



Libertad y Orden

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

PROYECTO SUB09-21: AGUAS SUBTERRÁNEAS

MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA ALTA GUAJIRA

Bogotá, diciembre de 2011

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO



**REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**

MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA ALTA GUAJIRA

**Jairo Veloza Franco
Subdirección de Recursos del Subsuelo**

Bogotá, diciembre de 2011

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
1.GENERALIDADES	14
1.1 LOCALIZACIÓN	14
1.2 OROGRAFÍA	14
1.3 CLIMA.....	15
1.4 VÍAS DE ACCESO.....	15
1.5 SUELOS	16
1.6 HIDROGRAFÍA.....	17
2.GEOLOGÍA	19
2.1 ROCAS METAMÓRFICAS.....	19
2.1.1 Neis de Macuira (Pznm)	19
2.1.2 Complejo Estructural de Alas (K?cea)	21
2.1.3 Formación Paraúinkrein (Ksp)	22
2.2. ROCAS ÍGNEAS	24
2.2.1 Granodiorita de Siapana (Jgs)	24
2.3 ROCAS SEDIMENTARIAS	26
2.3.1 Unidades Terciarias	26
2.3.2 Formación Siamaná (Es).....	26
2.3.3 Formación Uítpa (Eu)	31
2.3.4 Formación Jimol (Nj).....	34
2.3.5 Formación Castilletes (Nc)	37
2.4 DEPÓSITOS CUATERNARIOS	40
2.4.1 Depósitos de Cauce Aluvial (Qca)	40
2.4.2 Depósitos Eólicos (Qe)	42
2.4.3 Depósitos de Llanuras de Inundación (Qlli).....	43
2.4.4 Depósitos de Llanuras Intermareal (QII).....	45
2.4.5 Depósitos Evaporíticos Recientes (Qes).....	46
3.ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO	48
3.1 HUMEDAD RELATIVA (%).....	48
3.2 BRILLO SOLAR (H/DÍA)	49
3.3 PUNTO DE ROCÍO	50
3.4 PRECIPITACIÓN (P)	50
3.5 TEMPERATURA (°C)	54
3.6 ECUACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO – CÁLCULO DE PARÁMETROS	55

3.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR)	57
4.PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA	59
4.1 CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS.	59
4.2 ASOCIACIÓN DE RESISTIVIDADES CON TIPOS DE ROCA O MATERIAL	60
4.3 MAPAS DE ISORRESISTIVIDAD	61
4.4 PERFILES GEOELÉCTRICOS	64
4.4.1 Perfil 1.	65
4.4.2 Perfil 2	66
4.4.3 Perfil 3	67
5.INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	68
6.PRUEBA DE BOMBEO Y EVALUACIÓN HIDRÁULICA.....	74
6.1 FLUJO ESTABLE.....	74
6.1.1 <i>Flujo radial no equilibrado en acuíferos confinados (transient regime)</i> 74	
6.2 INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS	77
6.3 TRANSMISIVIDAD (T)	77
6.4 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S):	79
6.5 CAPACIDAD ESPECÍFICA DEL POZO (CE):.....	80
7.HIDROGEOQUÍMICA	81
7.1 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA.....	83
7.1.1 pH	85
7.1.2 <i>Conductividad eléctrica</i>	86
7.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA.....	89
8.HIDROGEOLOGÍA	96
8.1 RASGOS Y CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS DE LA UNIDADES GEOLÓGICAS	96
8.2 CLASIFICACION HIDROGEOLOGICA DE LAS UNIDADES GEOLOGICAS	96
8.2.1 <i>Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular</i>	97
8.2.1.1 Depósito de Cauce Aluvial (Qca)	97
8.2.1.2 Depósitos Eólicos (Qe).....	97
8.2.2 <i>Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas y/o carstificadas</i> 97	
8.2.2.1 Neis de Macuira (Pznm)	97
8.2.2.2 Complejo Estructural de Alas (K?cea).....	97
8.2.2.3 Formación Siamaná (Es).....	98
8.2.2.4 Formación Jimol (Nj)	98
8.2.3 <i>Sedimentos y rocas con limitados recursos de aguas subterráneas....</i> 98	
8.2.3.1 Granodiorita de Siapana (Jgs).....	98
8.2.3.2 Formación Paraúnkrein (Ksp).....	98
8.2.3.3 Formación Uitpa (Eu)	98
8.2.3.4 Formación Castilletes (Nc)	99
8.2.3.5 Depósitos de Llanura de Inundación (Qlli).....	99
8.2.3.6 Depósitos de Llanura Intermareal (Qli).....	99
8.2.3.7 Depósitos Evaporíticos Recientes (Qes)	99

