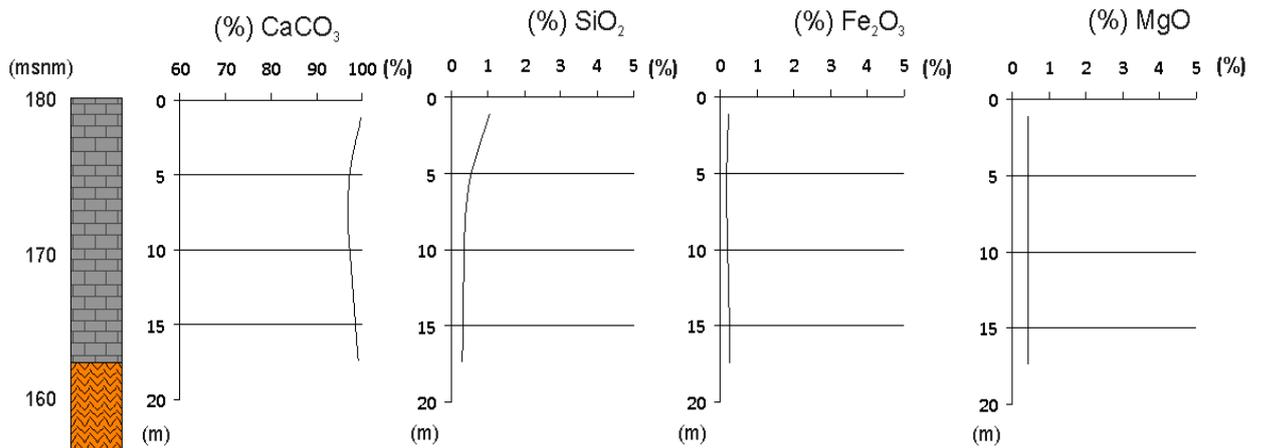


Figura 59. Mapa topográfico del área de estudio con la ubicación de las perforaciones realizadas en la campaña exploratorio del año 1998.

Posteriormente como parte del programa de reconocimiento geológico de este depósito, durante el año 2007, se ejecutó otra campaña de exploración al suroeste y noroeste de la cantera, de 14 perforaciones con mechas de diamante, con un mallado de 100 x 100, totalizando 947 metros. Los análisis químicos de estas perforaciones se están realizando actualmente, por lo que para el momento de la redacción de este trabajo no se tiene esta información.

Por otra parte los análisis químicos realizados en la primera campaña de sondeos efectuada en el año 1998 (ver anexos 7-10), se representan a continuación en perfiles químicos, donde se observa la litología descrita en el informe realizado por el geólogo Manuel Erminy y la variación de los componentes químicos mayoritarios con respecto a la profundidad.

Pozo:	PSB-01	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.108,48	747.798,78	180,03
Perforación N° :	1	
Profundidad:	23,33	



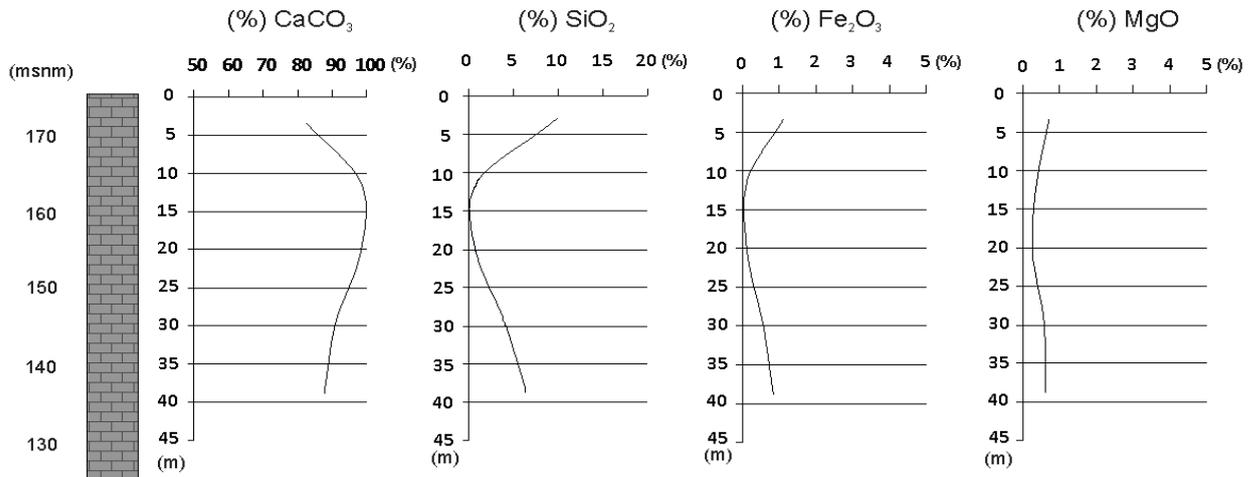
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	98,55	0,59	0,22	0,42	0,13	0,02
Desviación Estándar	1,47	0,39	0,05	0,01	0,07	0,01

Figura 60. Columna litológica del pozo PSB 1 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

Los primeros 15,68 m. de esta perforación están caracterizados por un material carbonático de alta pureza, muy homogéneo, con promedio de 95,55 % de CaCO₃. Las impurezas se mantienen constantes, con valores que no pasan del 5 %.

Según la descripción realizada en el informe final de la campaña del año 1.998, a partir de los 15,68 m. de profundidad, se presenta un material oscuro no calcáreo, posiblemente una toba volcánica, del cual no se realizaron ensayos químicos.

Pozo:	PSB-02	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.137,95	747.757,86	175,05
Perforación N° :	2	
Profundidad:	49,51	

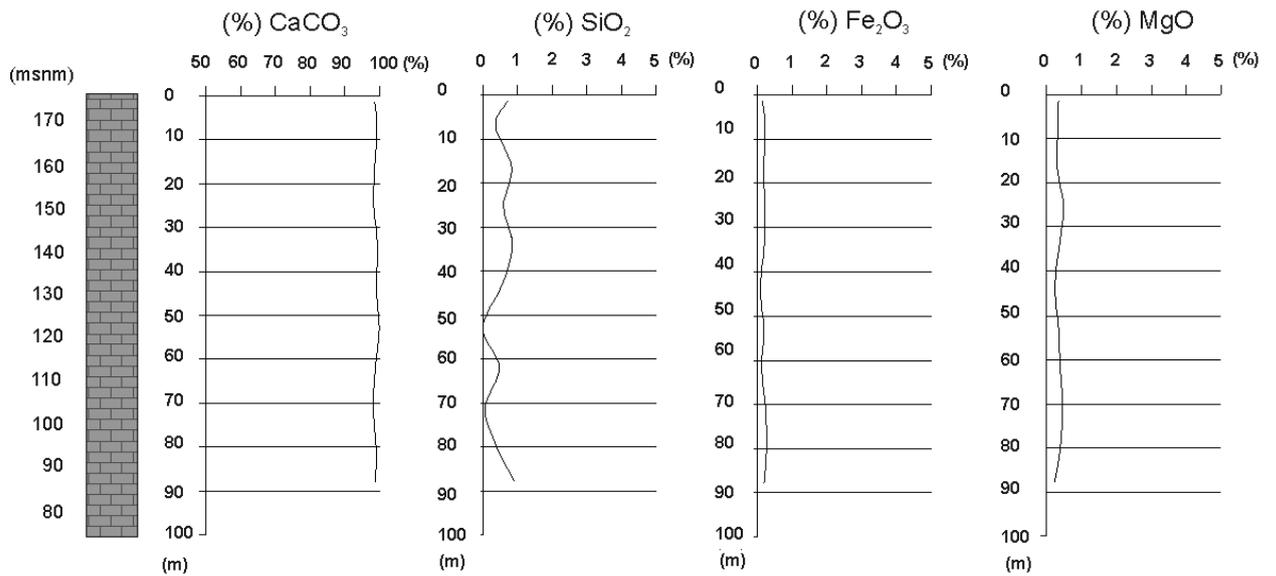


	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	91,89	4,05	0,55	0,52	1,15	0,12
Desviación Estándar	7,16	3,95	0,43	0,18	0,96	0,10

Figura 61. Columna litológica del pozo PSB 2 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

En los primeros 10 m. de esta perforación se observa un material carbonático con promedio de CaCO₃ de 85,12 %, y presencia de impurezas mayormente siliciclásticas. A partir de esta profundidad se observa una caliza muy homogénea, con alto grado de pureza con promedio de 95,15 %, hasta los 25 metros, donde luego el CaCO₃ tiende a bajar su concentración (80 %), mientras que los otros elementos presentan un leve incremento (< 10%), sin ser una variación significativa. El espesor total del material carbonático es de 49,51 metros.

Pozo:	PSB-03	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.052,8	74.7702,43	175,0
Perforación N° :	3	
Profundidad:	90,53	

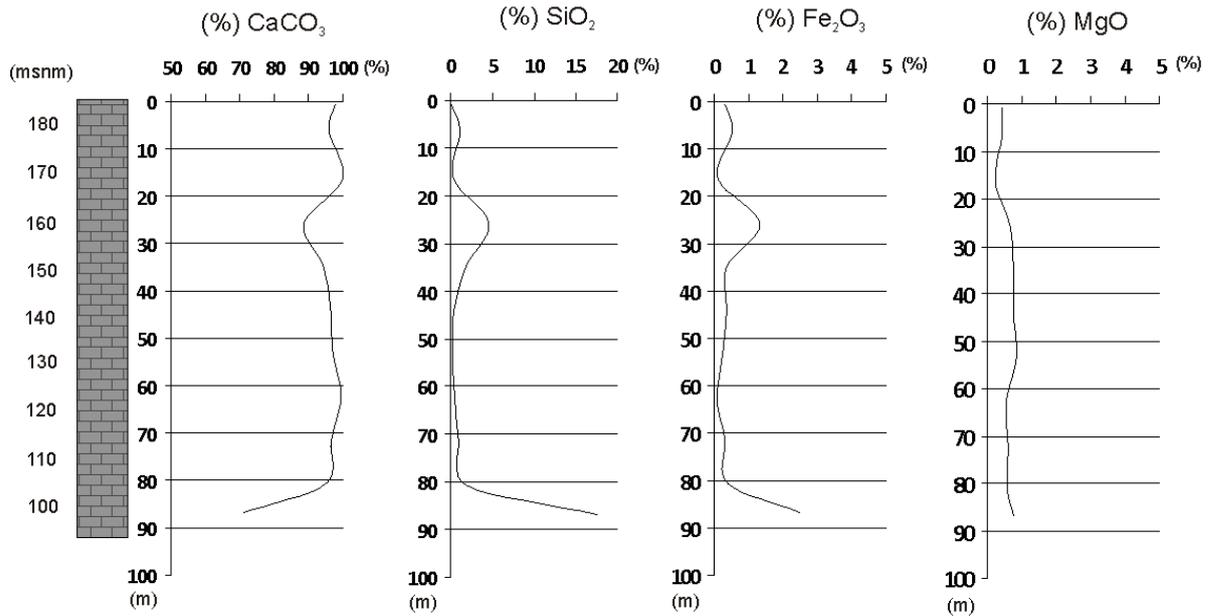


	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	98,75	0,52	0,20	0,35	0,17	0,02
Desviación Estándar	0,56	0,30	0,05	0,08	0,09	0,01

Figura 62. Columna litológica del pozo PSB 3 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

La perforación PSB 3 se caracteriza por tener una material carbonático muy homogéneo, de alta pureza con concentraciones entre 98,55 – 99,67 % de CaCO₃, observándose desde el comienzo de la perforación hasta el final, con un espesor de 90,53 m. Las impurezas se presentan menores al 3 % del total, con mayor concentración de SiO₂, el cual no sobrepasa del 1 %.

Pozo:	PSB-04	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.165,17	747.716,83	184,0
Perforación N° :	4	
Profundidad:	92,4	

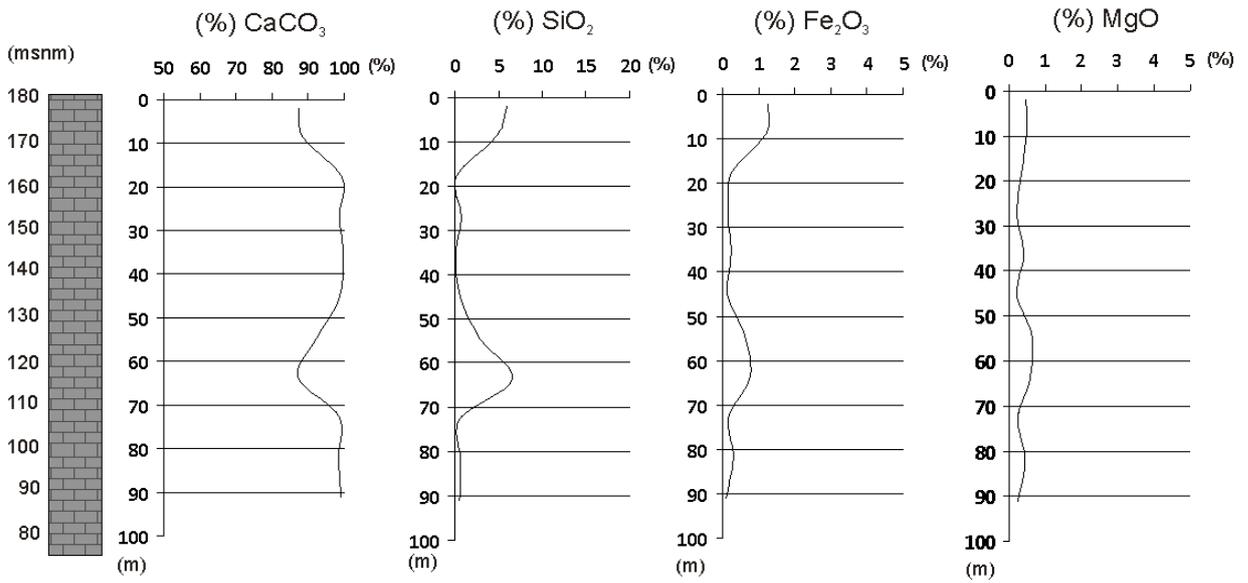


	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	93,73	2,66	0,59	0,60	0,78	0,07
Desviación Estándar	8,18	5,10	0,70	0,18	1,04	0,07

Figura 63. Columna litológica del pozo PSB 4 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

Desde el inicio de esta perforación hasta los 80 m, se presenta un material carbonático muy homogéneo de alta pureza, con un promedio de 96,02 % de CaCO₃, y presencia de impurezas constituidas mayormente por SiO₂ y Fe₂O₃ menores al 5 %. Posterior a los 80 m de profundidad hasta el final de la perforación, se observa una tendencia negativa, donde la concentración de CaCO₃ tiende a bajar llegando a 70,45 %, mientras que los otros elementos presentan un aumento, observado principalmente en el SiO₂ que llega hasta 18,95 %. El espesor total del material carbonático es de 92,44 m.

Pozo:	PSB-05	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.074,24	747.671,53	180,0
Perforación N° :	5	
Profundidad:	104,75	

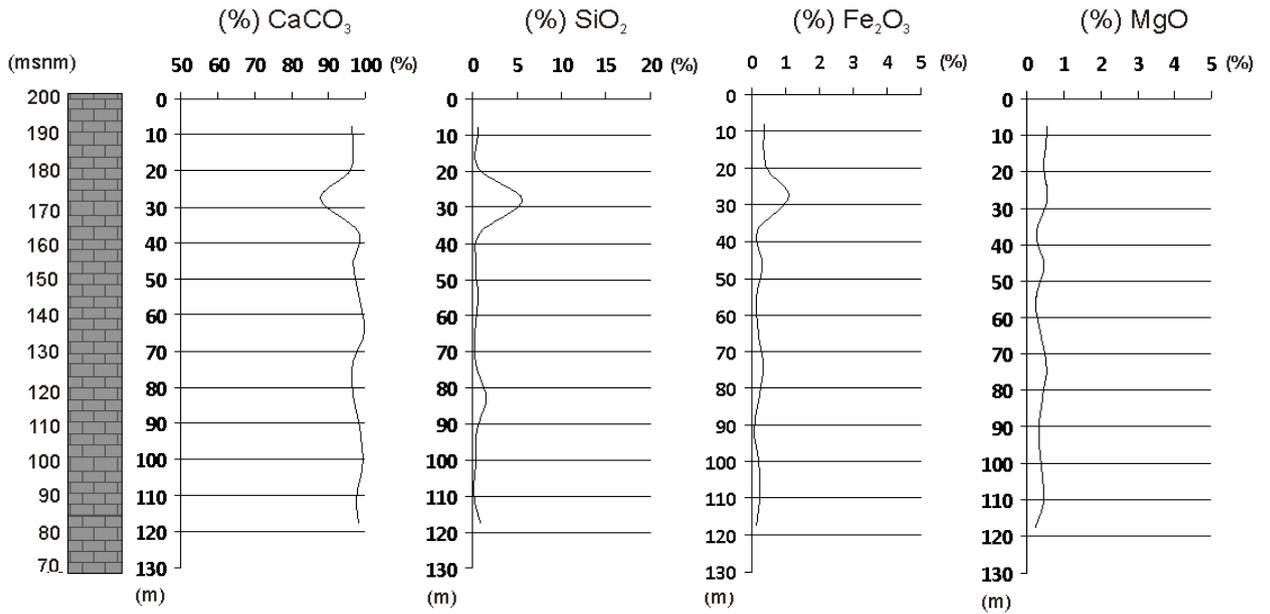


	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	95,53	2,03	0,45	0,39	0,60	0,04
Desviación Estándar	5,09	2,38	0,41	0,15	0,77	0,05

Figura 64. Columna litológica del pozo PSB 5 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

Esta perforación está caracterizada por un material carbonático homogéneo con espesor de 104,75 m, el cual presenta un alto grado de pureza con promedio de 95,53 % de CaCO₃. Se presentan algunas variaciones observadas en los primeros 10 m y en los metros 50 – 70, donde el CaCO₃ llega a tener un promedio 85,15 %, y las impurezas de 15,75 % en total, representada mayormente por el SiO₂ y Fe₂O₃.

Pozo:	PSB-06	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.038,36	747.648,01	197,7
Perforación N° :	6	
Profundidad:	121,85	

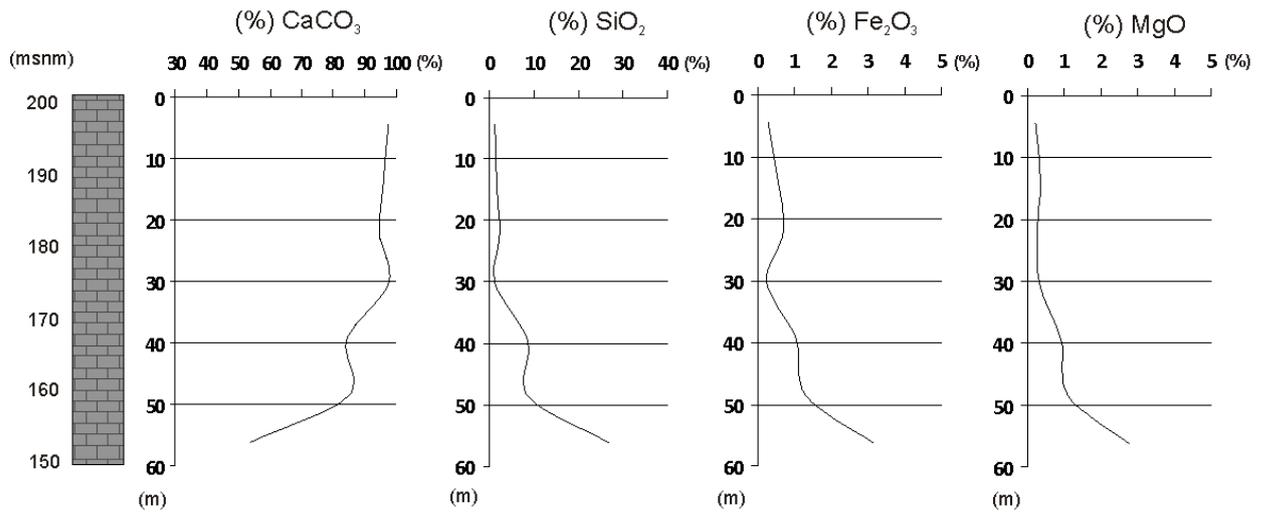


	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	96,99	1,00	0,31	0,40	0,38	0,02
Desviación Estándar	2,98	1,42	0,26	0,11	0,48	0,02

Figura 65. Columna litológica del pozo PSB 6 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

La perforación PSB 6 presenta un material carbonático muy homogéneo, con alto grado de pureza representando con un promedio de 97,01 % de CaCO₃. Se presenta una leve variación entre los metros 20 y 40, donde se observa un aumento esencialmente del SiO₂, seguido del Fe₂O₃ y Al₂O₃, y una disminución del CaCO₃, con promedio de 89,45 %. El espesor total de caliza es de 121,85 metros.