9.MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	100
9.1 ACUÍFERO	100
9.2 INFILTRACIÓN Y RECARGA	100
9.3 FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA	101
9.4 DESCARGA DE LOS ACUÍFEROS	101
10.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del área de estudio en La Alta Guajira (IGAC, Mapa Digital Integrado, 2003)	14
Figura 2. Neis de Macuira. A la izquierda estructuras plegadas en migmatitas, arroyo Alepsi, este de la Serranía de Jarara. Derecha, pliegues intrafoliales en neises, cauce superior del arroyo Japuralao-Serranía de Simarúa (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).	20
Figura 3. Complejo Estructural de Alas (sur de la Serranía de Jarara) en contacto con el Neis de Macuira. Nótese el contraste de tonalidades rojizas (al norte) y grises (al sur), así como la presencia de bloques del Neis dentro del Complejo, como lo señala la flecha (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).	22
Figura 4. Formación Paraúinkrein. Detalle de los niveles de metalodolitas predominantes en la unidad. A la izquierda Metalodolitas verdes, arroyo Riyocito. A la derecha, el martillo marca segregaciones cizalladas de cuarzo lechoso. Microplegamiento (señalado con la flecha) con eje de pliegue 18/35 y plano 314/60, arroyo Watkalu (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).....	23
Figura 5. Granodiorita de Siapana. Se observa la típica tonalidad y morfología de laderas con pendientes altas y cimas redondeadas (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, arroyo Wantalu-2011).	25
Figura 6. Columnas Estratigráficas generalizadas de las Unidades Terciarias de la Alta Guajira (modificado Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009)	26
Figura 7. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Siamaná. Modificado de Rollins (1965) (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).	29
Figura 8. Formación Siamaná. Se observa el contraste de morfologías: la zona plana corresponde a arenitas muy finas y limos correspondientes al tope de la Formación Uitpa; mientras que, las laderas con pendientes altas en las que contrastan intercalaciones de niveles calcáreos con nineles de areniscas, corresponden a morfologías desarrolladas por las Formación Siamana (Imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímicos Ojo de Agua Witpa-2011)	30
Figura 9. Formación Uitpa. Topografía típica de la unidad correspondiente a colinas suaves relacionadas a grandes valles y disectadas por cauces de arroyos estacionales (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, alrededores a la ranchería Aulechith- 2011).....	31
Figura 10. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Uitpa. Modificado de Rollins - 1965 (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).....	33