Pozo:	PSB-07	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.004,27	747.688,63	200,0
Perforación N° :	7	
Profundidad:	59,25	

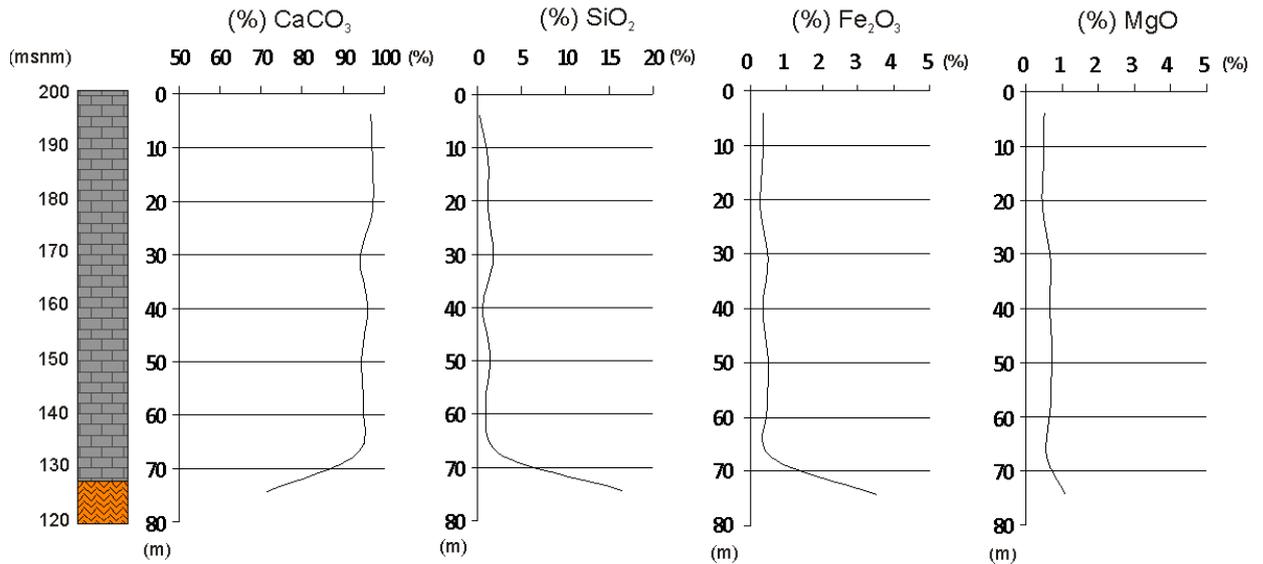


	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	86,95	7,24	1,03	0,85	2,19	0,22
Desviación Estándar	15,66	9,27	1,00	0,91	2,66	0,34

Figura 66. Columna litológica del pozo PSB 7 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

En los primeros 30 metros de esta perforación se presenta un material carbonático de alta pureza muy homogéneo, con promedio de 96,45 % de CaCO₃. A partir de los 30 m de profundidad hasta el final de la perforación, se observa una tendencia negativa, donde la concentración del CaCO₃ disminuye, variando de 95,45 % a 53,81 % en 40 m, con un aumento relativo de las impurezas, representadas mayoritariamente por SiO₂, seguido de Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO y K₂O, llegando a tener una concentración máxima de 47,22 %. El espesor total de este material carbonático es de 59,25 metros.

Pozo:	PSB-08	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.120.927,25	747.777,78	200,0
Perforación N° :	8	
Profundidad:	81,15	



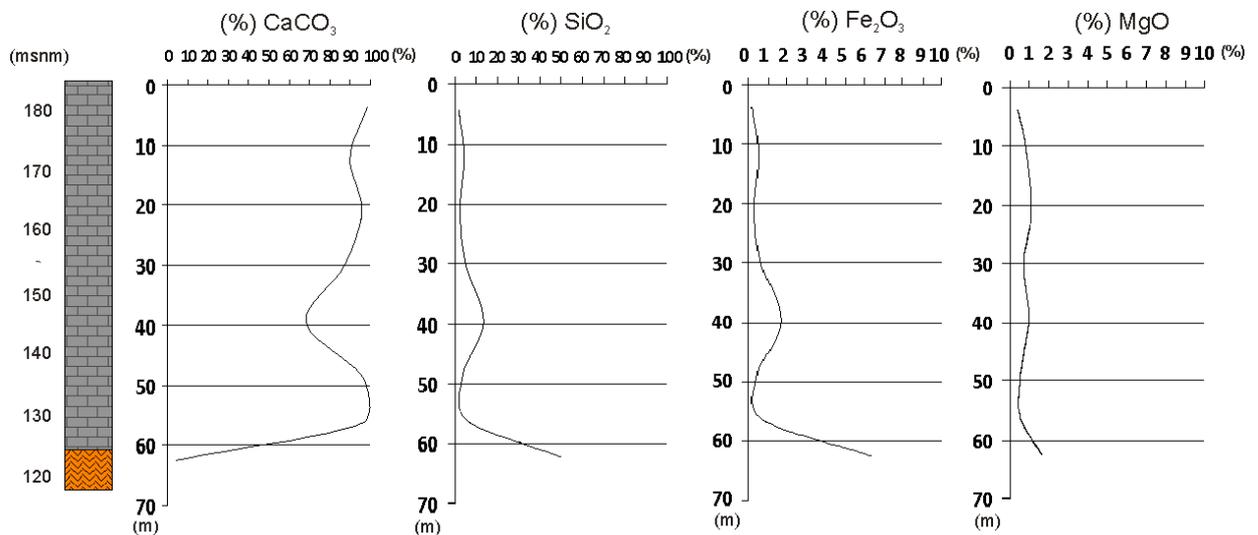
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	92,80	2,89	0,77	0,64	0,90	0,07
Desviación Estándar	8,08	5,11	1,04	0,19	1,23	0,08

Figura 67. Columna litológica del pozo PSB 8 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

Desde el inicio de esta perforación hasta los 65 m de profundidad, se presenta un material carbonático de alta pureza, muy homogéneo, con un promedio de 95,45 % de CaCO₃, y presencia de impurezas constituidas mayormente por SiO₂ y Fe₂O₃ menores al 5,55 %. Posterior del metro 65 hasta el final de la perforación, se observa una tendencia negativa, donde el CaCO₃ tiende a bajar su concentración llegando a 71,61 %, mientras que los otros elementos presentan una tendencia positiva, principalmente en el SiO₂, luego el Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO y K₂O, llegando a tener una concentración total de 28,39 %.

Según el informe realizado para esta campaña, a partir de los 72,82 m aparece una roca negra arenosa, poco consolidada, no calcárea, mezclada con fragmentos de caliza gris oscura.

Pozo:	PSB-09	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.1212.06,8	747.746,46	186,0
Perforación N° :	9	
Profundidad:	65,45	



Unidad de Calizas

	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	90,54	5,44	0,56	0,78	1,11	0,14
Desviación Estándar	10,58	7,70	0,53	0,26	1,04	0,18

Unidad de Basamento

	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	4,24	60,76	6,35	1,67	16,99	2,19

Figura 68. Columna litológica del pozo PSB 9 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

Esta perforación se encuentra caracterizada por un material carbonático con espesor de 55,05 m, el cual se presenta con un alto grado de pureza representado por un promedio de 90,54 % de CaCO_3 . Se presentan algunas variaciones observadas mayormente entre los metros 30 - 45, donde el CaCO_3 llega a tener un promedio 68,47 %, mientras que las concentraciones de las impurezas aumentan, siendo el SiO_2 , el elemento mayoritario, seguido del Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO y K_2O , con un máximo de 31,53 % de concentración total.

A partir de los 55,05 m de profundidad se presenta otra unidad litológica no calcárea clasificada en este trabajo como basamento, la cual está constituida mayormente por SiO_2 , seguida de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaCO_3 , MgO y K_2O . Según la descripción litológica realiza en el informe de esta campaña, aparece una roca color negro, poco consolidada, algo arcillosa y muy fractura, posiblemente una toba volcánica.

Pozo:		PSB-10	
Coordenadas:			
NORTE	ESTE	COTA	
1.121.154,51	747.811,69	187,0	
Perforación N° :	10		
Profundidad:	14,6		

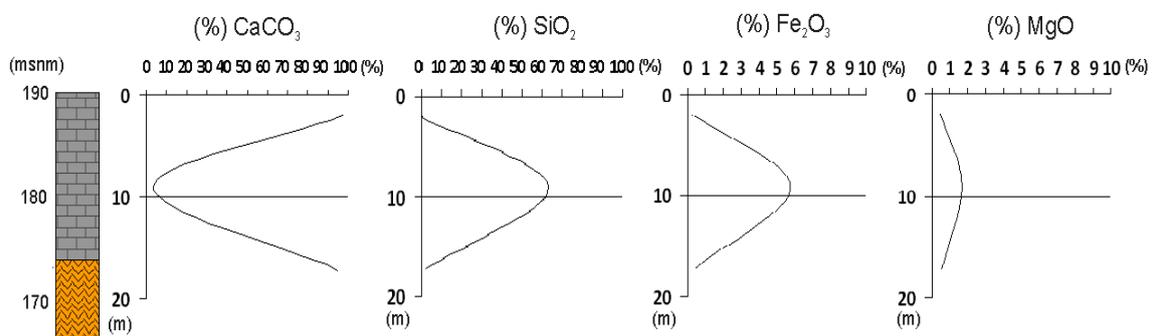


Figura 69. Columna litológica del pozo PSB 10 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad.

Unidad de Calizas

	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	95,12	2,18	0,39	0,54	0,66	0,07
Desviación Estándar	1,45	1,17	0,09	0,03	0,06	0,04

Unidad de Basamento

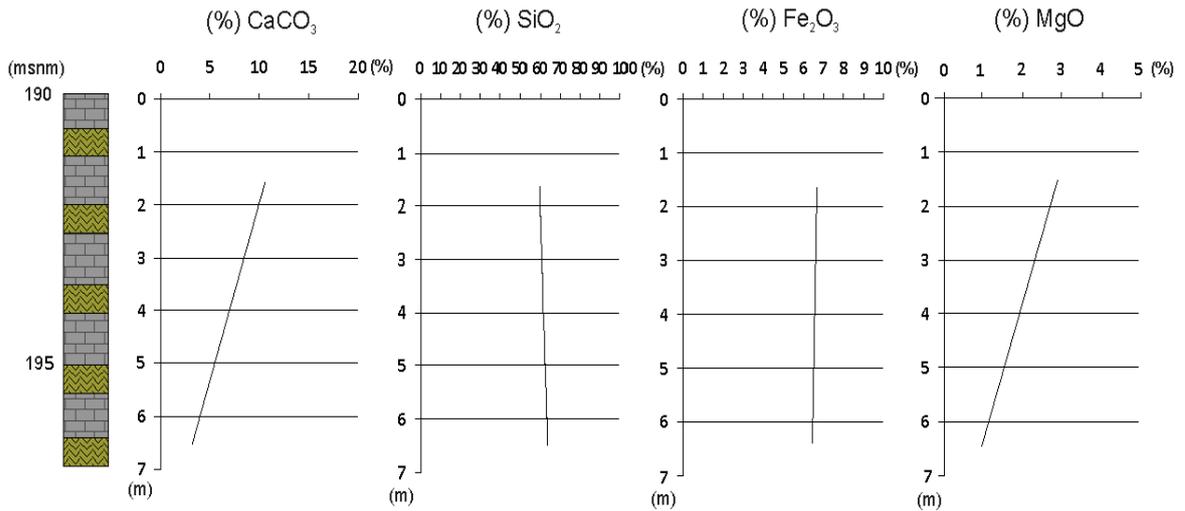
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	4,03	63,08	5,76	1,70	15,28	1,86

Figura 69. Columna litológica del pozo PSB 10 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

La perforación PSB 10 presenta una variación del material carbonático relevante. En los primeros 5 m el material carbonático tiene un promedio alto de CaCO₃ de 95,17 %, mientras que en los siguientes 15 m de profundidad varía abruptamente llegando a tener un promedio de 4,03 %, con altas concentraciones de SiO₂ y Al₂O₃. Posteriormente en los siguientes metros hasta el final de la perforación vuelve a presentarse un material carbonático de alta pureza con promedio de CaCO₃ 95,12 %. Esta variación puede darse por la presencia de un lente no carbonático, posiblemente un material alúmino-siliciclástico, el cual no fue descrito en el informe bibliográfico.

A partir de los 15 m de profundidad, según el informe realizado para esta campaña, se describe una roca negra, poco consolidada, no calcárea, posiblemente una roca volcánica, de la cual no se realizaron análisis químicos. Esta roca se clasifica en este trabajo como basamento.

Pozo:	PSB-11	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.216,1	747.791,44	191,0
Perforación N° :	11	
Profundidad:	9,75	



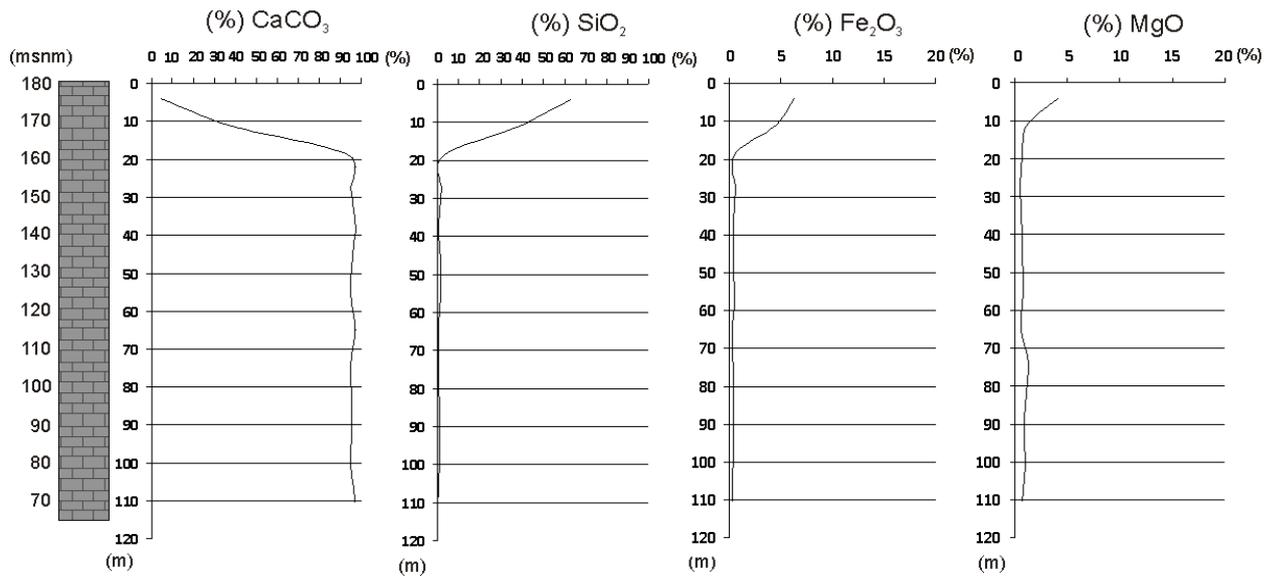
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	7,21	61,29	6,19	1,84	13,55	1,39
Desviación Estándar	4,69	2,82	0,21	1,41	3,47	0,35

Figura 70. Columna litológica del pozo PSB 11 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

La perforación PSB 11 presenta un material mayormente constituido por SiO₂ seguido de Al₂O₃, CaCO₃, Fe₂O₃, MgO y K₂O. El material tiene un espesor de 9,75 metros donde el SiO₂, Al₂O₃, y Fe₂O₃ se presenta de manera uniforme mientras que el CaCO₃ y MgO disminuyen levemente con respecto a la profundidad.

Según la descripción litológica realizada en el informe de esta campaña, la perforación PSB 11 presenta fragmentos de calizas color gris oscuro, mezclados con un material arcilloso-arenoso, oscuro, de grano fino a medio, lo que sugiere que este material es producto de una zona de relleno.

Pozo:	PSB-12	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.210,92	747.521,88	182,8
Perforación N° :	12	
Profundidad:	114,95	



Unidad de Calizas

	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	95,67	0,94	0,42	0,79	0,53	0,04
Desviación Estándar	1,09	0,75	0,10	0,23	0,20	0,02

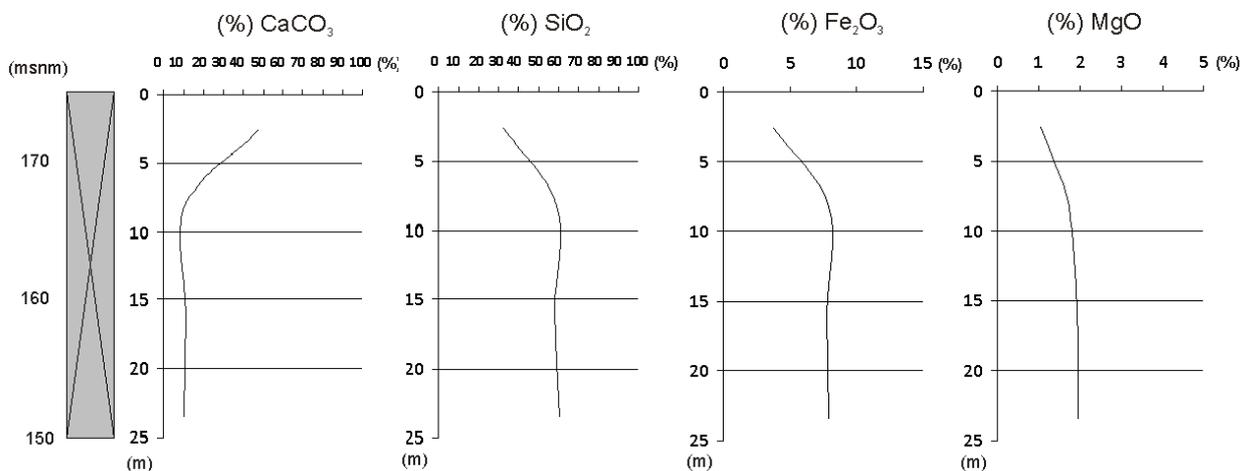
Unidad de Estéril

	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	21,76	50,31	5,38	2,62	11,52	1,67
Desviación Estándar	23,70	17,69	1,29	2,12	3,42	0,47

Figura 71 Columna litológica del pozo PSB 12 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

En los primeros metros se observa un material poco calcáreo, cuya composición mayoritaria es de SiO₂, seguido de Al₂O₃, Fe₂O₃, CaCO₃, MgO y K₂O, clasificado en este trabajo como material de estéril. Este material presenta un aumento uniforme de CaCO₃ en conjunto con una disminución de los otros elementos hasta los 15 m de profundidad, donde se observa una roca carbonática, muy homogénea con alto grado de pureza, representado por 95,67 % de CaCO₃ y escasa presencia de impurezas constituidas mayormente por SiO₂ menores al 5 %. El espesor total del material carbonático es de 99,95 metros.

Pozo:	PSB-13	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.270,84	747.603,49	175,0
Perforación N° :	13	
Profundidad:	26,05	



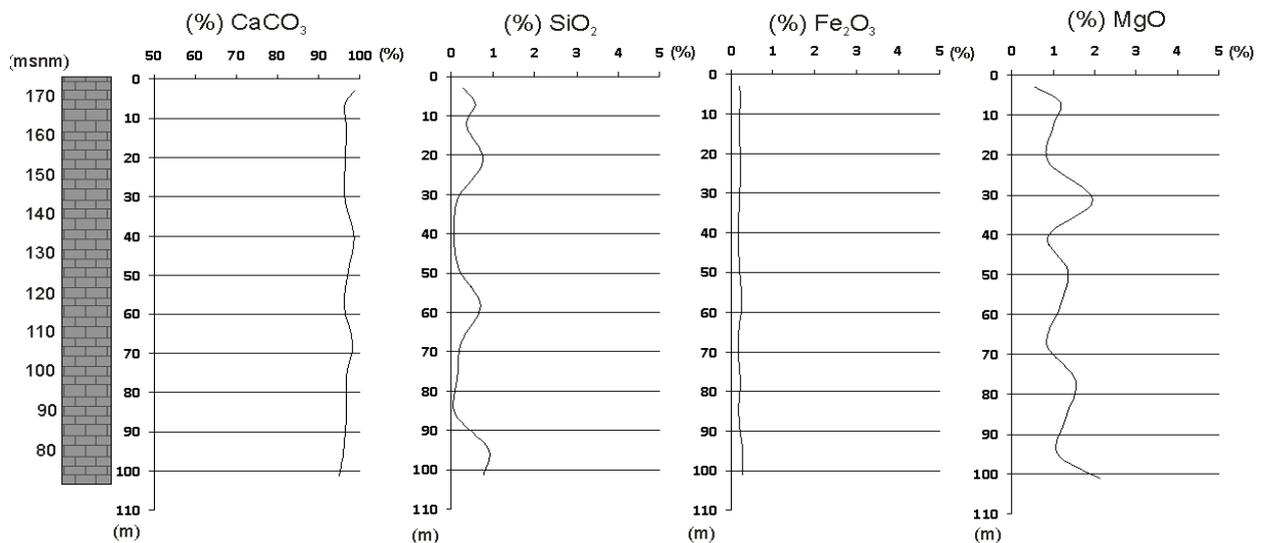
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	12,96	52,50	6,82	1,25	1,27	1,67
Desviación Estándar	8,57	13,60	2,01	1,05	0,43	0,42

Figura 72. Columna litológica del pozo PSB 13 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

Esta perforación no se presenta litológicamente descrita en el informe realizado para esta campaña, pero si presentan los análisis químicos efectuados a las muestras obtenidas en este sondeo.

De acuerdo a estos análisis químicos, se observa un primer tipo litológico en los primeros 8 metros, constituido por CaCO_3 con un promedio bajo de 49,98 %, seguido de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O y MgO . A partir de esta profundidad se observa un segundo tipo litológico, poco calcáreo, constituido mayormente por SiO_2 , seguido de Al_2O_3 , CaCO_3 , Fe_2O_3 , K_2O y MgO , con un espesor total de 18,51 metros.

Pozo:	PSB-14	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.298,22	747.480,42	174,6
Perforación N° :	14	
Profundidad:	102,87	

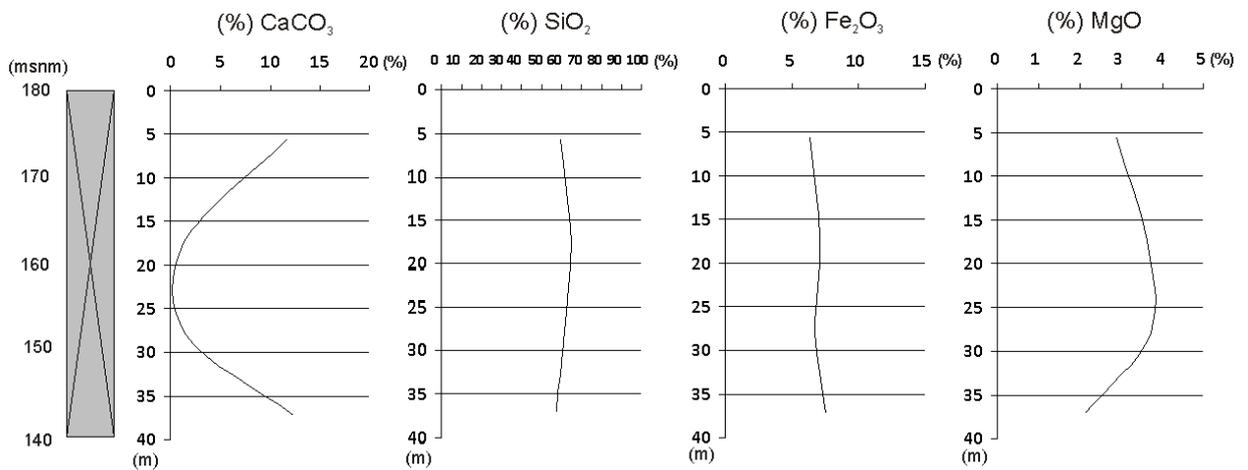


	CaCO_3 (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	Al_2O_3 (%)	K_2O (%)
Media	96,90	0,40	0,22	1,22	0,25	0,02
Desviación Estándar	1,08	0,30	0,03	0,44	0,09	0,01

Figura 73. Columna litológica del pozo PSB 14 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

La perforación PSB 14 se caracteriza por tener una material carbonático de alta pureza, muy homogéneo, con concentraciones promedio de 96,67 % de CaCO_3 , y espesor de 102,71 m. Las impurezas se presentan menores al 5 % del total, con mayor concentración de MgO y SiO_2 .

Pozo:	PSB-15	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.253,69	747.552,75	179,0
Perforación N° :	15	
Profundidad:	50,9	



	CaCO₃ (%)	SiO₂ (%)	Fe₂O₃ (%)	MgO (%)	Al₂O₃ (%)	K₂O (%)
Media	7,34	60,05	7,18	2,92	14,21	1,51
Desviación Estándar	5,96	3,10	0,95	0,74	1,69	0,44

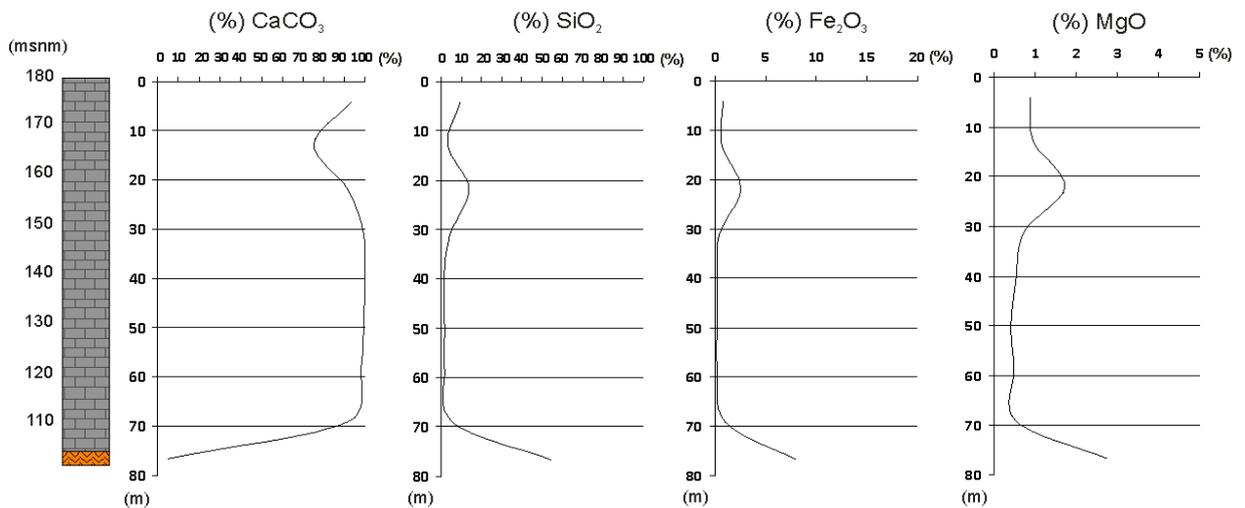
Figura 74. Columna litológica del pozo PSB 15 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

Esta perforación no se presenta litológicamente descrita en el informe realizado para esta campaña, pero si presentan los análisis químicos efectuados a las muestras obtenidas en este sondeo.

De acuerdo a los análisis químicos, se observa un tipo litológico poco calcáreo constituido mayormente por SiO_2 seguido de CaCO_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO

y K_2O . El SiO_2 mantiene una tendencia muy uniforme al igual que el Al_2O_3 y Fe_2O_3 , mientras que el $CaCO_3$ y MgO presentan una variación entre los metros 10 y 30, donde el primero presenta una disminución y el segundo un leve aumento de la concentración. El espesor total de esta unidad es de 50,9 metros.

Pozo:	PSB-16	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.153,07	747.502,37	183,92
Perforación N° :	16	
Profundidad:	78,05	



Unidad de Calizas

	$CaCO_3$ (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	Al_2O_3 (%)	K_2O (%)
Media	94,61	3,96	0,66	0,78	0,70	0,08
Desviación Estándar	8,44	5,18	0,81	0,42	0,82	0,09

Unidad de Basamento

	$CaCO_3$ (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	Al_2O_3 (%)	K_2O (%)
Media	0,17	54,5	7,88	2,73	14,59	1,26

Figura 75. Columna litológica del pozo PSB 16 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

La perforación está caracterizada por tener un material carbonático con espesor de 70,05 m, el cual se presenta muy homogéneo con un alto grado de pureza, representado por un promedio de 94,61 % de CaCO_3 . Se presentan una variación observada entre los metros 10 – 20, donde el CaCO_3 llega a tener un promedio 75,35 %, mientras que las concentraciones de las impurezas aumentan, siendo el SiO_2 , el elemento mayoritario, seguido del Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO y K_2O , llegando a tener una concentración total de 24,65 %.

A partir de los 70,05 m de profundidad se presenta otra unidad litológica no calcárea, constituida mayormente por SiO_2 , seguida de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO y K_2O . Según el informe realizado para esta campaña, se presenta una roca color negro, poco consolidada, algo arcillosa, muy fracturada, posiblemente volcánica, la cual es clasificada para este trabajo como basamento.

Pozo:	PSB-17	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1.121.202,12	747.709,52	188,0
Perforación N° :	17	
Profundidad:	95,03	

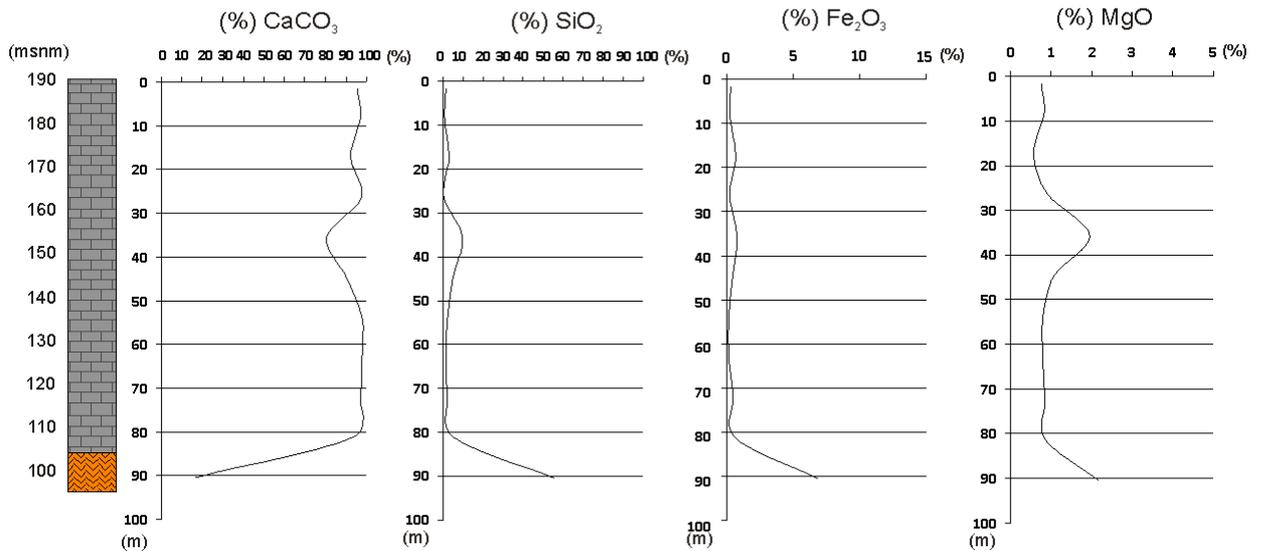


Figura 76. Columna litológica del pozo PSB 17 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad.

Unidad de Calizas

	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	93,87	2,31	0,36	0,94	0,63	0,06
Desviación Estándar	5,35	3,01	0,22	0,38	0,58	0,06

Unidad de Basamento

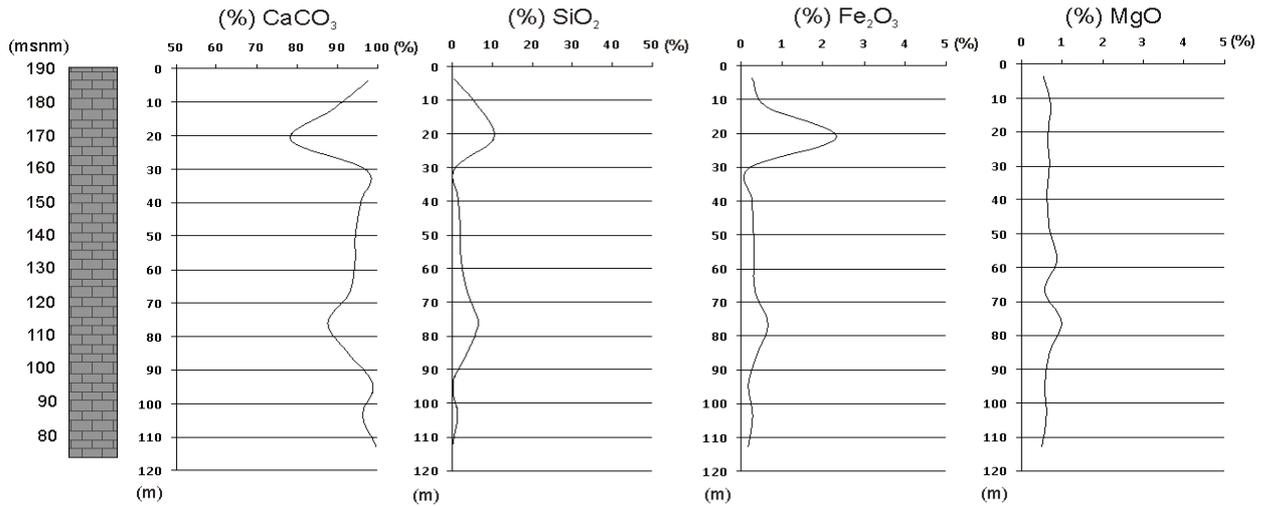
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	16,39	55,44	6,78	2,18	17,24	1,16

Figura 76. Columna litológica del pozo PSB 17 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

La perforación PSB 17 está caracterizada por un material carbonático con espesor de 85,88 m, el cual se presenta de manera homogénea con un alto grado de pureza representado por un promedio de 93,87 % de CaCO₃. Se presenta una variación observada entre los metros 30 - 40, donde el CaCO₃ llega a tener un promedio 80,65 %, mientras que las concentraciones de las impurezas aumentan, siendo el SiO₂ el elemento mayoritario, seguido del Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO y K₂O, llegando a tener una concentración total de 19,35 %.

A partir de los 85,88 m de profundidad se presentan otra unidad litológica poco calcárea, constituida mayormente por SiO₂, seguida de Al₂O₃, CaCO₃, Fe₂O₃, MgO y K₂O. Según el informe realizado para esta campaña, se presenta una roca color negro, poco consolidada, algo arcillosa, muy fractura, posiblemente volcánica, la cual es clasificada en este informe como basamento.

Pozo:	PSB-18	
Coordenadas:		
NORTE	ESTE	COTA
1121090,5	747621,56	193,7
Perforación N° :	18	
Profundidad:	117,32	



	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	93,51	3,01	0,48	0,67	0,77	0,07
Desviación Estándar	5,73	3,11	0,58	0,13	0,83	0,05

Figura 77. Columna litológica del pozo PSB 18 con perfiles de distribución de concentración con respecto a la profundidad y análisis estadístico de los componentes mayoritarios.

La perforación está caracterizada por tener un material carbonático con espesor de 117,32 m, el cual se presenta con un alto grado de pureza representado por un promedio de 93,51 % de CaCO₃. El material es mayormente homogéneo, con algunas variaciones observadas entre los 10 a 30 metros de profundidad, donde el CaCO₃ llega a tener un promedio 78,45 %, y las impurezas se presentan mayormente como SiO₂, Fe₂O₃ y Al₂O₃ siendo menores al 21,35 %.

OBSERVACIONES GENERALES DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

El material carbonático observado en la mayoría de las perforaciones se describe según el informe realizado por el geólogo Manuel Erminy, como una

caliza masiva color gris claro a oscuro, fracturada, con leve meteorización, abundantes vetas de calcita, y presencia de algunas cavernosidades rellenas a veces de material arcilloso o caliche. Este material se caracteriza por ser una roca con altas concentraciones de CaCO_3 representadas por un promedio total de 94,36 % de concentración de este mismo componente, observándose esencialmente muy uniforme con algunas variaciones muy localizadas con respecto a la profundidad.

Entre las variaciones más marcadas se tiene la perforación PSB7, donde se observó una concentración mínima de 53,81 % CaCO_3 , entre las cotas 155 - 165, con un aumento considerable de las impurezas (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3); mientras que en las perforaciones PSB4 y PSB9 se observaron variaciones menos marcadas, con concentraciones mínimas de 68,47 % y aumento relativo de las impurezas (SiO_2 y Al_2O_3), el primero entre las cotas 105 - 100, y el segundo entre las cotas 140 - 165. En las perforaciones PSB2, PSB5, PSB16 y PSB18 se observó una disminución en el rango de las variaciones, limitadas entre 80 - 99,75 % de CaCO_3 , y en el resto de las perforaciones se observó una tendencia muy uniforme con variaciones mínimas no significativas.

Las impurezas encontradas en los materiales carbonáticos están representadas principalmente por SiO_2 , con promedio total 2,31 % de concentración, el cual tiende a aumentar su concentración cuando la del CaCO_3 disminuye, al igual que el Al_2O_3 y Fe_2O_3 pero en menor proporción, con promedios de 0,66 y 0,45 % de concentración correspondientemente en total. En cuanto al MgO y K_2O se presentan como componentes muy uniformes con concentraciones muy bajas, el primero con promedio de 0,35 % y el segundo con promedios menores al 0,50 %.

Este material carbonático presente en las perforaciones se relaciona química y litológicamente con la subunidad de Calizas Puras definida en el estudio geológico de superficie. Esta relación se observó esencialmente por las semejanzas entre las descripciones litológicas y por medio de los análisis

químicos (tabla 14), donde se estimó que las concentraciones químicas mayoritarias son muy semejantes entre los dos materiales, lo que demuestra que el material carbonático descrito en las perforaciones, corresponda muy posiblemente a la misma subunidad de Calizas Puras, demostrando la continuidad de esta subunidad hacia subsuelo, a profundidades mayores de 100 metros.

Sondeos de Perforación						
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	94,36	2,61	0,48	0,66	0,73	0,07
Desviación Estándar	3,09	1,94	0,23	0,24	0,51	0,05

Geología de Superficie: Subunidad de Calizas Puras						
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	95,13	1,43	0,47	0,42	0,51	0,08
Desviación Estándar	4,15	2,0	0,32	0,29	0,49	0,04

Tabla 14. Relación química entre los materiales carbonáticos observados en la superficie y los presentes en los sondeos de perforación.

Además del material carbonático, se observó otro tipo litológico encontrado en los metros finales de las perforaciones PSB 8, PSB 9, PSB16 y PSB17, donde según la descripción litológica realizada en el informe de esta campaña, aparece un material color negro no calcáreo, poco consolidado, algo arcilloso, muy fracturado, posiblemente volcánico. Esta roca está constituida mayormente por SiO₂ seguido Al₂O₃ y Fe₂O₃, con concentraciones muy bajas de CaCO₃, MgO y K₂O, encontrándose entre las cotas 110 y 130.

En el estudio de superficie se definió una unidad de Rocas Líticas Volcánicas, cuya descripción litológica y constituyentes químicos son muy parecidos a los observados en este material (tabla 15). Esta relación entre estas litologías también se fundamentó tomando en consideración la orientación geométrica que se presenta la unidad de Areniscas Líticas Volcánicas (N80°W

40°S, explicado en la geología estructural), y la ubicación y profundidad de la perforación MSB 8, como se muestra en la figura 78.

Sondeos de Perforación						
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	2,21	57,63	7,12	2,20	15,79	1,73
Desviación Estándar	2,88	4,43	1,08	0,75	1,70	0,66

Geología de Superficie: Unidad de Areniscas Líticas Volcánicas						
	CaCO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
Media	3,53	64,35	10,15	0,13	20,48	0,08
Desviación Estándar	1,42	1,73	3,11	0,01	0,66	1,18

Tabla 15. Relación química entre la unidad de Areniscas Líticas Volcánicas y el material negro (toba volcánica) presente en los sondeos de perforación.

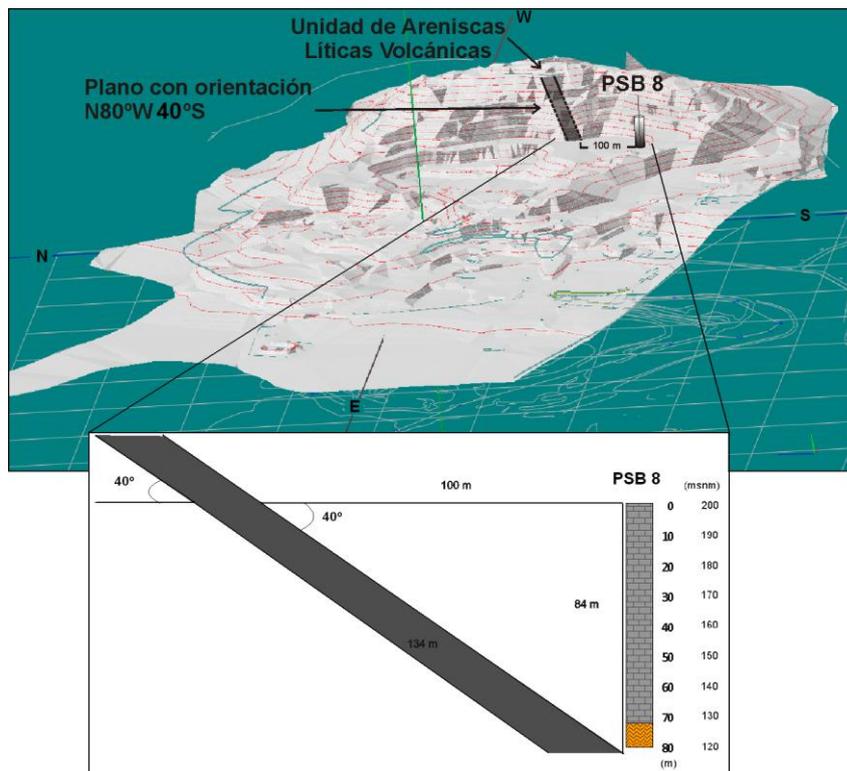


Figura 78. Al fondo: Mapa topográfico del área de estudio en 3D, con la ubicación de la perforación PSB 8 y la orientación geométrica del cuerpo de roca definido como la unidad de Areniscas Líticas Volcánicas. Al frente: extrapolación de la unidad de Areniscas hacia el subsuelo, con la ubicación de la perforación PSB 8.

Extrapolando el cuerpo de rocas de la unidad de Areniscas Líticas Volcánicas hacia el subsuelo, se infiere que este cuerpo debe interceptar la perforación PSB 8, a una profundidad estimada de 84 m, como se muestra en la figura 78. Según el informe realizado para esta campaña de exploración, el material negro (toba volcánica), aparece a una profundidad de 72,5 m, lo que demuestra que lo asumido anteriormente es muy posible. Para las perforaciones restante donde aparece este material, no se tiene esta misma relación debido a que éstas, se encuentran distantes del cuerpo de roca definido como unidad de Areniscas Líticas Volcánicas, por lo que posiblemente sean otros eventos depositacionales con litologías muy parecidas.

Es de notar también que las perforaciones PSB 10, PSB 11, PSB 13 y PSB 15, presentan otro tipo litológico constituido mayormente por SiO_2 , seguido de CaCO_3 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 con concentraciones muy bajas de MgO y K_2O , encontrándose mayormente en los primeros metros de las perforaciones. De este material se tiene poca información bibliográfica, y se diferencia del tipo litológico anterior por tener una concentración mayor de CaCO_3 , y menor de Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

CAPÍTULO V

GEOLOGÍA DE YACIMIENTOS

5.1. GENERALIDADES

Los elementos químicos que componen nuestro planeta están distribuidos de una forma que a grandes rasgos es muy regular, ya que depende de dos grandes factores:

- Su abundancia en cada una de las capas que componen el planeta,
- La naturaleza y composición de las rocas presentes en cada sector concreto que se analice.

Sobre la base de los datos conocidos sobre la naturaleza y composición geoquímica, mineralógica y petrológica de las diferentes capas en que está dividido el planeta, la composición es simple y homogénea en la zona más profunda (núcleo), e intermedia en el manto, mientras que la capa más superficial (la corteza) presenta una composición más compleja y heterogénea.

Un yacimiento minero es aquel yacimiento en el cual la calidad y cantidad de los minerales presentes justifica un mayor estudio, el cual tiene por objetivo definir en cantidad, calidad, profundidad y dimensión el yacimiento con el fin de desarrollar las actividades mineras para que la explotación del yacimiento sea económicamente rentable y acorde con las tecnologías actuales. Los yacimientos minerales son acumulaciones naturales de un mineral que permitan su explotación con rendimiento económico.

La geología de yacimiento se encarga del estudio de formaciones en la naturaleza en las que está presente una concentración de material económicamente rentable en profundidad, calidad, cantidad y dimensión y de provecho para un sector industrial determinado.

5.2. EVALUACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS

Los Recursos Minerales Sólidos se refieren a la concentración de minerales útiles sólidos que existen en o sobre la corteza terrestre cuyas características hacen posible la extracción económica actual o perspectiva de algún mineral útil de dicha concentración. Se clasifican en identificados y no identificados (QUINTÍN et. al, 1997).

Las Reservas Minerales corresponden a la parte de los recursos minerales sólidos identificados, de la que puede extraerse económicamente uno o varios minerales o elementos útiles en el momento de su determinación, por los que solo incluye los componentes económicos y marginalmente económicos (QUINTÍN et. al, 1997).

5.3.2. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE RECURSOS Y RESERVAS

El cálculo de reservas no es sólo el conjunto de operaciones de cómputo, sino es principalmente el análisis y la generalización de todos los datos experimentales obtenidos en el proceso de estudio geológico del yacimiento. En el informe de resultados de los trabajos de prospección se argumentan las nociones acerca de la estructura del yacimiento, la constitución y las condiciones de estratificación de los cuerpos minerales, su composición, propiedades tecnológicas, condiciones de explotación, se aprecian las perspectivas del yacimiento, la metodología adoptada a su exploración, así como del muestreo y el cálculo de las reservas minerales (KAZHDÁN, 1982).

Los métodos de cálculos de reservas se fundan en dos principios: en la transformación de los cuerpos minerales de forma compleja, tratando de convertirlos en cuerpos geométricos equidimensionales en cuanto su volumen, pero más sencillo en cuanto a su forma, y en la disfunción de los datos

experimentales de prospección, obtenidos en las intersecciones de exploración, extendiéndolos a volúmenes del subsuelo contiguos a estas últimas (KAZHDÁN, 1982).

Son conocidos cerca de 20 métodos de cálculos de reservas, entre los cuales en la práctica de exploración geológica adquirieron amplio uso solo tres: los métodos de cortes y de bloques, y los métodos estadísticos. Los otros métodos de cálculo de reservas no adquirieron amplia difusión debido al enfoque geométrico formalista de la separación de los bloques de cálculo (los métodos de triángulos, de cuadriláteros, de región más cercana, de curvas de nivel, de isohipsas, entre otras) o porque en realidad los mismos son procedimientos auxiliares y aseguran sólo la ejecución de operaciones separadas del cálculo de reservas (KAZHDÁN, 1982).

Métodos de cortes: Para calcular las reservas se utilizan los cortes de prospección que forman el sistema de trabajos de exploración. Los contornos de las reservas se trazan en los planos de los cortes geológicos, y los límites de cada bloque de cálculo coinciden con los planos de los cortes. Las reservas se calculan en cada bloque por separado y después se suman por todo el depósito mineral (KAZHDÁN, 1982).

El método de cortes asegura la transformación más verosímil de los volúmenes de los depósitos, y la combinación de los cortes geológicos y de cálculo en un plano contribuye al registro completo de las singularidades geológicas del yacimiento al contornear la mineralización industrial. Según la orientación de los cortes de exploración se distinguen los siguientes métodos de cálculo de reservas: con cortes verticales y horizontales y con cortes paralelos (figura 79) y no paralelos (KAZHDÁN, 1982).

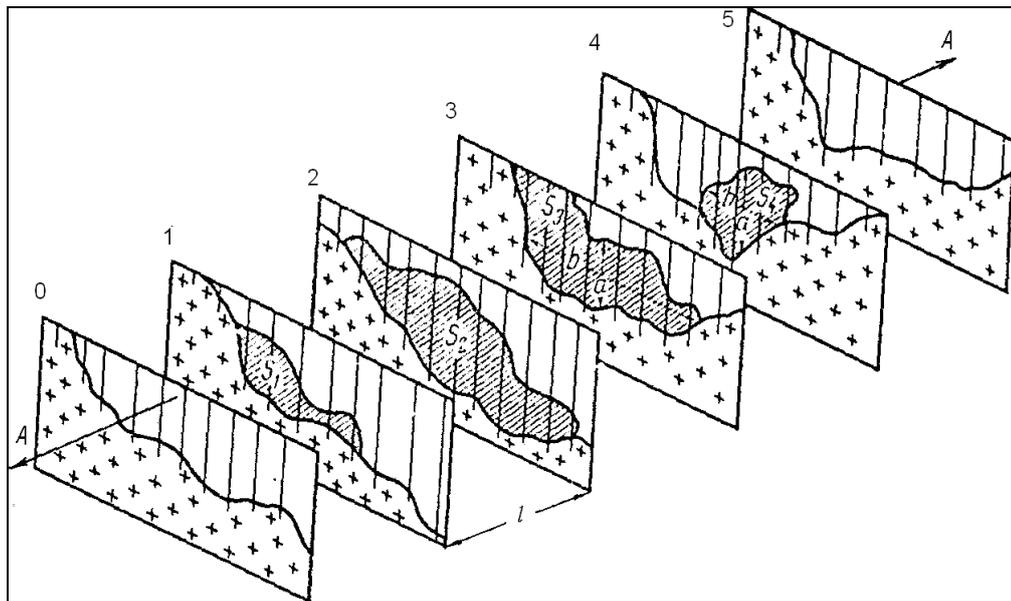


Figura 79. Métodos de cálculo de reservas a base de secciones verticales paralelas (tomado y modificado de KAZHDÁN, 1982).

El procedimiento de secciones verticales paralelas se realiza calculando los volúmenes de los bloques entre los cortes situados a la distancia l uno de otro, según las formas y la relación de las áreas S_1 y S_2 de los depósitos productivos, se emplean la fórmula:

$$V = \frac{S_1 + S_2}{2} * L$$

Donde S_1 y S_2 se indican como el área de las secciones 1 y 2 respectivamente y L como la separación entre las secciones contiguas. A su vez, para el cálculo del total del volumen del yacimiento se utiliza la siguiente fórmula:

$$Vt = \sum_{i=1}^n V_i$$

Métodos de bloques: Este método se emplea para calcular las reservas de los depósitos minerales explorados a base de una red geométrica incorrecta, cuando no es posible construir el sistema de cortes de exploración transversales,

así como para calcular las reservas de los depósitos estratificados y en forma de filones de poca potencia (KAZHDÁN, 1982).

Al calcular las reservas por el método de bloques, el área del depósito se divide en sectores, es decir, en bloques. El volumen del depósito en este caso se transforma en una serie de figuras cerradas, con alturas iguales a las potencias medias de los bloques de cálculo. Los depósitos de buzamiento abrupto se proyectan en el plano vertical, y los de buzamiento suave, en el plano horizontal (KAZHDÁN, 1982).

Las alteraciones inevitables de las áreas en las proyecciones verticales y horizontales se compensan a causa de que en los cálculos se utilizan no las potencias verdaderas, sino las potencias horizontales o verticales cuyos valores se calculan para cada intersección mineral mediante fórmulas trigonométricas (KAZHDÁN, 1982).

En la práctica de prospección se emplean las tres variedades más difundidas del método sujeto a examen: la de la media aritmética, la de bloques geológicos y la de bloques de explotación. Para este trabajo se utilizará el método de bloques geológicos, el cual se explican a continuación:

El método de bloques geológicos consiste en la separación del área superficial del yacimiento en una serie de bloques de cálculo independientes, determinados a partir del conjunto de indicios geológicos. Las reservas se calculan en cada uno de esos bloques por separado, tomando en cuenta los diferentes espesores del material mineralizado. Además de los indicios geológicos, al separar los bloques se toma en consideración el grado de su reconocimiento y las propiedades tecnológico-mineras del mineral (KAZHDÁN, 1982).

En los casos de una red de exploración geoméricamente incorrecta, el método de bloques geológicos es el único procedimiento racional de cálculo de reservas. El mismo es inaplicable para el cálculo de reservas en los depósitos de estructura plegada y de otros yacimientos de constitución compleja, cuyas formas se alteran considerablemente al ser proyectadas en el plano (KAZHDÁN, 1982).

$$V = S*m; \quad Q = V*d; \quad P = Q*c/100$$

Donde: V , es el volumen del depósito;
 S , el área del depósito en la proyección;
 m , la potencia horizontal (o vertical) media del depósito;
 Q , las reservas minerales;
 d , la masa volúmica mineral;
 P , las reservas de componente útil;
 c , el contenido medio de componente útil en el volumen.

5.3.3. CLASIFICACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS

El procedimiento de clasificación del mineral dentro de un depósito se fundamenta en tres criterios básicos como son la viabilidad económica, certidumbre geológica y aprovechamiento o recuperación del mineral. Tomando en cuenta estos criterios se han elaborado diferentes clasificaciones suministradas por diferentes organismos incluyendo el U.S. Bureau de Minas (USBM), U.S. Geological Survey (USGS) en 1980, Australasian Mining Industry Council (AMIC) y el Australian Institute of Mining and Metallurgy (AIMM) en 1989.

Dentro de los sistemas de clasificación de recursos, se destaca el sistema propuesto por AMIC/AIMM (figura 80) debido a su aceptación mundial y por ser el más simple y cuya aplicación es posible a cualquier tipo de yacimiento. En este sistema se clasifican los recursos en:

Recurso Medido: estos son interceptados y determinados por perforaciones, afloramientos, calicatas y labores mineras. La distancia entre ellos es lo suficientemente cerrada para confirmar la continuidad del yacimiento con un real conocimiento del mismo.

Recurso Indicado: se calculan a partir de información similar a la utilizada para los recursos medidos, pero los lugares para inspección, toma de muestras y medidas están a mayor distancia o distribuidos de forma menos adecuada.

El grado de seguridad, aunque inferior al de recursos medidos, es lo suficientemente alto como para suponer que existe una continuidad entre los puntos de observación.

Recurso Inferido: las estimaciones se basan en una supuesta continuidad más allá de los recursos medidos e indicados, para los cuales existen pruebas geológicas. Los recursos inferidos pueden o no estar corroborados por muestras o mediciones.

Dentro de la misma clasificación de AMIC/AIMM, las reservas se clasifican en:

Reservas Probadas: comprende los “recursos medidos” susceptibles de una explotación minera, económicamente y ambientalmente viable, con una determinada tecnología y donde el recurso identificado ha sido definido en tres dimensiones por excavaciones o perforaciones.

Reservas Probables: son aquellas que se han establecido en términos de volúmenes, toneladas y grado de calidad donde las condiciones son tales que el recurso probablemente sea confirmado pero donde el recurso in situ identificado

Tipo Litológico		Tipo Químico	% CaCO ₃	Características Litológicas
Unidad I	Subunidad I	1	> 80 %	CALIZAS PURAS: Rocas carbonáticas masivas de color gris claro a oscuro, con bordes de meteorización pardo amarillento, con abundantes vetas de calcita y escasos microfósiles.
	Subunidad II	2	45 - 55 %	CALIZAS SUCIAS: Roca carbonática masiva color marrón naranja y gris oscura, rodeada de material arcilloso fétido, con abundantes vetas de calcita.
Unidad II		3	8 - 15 %	WACA LÍTICA: Roca poco competente de grano fino, color marrón grisáceo y manchas de meteorización ocre y negras, con presencia de delgadas vetas de calcita de manera irregular.
Unidad III		4	< 3 %	ARENISCA LÍTICA VOLCÁNICA: Roca poco competente de color gris oscuro porosa con tamaño de grano arena (fino a medio), embebidos en una matriz fina, con presencia de vetas delgadas de calcita.

Tabla 14. Tipos litológicos y químicos determinados en el área de estudio.

Mediante los análisis químicos y petrográficos, fue posible determinar que el tipo químico-litológico óptimo como materia prima para elaboración del cemento, es el tipo litológico 1, correspondiente a la subunidad de Calizas Puras, con concentraciones mayores al 80 % de CaCO₃. El resto de los litotipos presentan concentraciones bajas a muy bajas de % CaCO₃, por lo cual no son interés minero, ya que no son materiales rentables económicamente.

Esta subunidad de Calizas Puras, como su mismo nombre lo indica, está caracterizada por calizas compuesta por altas concentraciones de CaCO₃ (95 % en promedio total), que en la mayoría de los casos está por encima del 94 %, los cuales constituyen valores óptimos como materia prima para la elaboración del cemento. Esta subunidad presenta una continuidad en el subsuelo a profundidades

mayores a 100 metros, evidenciado a través de los de los análisis químicos y litológicos realizados en el capítulo anterior.

5.3.4. EVALUACIÓN Y CÁLCULOS DE RESERVAS

Las reservas representan la cantidad de mineral calcáreo que puede ser recuperado en el yacimiento ubicado en la hacienda San Bernardo, susceptible a una explotación minera, económicamente y ambientalmente viable. Las mismas se integran tanto con las reservas probadas como con las reservas probables, correspondientes a los recursos medidos e indicados respectivamente, de acuerdo con la clasificación del Australian Institute of Mining and Metallurgy (AIMM).

Las reservas geológicas presentes en la cantera, corresponden al material carbonático definido en este trabajo como Subunidad de Calizas Puras (litotipo 1), el cual es un material que puede ser susceptible a una explotación minera, siendo económicamente rentable como materia prima para la industria del cemento.

Los cálculos realizados para estimar las reservas del yacimiento, se fundamentaron en la información geológica suministrada por los informes finales de las campañas de perforaciones, efectuadas en los años 1998 y 2007, las cuales se realizaron a fin de determinar las características litológicas y estructurales, así como la extensión y profundidad del yacimiento.

En total se realizaron 33 sondeos exploratorios (tabla 15) en un área aproximada de 337.313,9 m² (figuras 81 - 82), con profundidades variadas, sumando 2.371 metros de perforación en total, donde se describieron diferentes litologías presentes en el subsuelo (ver anexo 10 – 12).

Campaña de Perforación	Perforación	Norte	Este	Profundidad (m)
Campaña de Perforación de 1998	PSB-01	1.121.108,48	747.798,78	35,65
	PSB-02	1.121.137,95	747.757,86	65,00
	PSB-03	1.121.052,80	747.702,43	118,20
	PSB-04	1.121.165,17	747.716,83	100,70
	PSB-05	1.121.074,24	747.671,53	121,05
	PSB-06	1.121.038,36	747.648,01	120,25
	PSB-07	1.121.004,27	747.688,63	60,05
	PSB-08	1.120.927,25	747.777,78	85,80
	PSB-09	1.121.206,80	747.746,46	72,15
	PSB-10	1.121.154,51	747.811,69	20,30
	PSB-11	1.121.216,10	747.791,44	19,95
	PSB-12	1.121.210,92	747.521,88	115,00
	PSB-13	1.121.270,84	747.603,49	26,50
	PSB-14	1.121.298,22	747.480,42	108,90
	PSB-15	1.121.253,69	747.552,75	50,90
	PSB-16	1.121.153,07	747.502,37	84,45
	PSB-17	1.121.202,12	747.709,52	99,70
	PSB-18	1.121.090,50	747.621,56	118,00
Campaña de Perforación de 2007	PSB-19	1.121.185,00	747.623,00	89,95
	PSB-20	1.121.101,00	747.568,00	110,00
	PSB-21	1.121.222,68	747.408,92	104,60
	PSB-22	1.121.138,70	747.354,42	103,20
	PSB-23	1.121.078,69	747.434,75	110,53
	PSB-24	1.121.016,64	747.513,73	47,45
	PSB-25	1.120.954,17	747.592,41	40,00
	PSB-26	1.120.891,87	747.671,22	19,80
	PSB-28	1.120.870,00	747.538,00	40,00
	PSB-29	1.120.932,19	747.459,09	40,10
	PSB-30	1.120.994,58	747.380,34	32,00
	PSB-31	1.121.054,45	747.299,97	45,00
	PSB-32	1.121.368,00	747.396,00	83,15
	PSB-31A	1.121.326,00	747.308,00	81,85

Tabla 15. Ubicación y profundidad de las perforaciones realizadas en las campañas de sondeos exploratorios de los años 1998 y 2007.

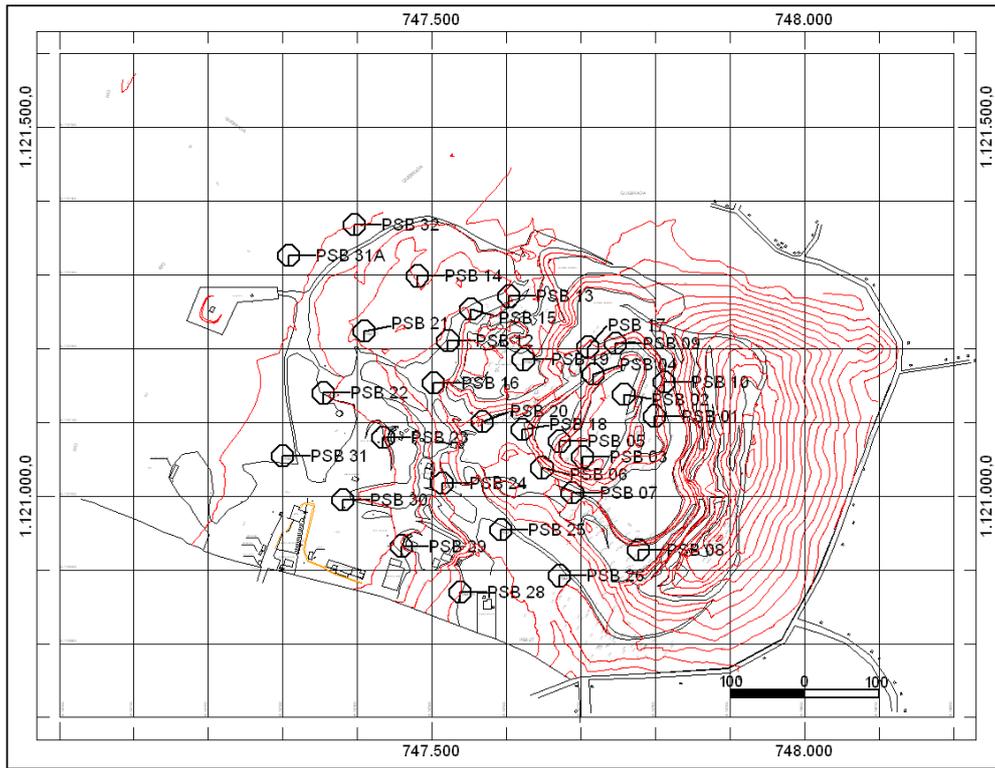


Figura 81. Mapa topográfico de la cantera San Bernardo, con la ubicación de las perforaciones realizadas en las campañas exploratorias en los años 1998 y 2007.

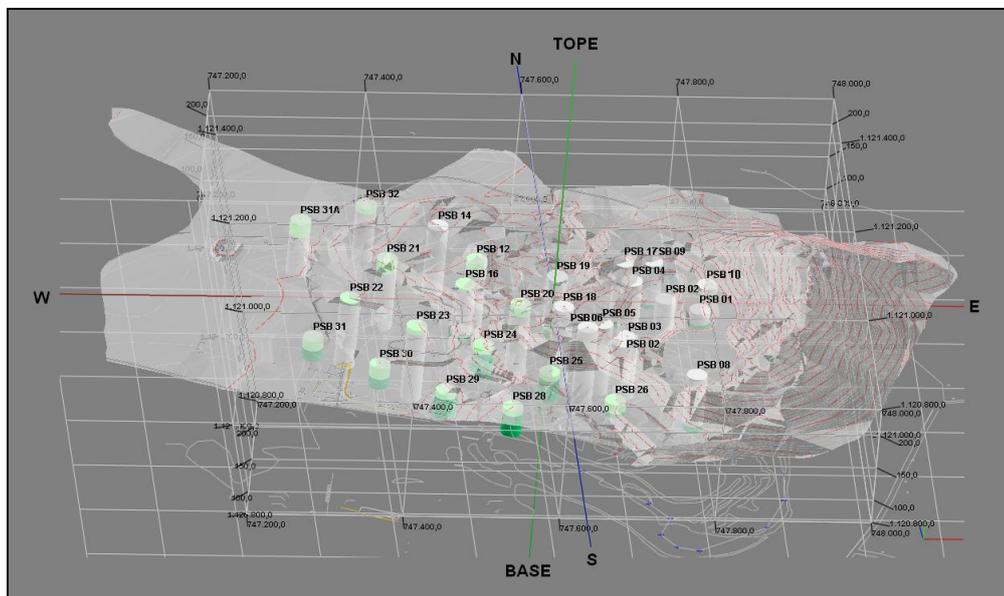


Figura 82. Mapa topográfico de la cantera San Bernardo, con la ubicación de las perforaciones realizadas en las campañas exploratorias de los años 1998 y 2007, observado en 3D mediante el uso del software Rockworks.

La primera campaña estuvo a cargo del Geólogo Manuel Erminy, la cual se basó en una malla de 50 x 50 metros para distribuir 18 sondeos, que alcanzaron distintas profundidades, sumando en total 1.424 metros de perforación. Esta campaña fue analizada químicamente en el capítulo anterior, donde se evidenció la continuidad de la subunidad de Calizas Puras a más de 100 metros en el subsuelo. Para el cálculo de reservas es importante señalar que las perforaciones PSB 13 y PSB 15 efectuadas en esta campaña, no se tomaron en cuenta debido a que no existe una descripción litológica bibliográfica, y además, se determinó mediante los análisis químicos realizados a éstas, que están constituidas por un material poco carbonático (<10 % de CaCO_3), siendo no rentable económicamente para su explotación minera.

La segunda campaña se realizó durante el año 2007, como parte del programa de reconocimiento geológico, en el cual se ejecutó una campaña de exploración de 14 perforaciones con mechas de diamante y mallado de 100 x 100 m, totalizando 947 metros de perforación.

Los análisis químicos de éstos sondeos se están realizando actualmente, por lo que para el momento de la redacción de este informe no se tiene esta información. Por ende, se tomó en cuenta las descripciones litológicas del informe realizado para esta campaña, principalmente del material carbonático, el cual se describe como una roca caliza masiva color gris claro a oscuro, fracturada, con leve meteorización, abundantes vetas de calcita y en algunas ocasiones con material arcilloso relleno las fracturas. Esta descripción evidencia que el material carbonático de esta campaña es muy similar litológicamente hablando, al material carbonático presente en la campaña de perforación realizada en el año 1998, por lo que se tomó como parte de la misma subunidad de Calizas Puras, teniendo en cuenta que esta relación se demostrará en estudios futuros, principalmente mediante análisis químicos y petrográficos.

En cuanto al resto de los materiales descritos, tanto en el informe de 1998, como en el del 2007, se tomó como estéril todo aquel material encontrado por encima de la subunidad de Calizas Puras, y como basamento todo material encontrado por debajo, para establecer con mayor facilidad los límites del yacimiento, así como también para facilitar los cálculos realizados para la estimación de las reservas (figura 83 y anexo 13).

El material clasificado como estéril para este trabajo, se presenta en las perforaciones PSB 12, PSB 16, PSB 20, PSB 21, PSB 22, PSB 23, PSB 24, PSB 25, PSB 26, PSB 27, PSB 28, PSB 29, PSB 30, PSB 31, PSB 31A y PSB 32, donde la descripción litológica bibliográfica (informes geológicos de las campañas exploratorias), describen este roca como: un material arcilloso naranja-amarillento, poco a moderadamente consolidado, clasificado como una lutita. Este material se encuentra en los primeros metros de profundidad, con espesores máximos de 19,8 metros y mínimos de 2 metros, teniendo por encima de éste pequeños espesores de material de relleno, conformados por arcillas y limos, mezclado con pequeños fragmentos de calizas, también clasificados como estéril.

Por otro lado el material clasificado como basamento, corresponde a todas las rocas encontradas por debajo del material carbonático, y en los casos en que las perforaciones no presentaron material carbonático, se tomó como basamento aquellas rocas encontradas por debajo de las lutitas descritas en el párrafo anterior.

Según la descripción bibliográfica (informes geológicos de las campañas exploratorias) en los últimos metros de las perforaciones PSB 8, PSB 9, PSB16, PSB17 y PSB 19 aparece por debajo del material carbonático entre las cotas 110 y 130, una roca color negro no calcáreo, poco consolidado, algo arcilloso, muy fracturado, posiblemente volcánico, la cual se clasificó como basamento. Mientras que en las perforaciones PSB 24, PSB 25, PSB 26, PSB 27, PSB 28, PSB 29, PSB 30 y PSB 31, las cuales no presentan material calcáreo, el basamento corresponde

a las rocas encontradas por debajo de las lutitas, teniéndose en este caso rocas metamórficas, específicamente esquitos grafitosos gris oscuro a negro masivo.

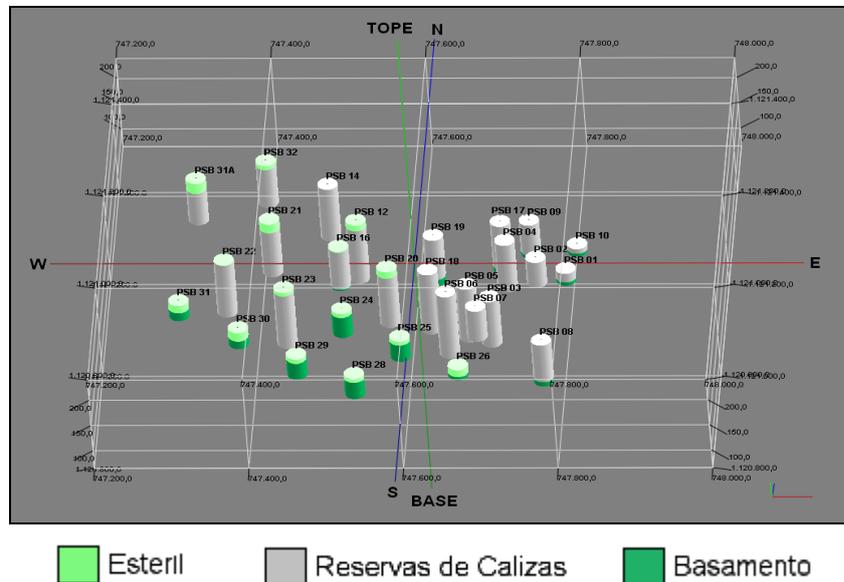


Figura 83. Ubicación de las perforaciones realizadas en las campañas exploratorias de los años 1998 y 2007, con las clasificaciones realizadas: Estéril, Reservas de Calizas y Basamento. Observado en 3D mediante el uso del *software Rockworks*.

5.3.3. CÁLCULO DE RESERVAS PROBADAS

La información geológica generada por el estudio y análisis de los sondeos exploratorios permiten definir las reservas de material carbonático (litotipo 1) como probadas. El cálculo de estas reservas se realizó por medio del método de las secciones verticales paralelas en conjunto con el método de bloques. Estos métodos se fundamentaron en la información geológica suministrada por los trabajos exploratorios realizados en los años 1998 y 2007, a partir de los cuales se dividió la parte central del yacimiento en 4 secciones verticales con orientaciones N 55° E, espaciadas aproximadamente a una distancia de 100 metros una de la otra (ver anexos 1-5), y tres bloques poligonales, ubicados suroeste y noreste del yacimiento. Se utilizaron dos métodos en conjunto, debido a la disposición irregular (métodos de bloques) y regular (métodos de secciones paralelas) de los sondeos de perforación.

Para el método de las secciones verticales paralelas se utilizaron las siguientes secciones verticales observadas en las figuras 84 (Anexos 1 - 4).

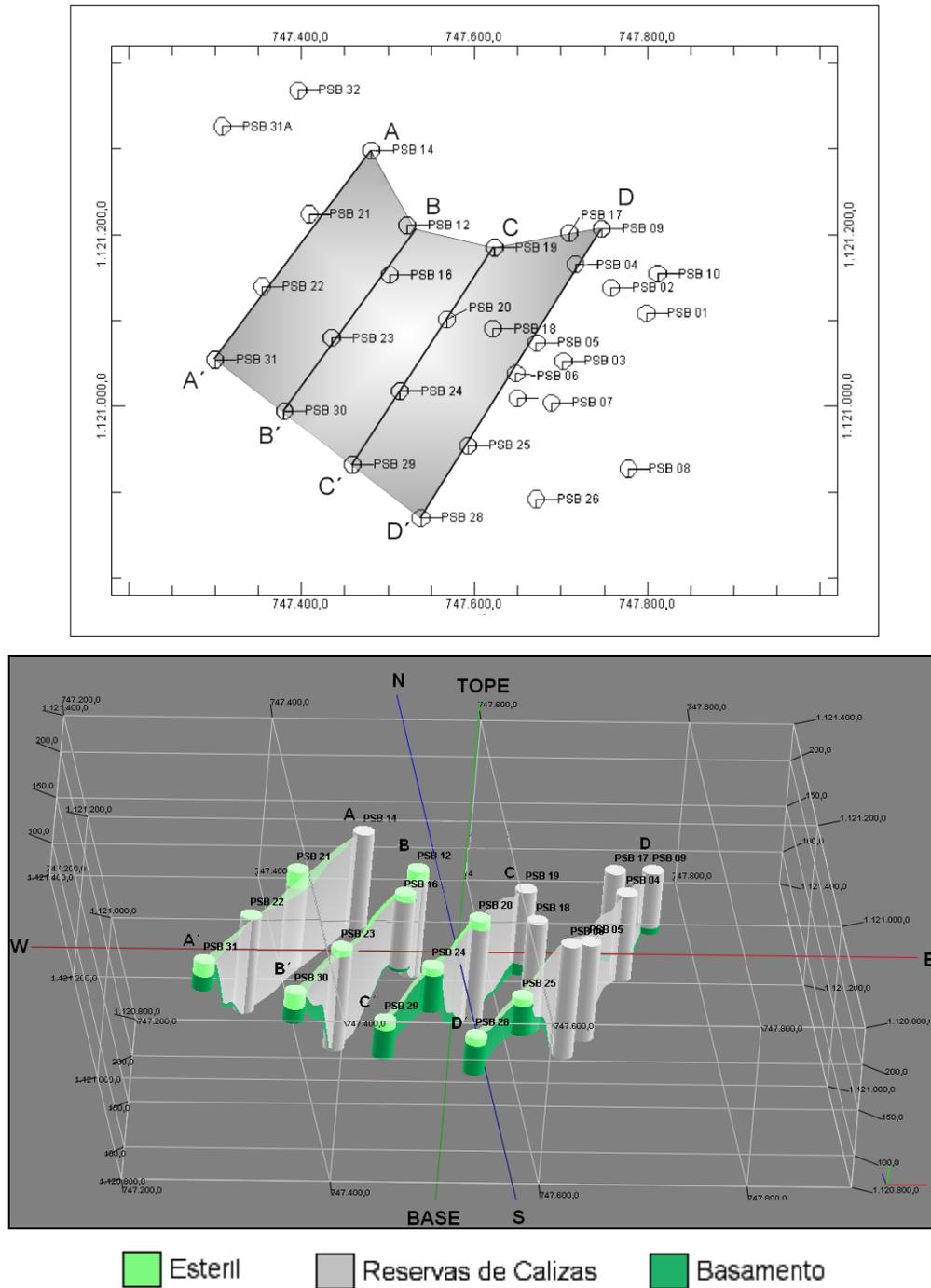


Figura 84. Área de estudio con la ubicación de los sondeos de perforación y las secciones verticales utilizadas para el cálculo de reservas mediante el método de secciones verticales paralelas, observado en la parte superior en 2D y en la parte inferior en 3D utilizando el *software Rockworks*.

Para el cálculo de reservas mediante el método de bloque, se utilizaron los poligonales irregulares observados en la figura 85.

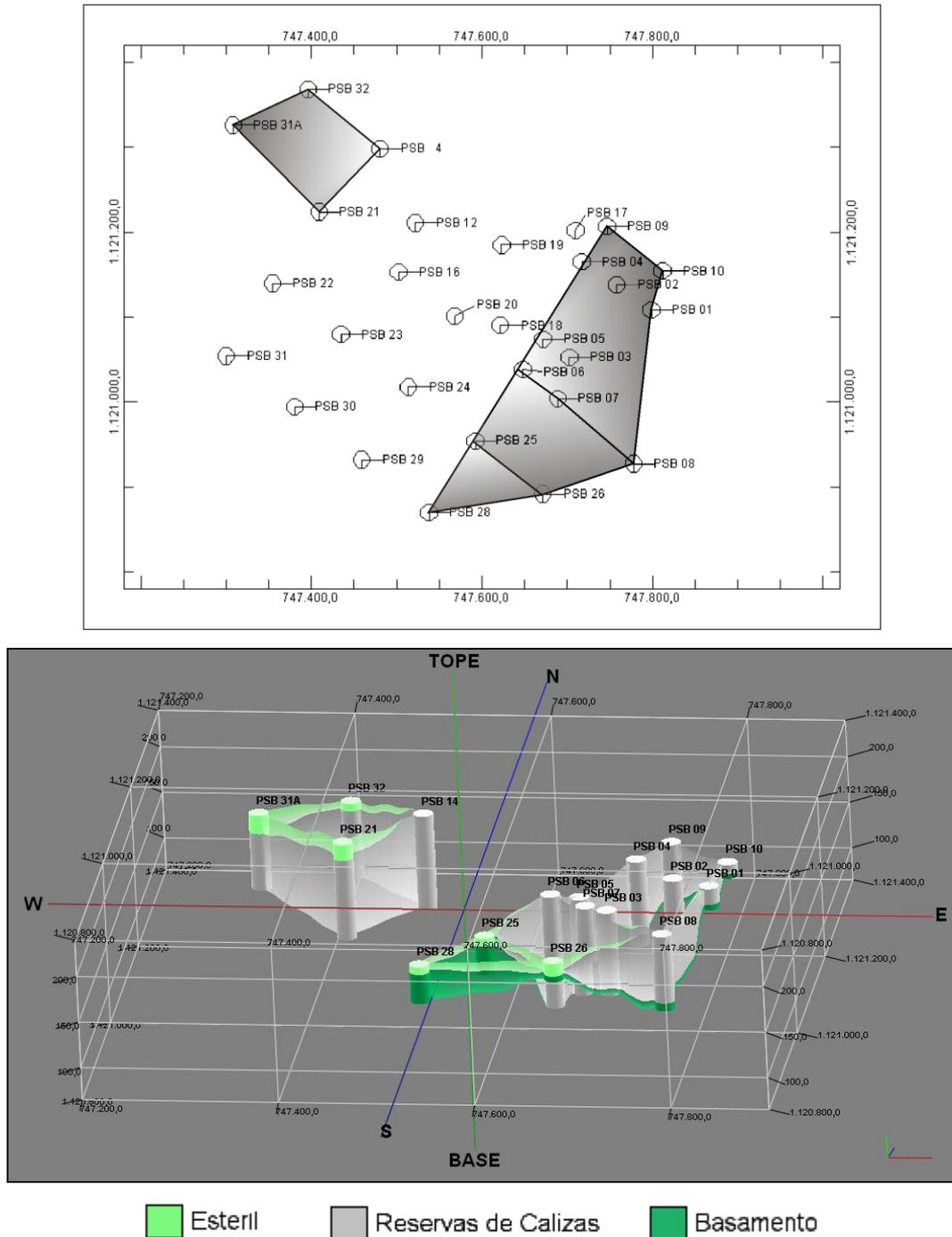


Figura 85. Área de estudio con la ubicación de los sondeos de perforación. Se observa los bloques poligonales utilizados para el cálculo de reservas mediante el método de bloques, observado en la parte superior en 2D y en la parte inferior en 3D utilizando el *software Rockworks*.

MÉTODO DE LAS SECCIONES VERTICALES PARELELAS

SECCIONES	ÁREA (m ²)	DISTANCIA ENTRE PERFILES (m)	VOLUMEN PARCIAL (m ³)
A - A´	25.965,70	100	2.293.955,2
B - B´	19.913,40	100	1.741.575,4
C - C´	14.918,10	100	2.018.650,7
D - D´	25.454,90		

VOLUMEN TOTAL (m³)	6.054.181,1
DENSIDAD PROMEDIO (tn/m³)	2,5
TONELADAS (tn)	15.135.450,05

MÉTODO DE LOS BLOQUES

BLOQUES #	VÉRTICES	ÁREA (m ²)	ESPESOR PROMEDIO (m)	VOLUMEN PARCIAL (m ³)
1	PSB 1-8-7-6-5-4-9-10	24.013,9	67,09	1.617.281,3
2	PSB 26-25-8-7-6	13.470,1	50,78	684.011,6
3	PSB 21-14-32-31A	12.181,9	81,86	997.240,7

VOLUMEN TOTAL (m³)	3.298.534,5
DENSIDAD PROMEDIO (tn/m³)	2,5
TONEDALAS TOTAL (tn)	8.463.336,2

SUMATORIA TOTAL

MÉTODOS	Volumen (m ³)	Toneladas (tn)
SECCIONES	6.054.181,1	15.135.450,05
BLOQUES	3.298.534,5	8.463.336,2

TOTAL	9.352.715,60	23.598.786,25
--------------	--------------	---------------

El total de reservas probadas del yacimiento de caliza de la cantera San Bernardo calculadas a través de la información geológica aportada por las campañas exploratorias es de 9.352.715,60 m³, lo que equivale a 23.598.786,25 toneladas, tomado en cuenta una densidad promedio de 2,5 tn/m³.

Los cálculos de reserva también fueron realizados mediante el uso del *software Rockworks*, el cual es un programa utilizado para el análisis y visualizado de cuerpos de rocas subterráneos, útil para estudios geotécnicos, mineros y petrolíferos. El programa genera un modelado 3D, a través de la información geológica suministrada por los estudios y análisis de los sondeos de exploración. Para la generación del modelo en este trabajo, se utilizó el método del IPC (Closest Point Gridding), el cual realiza un proceso iterativo que, para cada punto de una imagen, efectúa la búsqueda del vecino más cercano en la imagen a registrar por medio de una función de minimización de distancias. De esta forma, en cada iteración acerca de manera global los dos conjuntos de datos hasta lograr que ambos converjan (MOLINA et. al, 1997). Para realizar los cálculos de reservas en este *software*, se delimitó el área tomando en cuenta las perforaciones más distales del centro (figura 86).

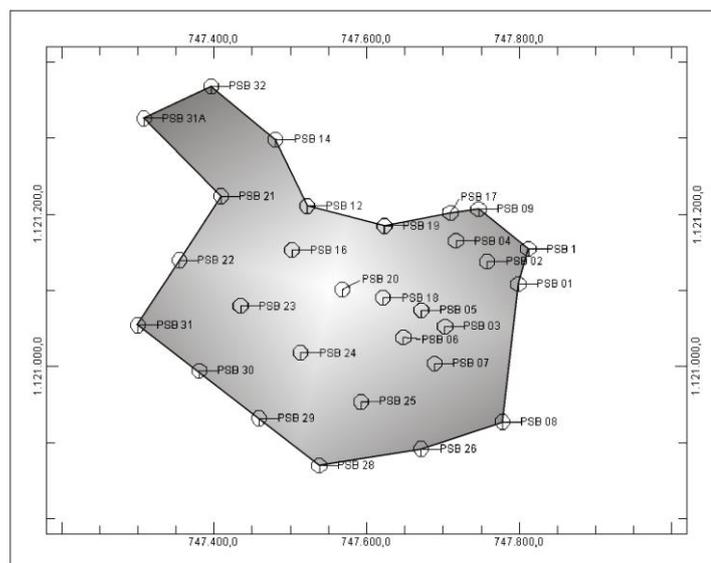


Figura 86. Zona de estudio con los sondeos de perforación y delimitación del área del yacimiento para el cálculo de reservas mediante del *software Rockworks*.

El modelado 3D generado por el *software Rockworks* se presenta a continuación (figuras 87 - 91), observándose en diferentes perspectivas.

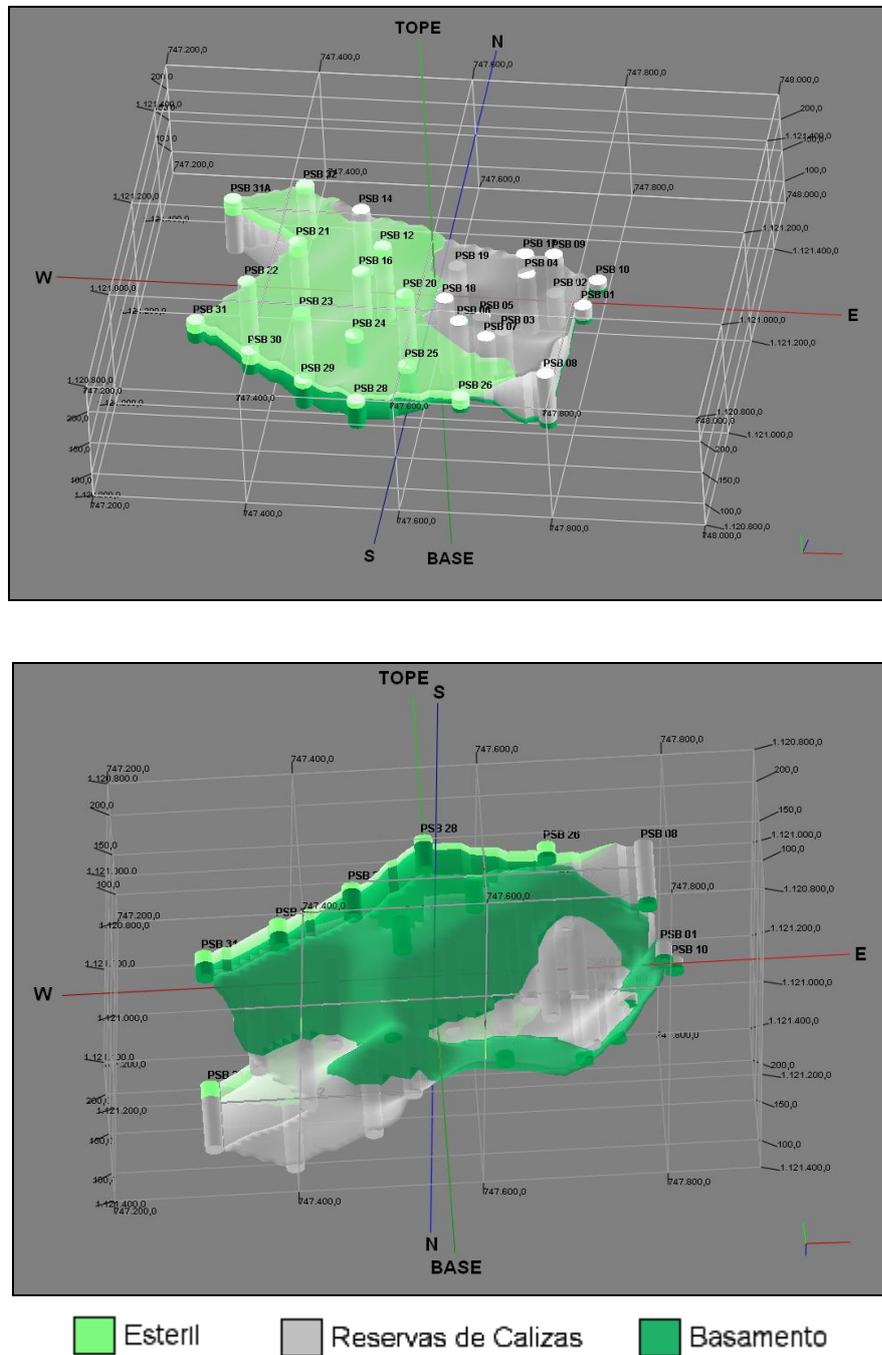
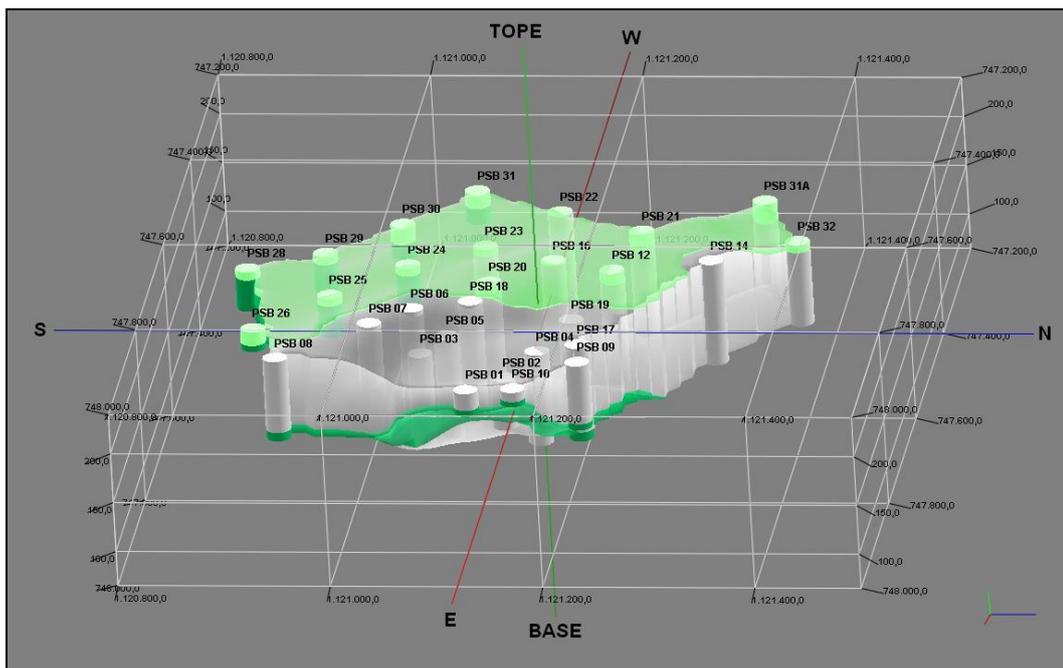
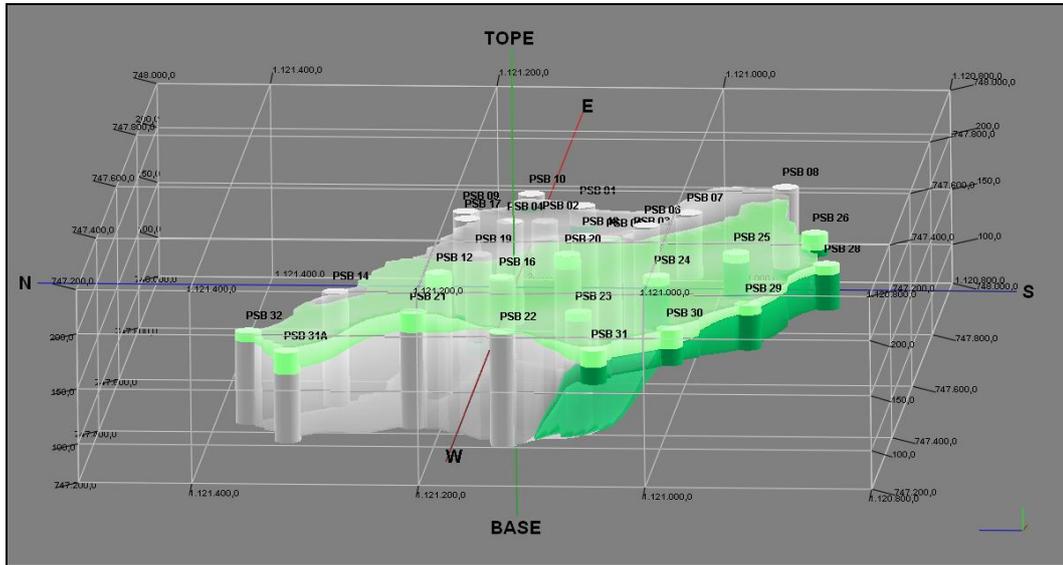
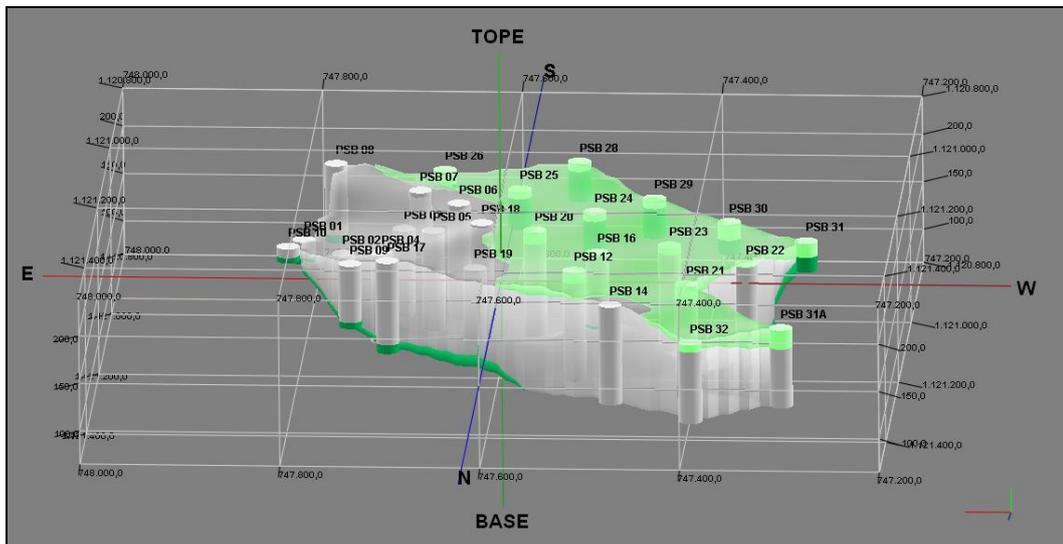
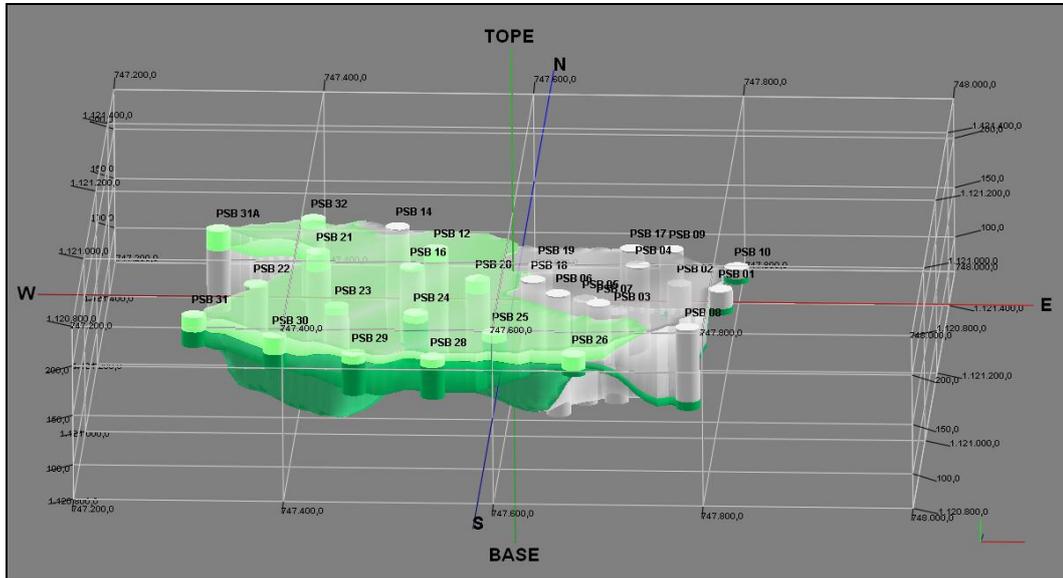


Figura 87. Modelado 3D del yacimiento de calizas localizado en la Hacienda San Bernardo, donde se observa el tope y la base de éste, junto con las perforaciones realizadas en las campañas de exploración.



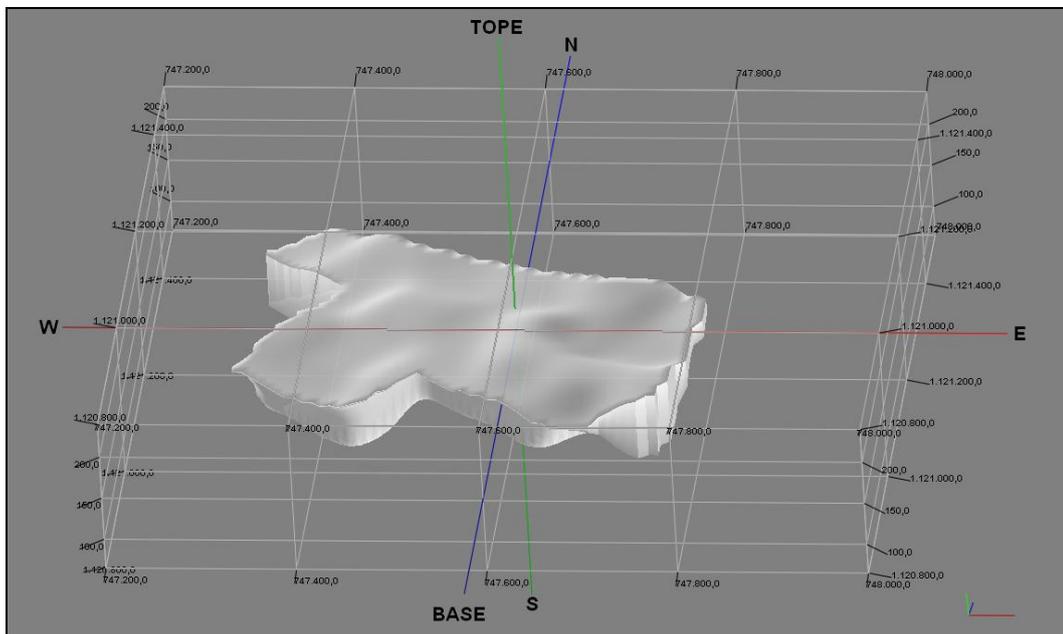
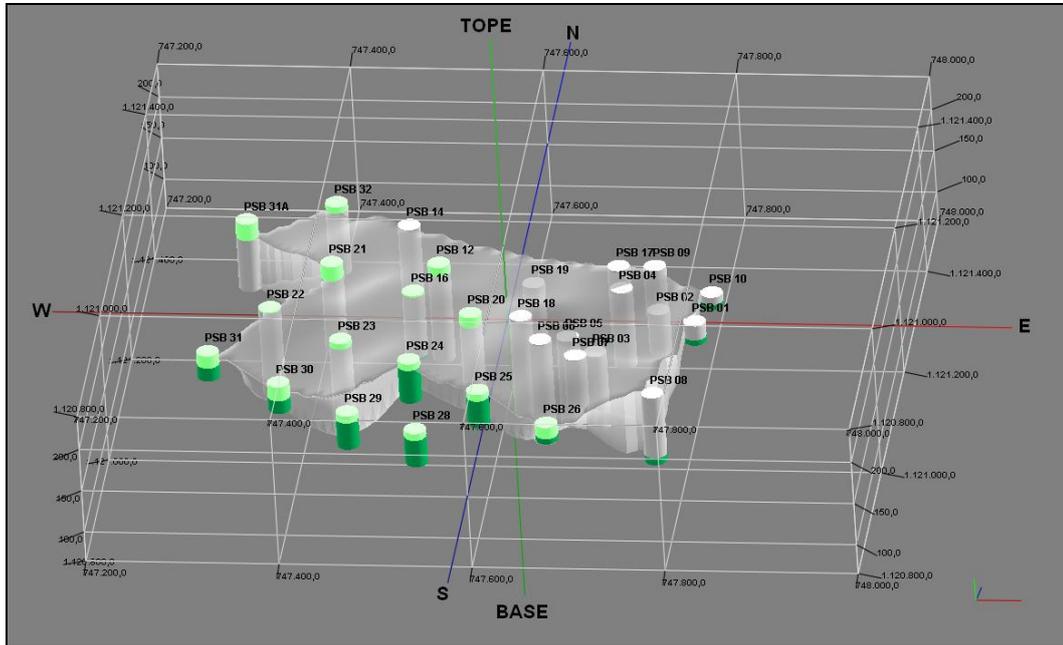
Esteril
 Reservas de Calizas
 Basamento

Figura 88. Modelado 3D del yacimiento de calizas localizado en la Hacienda San Bernardo, donde se observa la cara este y oeste del yacimiento, junto con las perforaciones realizadas en las campañas de exploración.



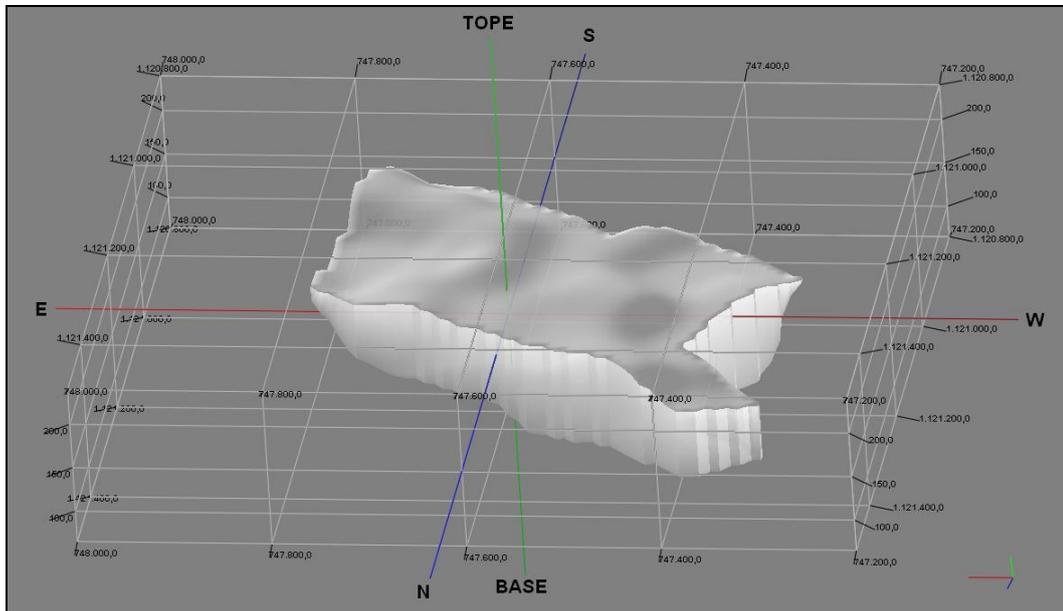
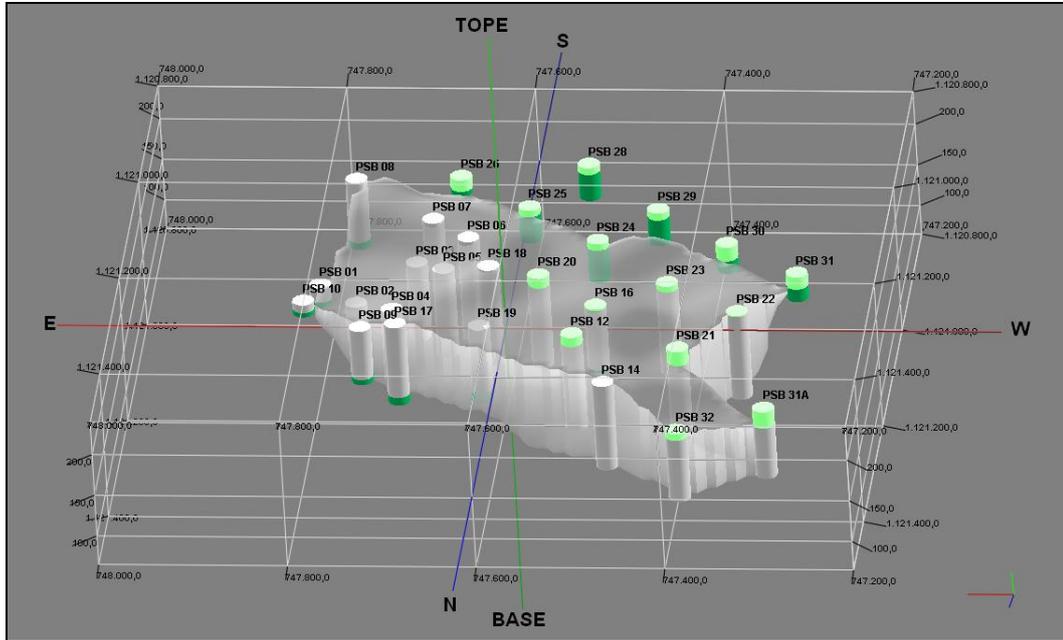
Estéril
 Reservas de Calizas
 Basamento

Figura 89. Modelado 3D del yacimiento de calizas localizado en la Hacienda San Bernardo, donde se observa la cara norte y sur de éste, junto con las perforaciones realizadas en las campañas de exploración.



Esteril
 Reservas de Calizas
 Basamento

Figura 90. Modelado 3D del yacimiento de calizas localizado en la Hacienda San Bernardo, donde se observa la cara sur del área mineralizada. En la parte posterior se observa el modelo junto con las perforaciones realizadas en las campañas de exploración.



Esteril
 Reservas de Calizas
 Basamento

Figura 91. Modelado 3D del yacimiento de calizas localizado en la Hacienda San Bernardo, donde se observa la cara norte del área mineralizada. En la parte posterior se observa el modelo junto con las perforaciones realizadas en las campañas de exploración.

Las reservas calculadas con el método de IPC (Closest Point Gridding) mediante el uso del *software Rockworks*, son estimadas en 9.632.005 m³, lo que es igual a 24.080.012,5 toneladas de material carbonático, tomando una densidad promedio de las calizas de 2,5 ton/ m³.

Cálculos geométricos realizados mediante los métodos de bloques y secciones verticales paralelas:

	Volumen (m ³)	Toneladas (tn)
TOTAL	9.352.715,60	23.598.786,25

Cálculos realizados mediante el uso del *software Rockworks*:

	Volumen (m ³)	Toneladas (tn)
TOTAL	9.746.679,1	24.366.697,75

Las reservas estimadas por el *software Rockworks*, presentan una cantidad mayor a las realizadas mediante cálculos geométricos, con una diferencia de 767.911,5 toneladas, lo que representa una variación del 3,15 %. Este aumento es relativamente bajo como para poder corroborar que los cálculos realizados mediante los métodos geométricos, son similares a los realizados a través del *software*, por lo que se verifica que los cálculos se hayan realizado correctamente. Para este trabajo se tomarán en cuenta las reservas calculada por los métodos geométricos, tomando en consideración que esta cifra puede aumentar relativamente.

5.3.4. CALCULOS DE RESERVAS PROBABLES

Las reservas probadas, debido al conocimiento geológico que se tiene de los mismos a través de las perforaciones según fue interpretado por los métodos geométricos, suman un aproximado de $9.352.715,60 \text{ m}^3$, los cuales representan 23.598.786,9 de toneladas métricas.

También, existe la posibilidad de que haya una continuidad del yacimiento hacia la zona del polvorín, ubicada noroeste de la cantera, lo que sugiere una cantidad considerable de reservas probables, siendo estimados tentativamente en más de $1.135.957,28 \text{ m}^3$, que deben ser confirmados. Esta estimación se realiza a través de la información geológica generada por las perforaciones PSB 31A, PSB 21 y PSB 22, como se observa en la figura 92.

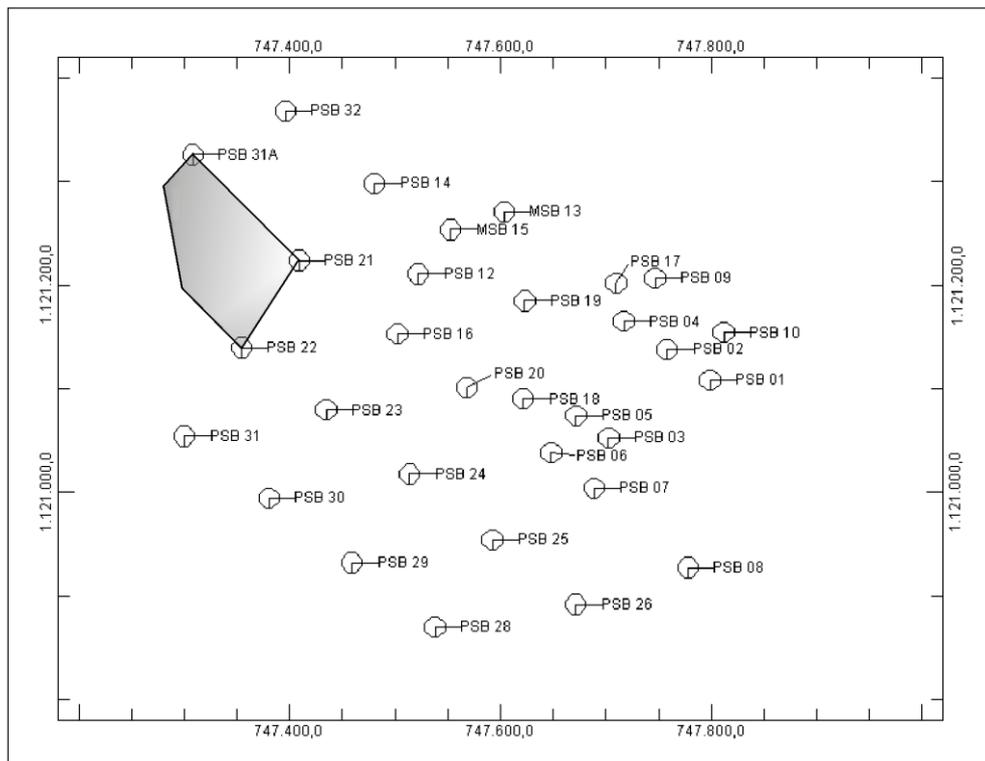


Figura 92. Área de estudio con la ubicación de los sondeos de perforación. Se observa los bloques poligonales utilizados para el cálculo de reservas mediante el método de bloques.

MÉTODOS DE LOS BLOQUES

BLOQUE	VÉRTICES	ÁREA (m ²)	ESPESOR PROMEDIO (m)
1	PSB 31A-21-22	13.659,9	83,16

VOLUMEN (m ³)	1.135.957,28
DENSIDAD PROMEDIO (tn/m ³)	2,5
TONEDALAS (tn)	2.839.893,21

5.3.4. CALCULOS DE RESERVAS TOTALES

El total de reservas del yacimiento de caliza de la cantera San Bernardo, lo constituyen tanto las reservas probados como las probables, ya que de ellos es que se tiene un conocimiento geológico razonable sustentado en la información geológica obtenida de los núcleos de las perforaciones.

RESERVAS PROBADOS

VOLUMEN (m ³)	9.352.715,60
DENSIDAD PROMEDIO (tn/m ³)	2,5
TONEDALAS (tn)	23.598.786,25

RESERVAS PROBABLES

VOLUMEN (m ³)	1.135.957,28
DENSIDAD PROMEDIO (tn/m ³)	2,5
TONEDALAS (tn)	2.839.893,21

SUMATORIA TOTAL

RESERVAS	Volumen (m ³)	Toneladas (tn)
PROBADOS	9.352.715,60	23.598.786,25
PROBABLES	1.135.957,28	2.839.893,21

TOTAL	10.488.672,88	26.438.679,46
--------------	---------------	---------------

Las reservas probadas como con las reservas probables, correspondientes a los recursos medidos e indicados respectivamente, de acuerdo con la clasificación del Australian Institute of Mining and Metallurgy (AIMM), se encuentran representadas por el litotipo 1, explicado al comienzo de este capítulo.

Además de las reservas probadas y probables, es posible que existan una mayor cantidad de material carbonático como continuidad del yacimiento hacia el noroeste, sumado con los recursos de las perforaciones que no llegaron al basamento, representadas por la mayoría de las de éstas: PSB 2, PSB 3, PSB 4, PSB 5, PSB 6, PSB 7, PSB 12, PSB 14, PSB 18, PSB 20, PSB 21, PSB 22, PSB 23, PSB 31A y PSB 32. Estos recursos se clasifican según la AMIC/AIMM, como recursos inferidos debido a su escasa información geológica, por lo que no se toman en cuenta para el cálculo total de reservas.

Para el cálculo total de las reservas no se aplicó un tenor límite de corte que restrinja la explotación de caliza de acuerdo a la calidad, debido a que el yacimiento es muy homogéneo, como se determinó en los análisis químicos realizados en la campaña de perforación del año 1998. Como no se tiene información sobre la campaña realizada en el 2007, se tomará como una interpolación de la campaña del 98 con las mismas características químicas que

presenta la roca, tomando en cuenta que con estudios futuros esta información será verificada, por lo que también no se toma en cuenta un tenor límite de corte para esta campaña.

5.3.6. CÁLCULO DE ESTÉRIL

Para la explotación del material carbonático ubicado en la zona noreste de la cantera, es necesario la extracción de una capa considerable de estéril, la cual está representada por un espesor menor de material de relleno y un espesor mayor de material arcilloso naranja-amarillento, poco a moderadamente consolidado, clasificado como una lutita según los informes realizados en las campañas de exploración.

El material estéril se encuentra en los primeros metros de profundidad, con espesores máximos de 19,8 metros y mínimos de 2 metros, ubicado en algunas perforaciones por encima del material carbonático., y en otros casos por encima del basamento.

Parte de la evaluación del yacimiento es determinar el volumen de estéril que debe ser removido para efectuar la explotación minera del material económicamente rentable, que en este caso corresponde a rocas calizas con altas concentraciones de CaCO_3 .

El cálculo del volumen de estéril se realizó directamente en el *software Rockworks*, en donde se delimitó el área que éste abarca, tomando en cuenta únicamente las perforaciones que presentan este material por encima del material carbonático (figura 93 - 95).

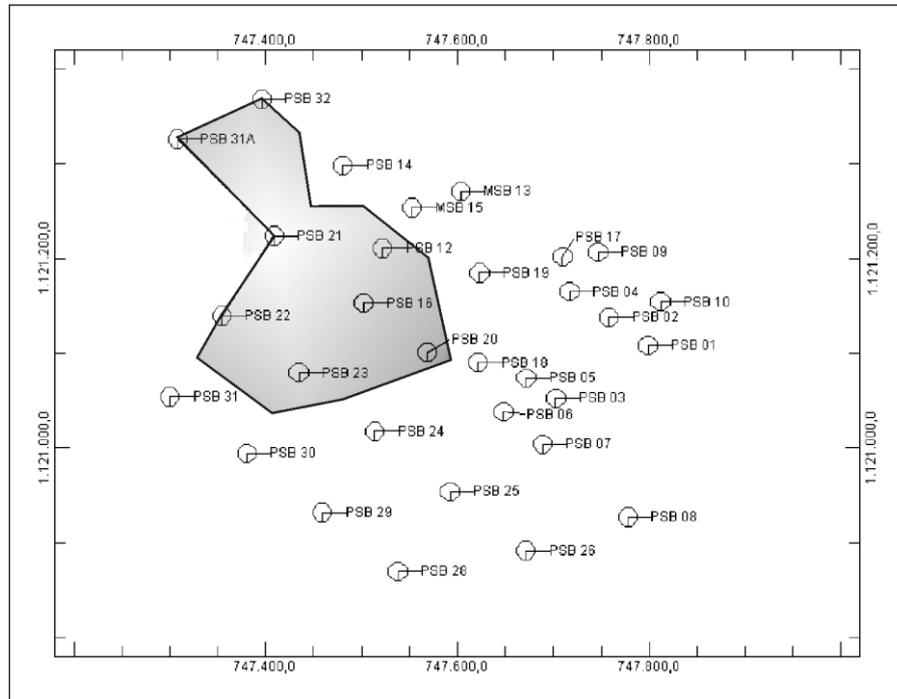


Figura 93. Mapa topográfico del área de estudio con la ubicación de los sondeos de perforación y delimitación del área con material estéril.

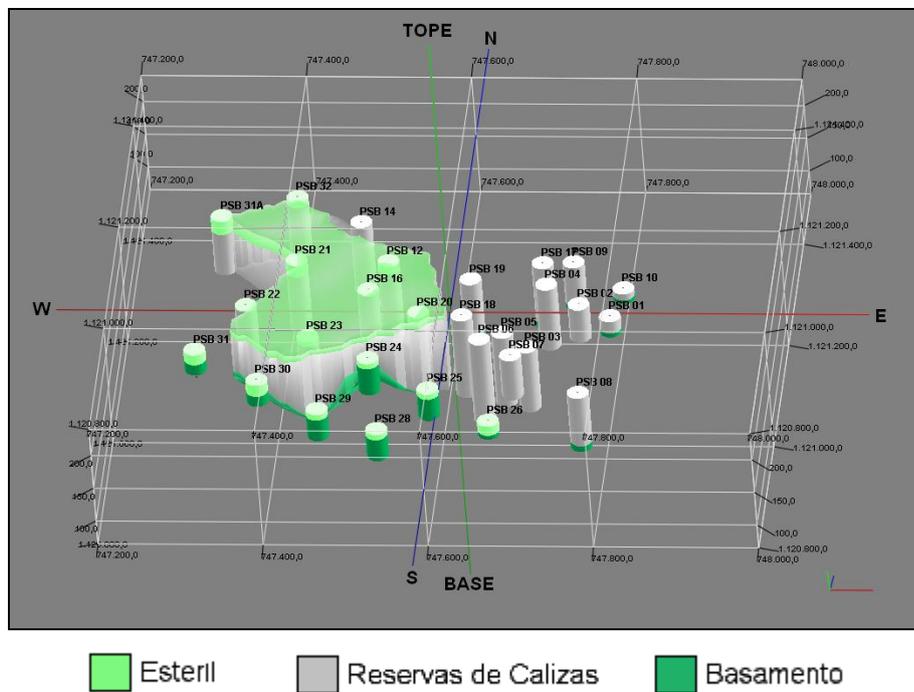


Figura 94. Modelado 3D con la ubicación de los sondeos de perforación y delimitación del área con material estéril.

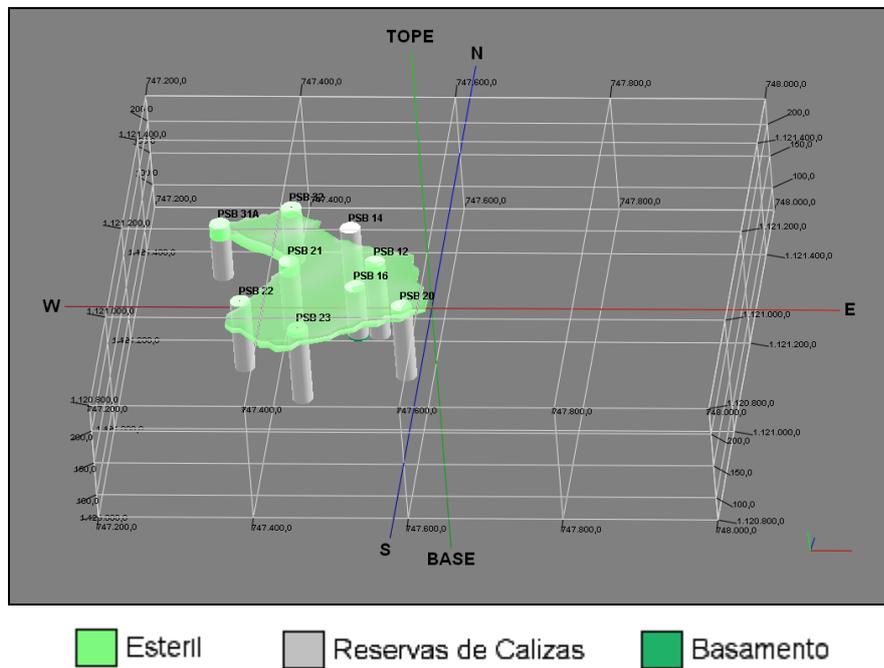


Figura 95 Modelado 3D del material de estéril con la ubicación de los sondeos de perforación que presenta este material.

El volumen del material clasificado como estéril, calculado mediante el *software Rockworks*, es de 456.643 m³, lo que equivale a 1.073.111,05 toneladas, tomando en cuenta una densidad promedio de 2,35 tn/m³.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalizado el procesamiento e interpretación de los datos recolectados durante el presente estudio, se concluyen los siguientes aspectos más resaltantes:

- En el área estudiada afloran principalmente rocas sedimentarias, de las cuales se reconocieron tres tipos litológicos abarcando un área total de 109.400,3 m², y en menor proporción a rocas metaígneas con un área más restringida de 1.727 m², donde se reconoció un solo tipo litológico.
- Estas unidades establecidas informalmente, pudieron ser correlacionadas con las unidades formales que menciona la literatura, de acuerdo las características lito-químicas analizadas. A continuación (tabla 16) se muestra las unidades establecidas y su correlación:

UNIDADES INFORMALES DEFINIDAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	UNIDADES FORMALES E INFORMALES BIBLIOGRÁFICAS
Unidad de Calizas Bioclásticas	Unidad informal: Calizas Paleocenas , correlacionables con la unidad formal: Miembro Morro del Faro , Formación Guárico
Unidad de Wacas Líticas	No se encuentran descritas en ninguna unidad formal ni informal.
Unidad de Areniscas Líticas Volcánicas	
Unidad Metavolcánica	Unidad formal: Formación Tiara

Tabla 16. Unidades establecidas en campo y su correlación con unidades formales que señala los trabajos previos

- Las discontinuidades con mayor frecuencia en el área de estudio son las diaclasas, observadas esencialmente en la subunidad de Calizas Puras, y muy escasamente en la unidad Metavolcánica. Para la unidad sedimentaria se observaron rasgos estratigráficos

escasamente definidos, por lo que no se asegura la existencia definitiva de planos de estratificación en esta unidad.

- De acuerdo los procesos diagenéticos identificados en el estudio petrográfico se determinó una etapa diagenética tardía tanto para la unidad de Calizas Bioclástica, como para la unidad de Wacas Líticas.
- En base a los estudios petrográficos realizados en la unidad Metavolcánica, se le asignó un tipo de metamorfismo de muy bajo grado, correspondiente a la facies de la Prehnita-pumpellyíta.
- La unidad sedimentaria carbonática, definida como Calizas Bioclástica corresponde a ambientes marino-costeros de aguas someras, en los subambientes de arrecife, plano arrecifal y parte de laguna interna. La depositación de estas rocas en conjunto con las otras unidades sedimentarias definidas en este trabajo, corresponden a una zona volcánica de un arco volcánico insular.
- De acuerdo a la evaluación química realizada para el yacimiento se estableció que la subunidad de Caliza Puras, presenta promedios de concentraciones mayoritarias de: 94,36% CaCO_3 ; 2,31% SiO_2 ; 0,66% Al_2O_3 , 0,45% Fe_2O_3 y 0,35% MgO .
- A través de los análisis químicos realizados a los sondeos de las campañas exploratorias, se determinó la continuidad de la subunidad de Calizas Puras hacia el subsuelo, a profundidades mayores a 100 metros.

- El total de reservas del yacimiento de caliza de la cantera San Bernardo (probadas y probables) se calculan en aproximadamente 10.488.672,88 m³, haciendo un total de 26.438.679,46 toneladas métricas.

Una vez llegado a estas conclusiones, también cabe mencionar algunas recomendaciones importantes:

- Una vez que se obtengan los resultados químicos de los núcleos de las perforaciones de la campaña exploratoria efectuada en el año 2007, se recomienda realizar un análisis químico-litológico para determinar con mayor precisión la continuidad hacia el subsuelo de la subunidad de Calizas Puras, la cual es el tipo químico-litológico clasificado como materia prima óptimo para la elaboración del cemento.
- Se recomienda realizar perforaciones exploratorias al norte y noroeste de la cantera para delimitar con mayor precisión el yacimiento carbonático. Hacia la zona norte se localizan las perforaciones PSB 13 y PSB 15, de las cuales no se tiene información bibliográfica en cuanto a sus descripciones litológicas, por lo que no se define los límites en esta zona, mientras que hacia la zona noroeste las perforaciones PSB 31A, PSB 32, PSB 22 y PSB 21, presentan espesores mayores de 50 metros de material carbonático, de lo cual se infiere su continuidad hacia la zona donde se encuentra el polvorín.
- La delimitación del yacimiento también se pueden realizar mediante métodos geofísicos, por lo que se recomienda el uso de

esta rama científica para la elaboración de modelos y perfiles del subsuelo, que aporten con mayor información geológica.

- Realizar un estudio paleontológico más detallado de la variedad fósil encontrada en el área de estudio.
- Realizar un estudio más detallado de los núcleos de las perforaciones efectuadas tanto en el año 1997 como para las efectuadas en el 2007.
- Realizar una investigación regional para determinar la génesis de estos parches sedimentarios encontrados en un contexto metamórfico.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUERREVERE, S. E. & ZULOAGA G. (1937)-a. Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Bol. Geol. y Min., Caracas, 1(2-4): 3-22.
- AQUINO, R. (1983). Geología de una zona ubicada al sur de Tiara y este de San Sebastián, edo. Aragua. UCV, Fac. Ingeniería, Escuela de Geología, Trabajo especial de Grado, Escuela de Geología. Universidad Central de Venezuela, Caracas. inédito, 229 p.
- AUDEMARD, F. (1984). Evaluación geológica de la cuenca del Tuy para fines de investigaciones neotectónicas. Trabajo especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- ALBERTOS, M. (1989). Estudio geológico de las Secciones: Altigracia de Orituco-Agua Blanca, Gamelotal-San Francisco de Macaira. Análisis Petrográfico y Estadístico de la Formación Guárico. Trabajo Especial de Grado, Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- AGUASUELOS INGENIERÍA (1990). Modernización de los datos geológicos en el frente de montañas, preparado para CORPOVEN S. A., Informe interno, 5 tomos, 1023 pp. 126 lams. 53 fig.
- ARCHE, A. (1992). Sedimentología. Vol. II. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 543 p.
- ADAMS, A.E. MACKENZIE W.S. Y GUILFORD, C. (1997). Atlas de Rocas Sedimentarias. Masson, SA 106 p.

- BELL, J. S. (1968). Geología del área de Camatagua, Estado Aragua, Venezuela. Bol. Geol., Caracas, 9 (18) : 291-440.
- BECK (1985). Géologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas. Société Géologique du Nord. Publication n° 14. 462 p.
- BECERRA, M. & GÓMEZ, M, (1987). Geología sedimentaria de una zona ubicada al norte de la población de Jají, estado Mérida. Estudio de rocas fosfáticas. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito. 139 p.
- BUSTILLO M. & LÓPEZ C. (1997). Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras. Editorial Masson, S.A. Barcelona, España. 457p.
- BAUTISTA, D. & BORNEO, G. (2003). Caracterización Diagenética de los Carbonatos de la Formación Querecual en la Isla Chimana Grande, Edo. Anzoátegui. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- BAAMONDE J. (2006). Petrología. Instituto de Ciencias de la Tierra, UCV, Facultad de Ciencias, pp 363.
- BAAMONDE J. (2009). Carbonatos Origen y Sedimentación. Instituto de Ciencias de la Tierra, UCV, Facultad de Ciencias, pp 270.
- ERMINY, M. (1998). Informe geológico de avance del yacimiento de roca caliza cantera San Bernardo. Información técnica.

- FURRER, M. & URBANI, F. (1973). Nuevas localidades fosilíferas en cuevas ubicadas en las formaciones Las Mercedes y Guárico. Bol. Soc. Venez. Espeleología, 4 (2) : 135-139.
- FURRER, M., URBANI, F. & ZAPATA, E. (1986). Rocas Cretácicas y Paleocenas en el sureste de Ocumare del Tuy, Estado Miranda. Bol. Geociencias, U.C.V., Dept. Geol., (2) : 34 – 48.
- FÁBRICA NACIONAL DE CEMENTOS. (2001). Manual de aseguramiento de la Calidad. Gerencia de Planta. ISO-9000, Ocumare del Tuy. Información Técnica.
- FÁBRICA NACIONAL DE CEMENTOS. (1998). Proceso productivo de la Planta Ocumare. Ocumare del Tuy. Información Técnica.
- GONZÁLEZ DE JUANA C., ITURRALDE J. & PICARD (1980). Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Ediciones Foninves. Tomo I, 407 pp.
- _____ (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Edic. Foninves, Caracas, 2 vols., 1031 p.
- GRATEROL, M. (1972). Petrogénesis de la peridotita de Loma de Hierro, estado Aragua. Mem. VIa. Conf. Geol. Caribe, Margarita, Venezuela, p. 329-336.
- GEOCONSULTA C.A. (1999-2001). Plan de explotación cantera San Bernardo. Fábrica Nacional de Cementos. Información técnica.
- GEOCONSULTA C.A. (2001). Plan de explotación cantera El Melero. Fábrica Nacional de Cementos. Información técnica.

- GARRITY, C; HACKLEY, P.; URBANI, F. (2005). Mapa geológico de Venezuela. USGS. FUNVISIS y Escuela de Geología, Minas y Geofísica UCV.
- KERRR, P. (1965). Mineralogía Óptica. Tercera Edición, McGraw-Hill Book Company, New York, 443 pp.
- KONIGSMARK, T. A. (1965). Geología del área de Guárico septentrional-Lago de Valencia, Venezuela. Bol. Geol., 6(11): 209-285.
- KAZHDAN, A, (1982). Prospección de yacimientos minerales. Primera edición. España. Impreso por Gráfica Chile. Madrid, España. 587-p.
- LONGMAN, M.W. (1982) Carbonate Diagenesis as a Control on Stratigraphic Traps. Am. Assoc. Petrol. Geol., Education Course Note Series # 21, 56-91.
- MENÉNDEZ, V. (1966). Tectónica de la parte central de la montañas occidentales del Caribe, Venezuela. Bol. Geol., Caracas, 8(15): 116-139.
- MOLINA, E. (2002). Micropaleontología. Prensas Universitarias de Zaragoza, Colección Textos Docentes, Zaragoza, 634 p.
- NAVARRO, E. (1983). Petrología y petrogénesis de las rocas metavolcánicas del Grupo Villa de Cura. Revista Geos, Caracas, 28: 170-317.
- ORTA, M.C. (2003). Integración geológica de la región de Caracas-Charallave-Santa Teresa del Tuy. Distrito Capital y estado Miranda. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Geología. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- PEIRSON, A.L. (1965). Geology of North Central Venezuela. Lagoven S.A. Informe 3000.11.5, Inédito.
- PEIRSON, A.L., SALVADOR A. & STAINFORTH R. (1966). The Guárico Formation of North-Central Venezuela. Bol. Inf. Asoc. Vzla. Min-Petrol., 9 (7): 183-224.
- PIBURN, M. D. (1968). Metamorfismo y estructura del grupo Villa de Cura, norte de Venezuela, Bol. Geol., Caracas, 9(18): 183-290.
- PETTIJOHN, F., POTTER, P. & SIEVER, A. (1972). Sand and Sanstone. Springer – Verlag. New York – Heidelberg, 618 p.
- RENZ, H. H. (1955). Some Upper Cretaceous and Lower Tertiary foraminifera from Aragua and Guárico, Venezuela. Micropaleontology, 1: 52-71.
- QUINTÍN, C., QUINTERO, A. & ESTÉVEZ, E. (1997). Elementos de Geoestadística. Cruz. Universidad de Pinar del Río, Cuba. 32 p.
- SMITH, R. J. (1952). Geología de la región de Los Teques-Cúa, Bol. Geol. (Venezuela), 2(6): 333-406.
- SHARP, W.W. (1956). Previously unmapped limestone outcrops near Ocumare del Tuy, estado Miranda. Informe inédito, LAGOVEN 2100. 11.5. (Consiste en el memo, GSG-32 de Caracas, 17-5-56, preparado por Sharp y firmado por G.R. Pierce.
- SHAGAM, R. (1965). Geología de Aragua central (Venezuela). III Cong. Geol. Venez., Caracas, 1959, 2: 574-675.

- SEIDERS, V. M. (1965). Geología de Miranda Central. Bol. De Geol. (Venezuela) Vol. 6., Nº 12, p. 289-410.
- SCASSO, R. A. & LIMARINO, C. O. (1997). Petrología y Diagénesis de Rocas Clásticas. Asociación Argentina de Sedimentología. Publicación Especial Nº 1. Buenos Aires. 257 p.
- SANDOVAL, M. (2000). Diagénesis de areniscas. Universidad Central de Venezuela, Caracas, 414p.
- SKOOG, D., HOLLER, J. & NIEMAN, T. (2000) "Principios de Análisis Instrumental", Quinta Edición, McGraw Hill, Madrid, 2000.
- SAYA, R. (2001). Plan de Explotación de la Cantera San Bernardo, Ubicada en el Municipio Tomas Lander del Estado Miranda. Trabajo especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- URBANI, F. (1982). Comentarios sobre algunas edades de las rocas de la parte central de la Cordillera de la Costa. Geos, U.C.V., Caracas, 27: 77-84.
- URBANI, F., CHIRINOS, A. & MARQUINA, M. (1990). Geología del área de Guatopo - El Guapo. Estado Miranda y Guárico. Parte 1: Grupo Villa de Cura. Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV, Caracas, 5(1): 96-124.
- URBANI, F. (2002). Nomenclatura de las Unidades de Rocas Ígneas y Metamórficas de la Cordillera de la Costa. Geos, U.C.V., Caracas., 35 (2002). pp. 107.

- URBANI, F. & RODRÍGUEZ J. (2003). Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Edic. UCV y FUNVISIS, Caracas, 148 hojas geológicas a escala 1:25.000.
- WINKLER, M. (1953). The Ocumare Basin, Edo. Miranda, Venezuela; an unusual basin structure. Congress Geol. Int., Comptes rendus de la Dix-nouvieme Session, Alger 1952. Section III, Mecanique de la deformation de Roches, Influence sur les conceptions tectoniques, Fascicule III, p. 89-92.
- WINKLER, M. (1956). Geological notes on the southern part of the Ocumare basin, Edo. Miranda, Venezuela. Min. Energía y Minas, Biblioteca General, Informe 550 V3 W775, 20 p. (sin fecha pero contiene citas de 1956. Tiene observaciones críticas manuscritas por Virgil Winkler.
- WERHMANN, (1972). Geología de la región de Guatire - Colonia Tovar. Bol. Geol., Caracas, Public. esp. 5, 4: 2093-2121.
- WILSON, J. (1975). Carbonate facies in geologie history. Springer Verlarg, New York, 170 Pp.
- WINKLER, H.F. (1979). Petrogénesis de rocas metamórficas. España, Ed. H. Blume., 346p.
- YARDLEY, B., MACKENZIE, W. & GUILFORD, C. (1997). Atlas de rocas metamórficas y sus texturas. Masson.
- ZAMBRANO, A. (1970). Estudio Fisiográfico de la Cuenca del Tuy. Bol. Geol. 11(21): 3-206.

ZAPATA, E. (2003) Impacto de la Diagénesis en la Composición Isotópica de los Carbonatos Cenomaniense-Campaniense de la Formación La Luna en Venezuela Occidental. Tesis Doctoral. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Referencias de Internet:

MINISTERIO DE ENERGÍA Y PETRÓLEO. (PDVSA). INTEVEP. Código Geológico de Venezuela. (Documento en línea). Disponible: <http://www.pdvsa.com/lexico>. Consulta: 20 de febrero de 2010.

Imagen satelital del estado Miranda. <http://maps.google.es/>. Consulta: 10 de enero de 2010.

Mapa político del estado Miranda. <http://www.venezuela-online.net>. Consulta: 12 de enero de 2010.

ANEXOS