Figura 11. Formación Jimol. Morfología típica de cerros de poca altura que buzan suavemente hacia el Este (Imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, Cerro Jimol- 2011).	35
Figura 12. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Jimol. Modificado de Rollins - 1965 (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).	36
Figura 13. Formación Castilletes. Morfología típica de laderas con pendientes subverticales formando mesetas de bases anchas y topes planos con capas menos susceptibles a la erosión (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, Corregimiento de Castilletes- 2011).	38
Figura 14. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Castilletes. Modificado de Rollins - 1965 (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).	39
Figura 15. Depósitos de cauce aluvial. Aspecto general de los depósitos generados por un arroyo estacional. Nótese la variedad de cantos de diferentes tamaños (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, arroyo Choua, Choichirim – 2011).	41
Figura 16. Depósitos Eólicos (Qe). Vista panorámica desde el flanco sur de la Loma Youleman (sur de la Serranía de Jarara) hacia el este, donde se observa la disposición de los depósitos eólicos sobre rocas sedimentarias del Terciario en posición subhorizontal (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).	42
Figura 17. Depósitos de Llanura de Inundación. Aspecto general de la acreción vertical de los depósitos formados mediante la descarga del material en suspensión transportado por la corriente de agua al desbordarse un cauce (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, arroyo Choua, Choichirimana- 2011).	43
Figura 18. Depósitos de Llanura Intermareal (QII). Desarrollo de morfologías bajas y planas limitadas por colinas bajas, en este caso de la Formación Uitpa (Eu), Bahía Portete (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).	45
Figura 19. Depósitos Evaporíticos Recientes (Qes). Nótese la alta concentración de sales minerales precipitadas sobre el sedimento marino posterior a la evaporación del agua. La mayor concentración de precipitados corresponde a yeso, halita y posiblemente a carbonatos ya que efervescen ligeramente al contacto con HCl (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).	46
Figura 20. Histogramas de Humedad Relativa para estaciones localizadas en el municipio de Uribí (fuente: IDEAM).	49
Figura 21. Histogramas de Brillo Solar para estaciones localizadas en el municipio de Uribí (fuente: IDEAM).	49
Figura 22. Histogramas de Punto de Rocío para las estaciones localizadas en el municipio de Uribí (fuente: IDEAM).	50
Figura 23. Histogramas de precipitación para las estaciones localizadas en el municipio de Uribí (Fuente: IDEAM).	53
Figura 24. Mapa de isoyetas de la Alta Guajira.	54
Figura 25. Histogramas de temperatura para las estaciones localizadas en el municipio de Uribí (Fuente: IDEAM).	55

Figura 26. Graficas realizadas con los valores del cálculo de Evapotranspiración Potencial (ETP) mencionados en la tabla 2. Arriba estación de Nazareth, abajo estación de Puerto Bolívar.	57
Figura 27. Rangos de frecuencia respecto a la resistividad aparente de las diferentes unidades geológicas	60
Figura 28. Resistividad real a diferentes profundidades.....	64
Figura 29. Localización de perfiles geoeléctricos	65
Figura 30. Perfil geoeléctrico 1	65
Figura 31. Perfil geoeléctrico 2	66
Figura 32. Perfil geoeléctrico 3	67
Figura 33. Aljibe cercano al cambio de pendiente topográfica, fuente de abastecimiento en el corregimiento de Siapana (imagen tomada en la primera comisión de inventario de puntos de agua, Polujalii- 2011).	70
Figura 34. Corriente superficial correspondiente a un arroyo desde la parte alta de la Serranía de La Macuira (imagen tomada en la primera comisión de inventario de puntos de agua, arroyo Kaneweruu- 2011).	70
Figura 35. Manantial en rocas bioesparíticas de la Formación Siamaná, con alto grado de disolución (imagen tomada en la primera comisión de inventario de puntos de agua, Ojo de Agua de Witpa- 2011).	71
Figura 36. Pozo profundo ubicado en el corregimiento de Siapana (imagen tomada en la primera comisión de inventario de puntos de agua, Corregimiento de Siapana - 2011).....	71
Figura 37. Ejecución de prueba de bombeo pozo profundo (6-II-C- 5) en el corregimiento de Siapana municipio de Uribia.	76
Figura 38. Pozos de observación (6-II-C-35) prueba de bombeo en el corregimiento de Siapana, municipio de Uribia	77
Figura 39. Bombeo a caudal constante Cooper & Jacob pozo 6- II- C 5.....	78
Figura 40. Bombeo a caudal constante Theis pozo 6- II- C 5.....	79
Figura 41. Recuperación de niveles residuales pozo 6- II- C 5.	79
Figura 42. Observación durante bombeo pozo 6- II- C 35.....	80
Figura 43. Toma de muestra de agua en aljibe	81
Figura 44. Histogramas con rangos de frecuencia de concentraciones de los iones presentes en la Alta Guajira y valor máximo presente en agua subterránea dulce.	82
Figura 45. Diagrama de Piper Alta Guajira.	84
Figura 46. Diagrama de Schoeller Alta Guajira	85
Figura 47. Distribución Espacial de pH.....	86
Figura 48. Distribución espacial de la Conductividad Eléctrica.....	87
Figura 49. Distribución espacial de sulfatos.	88
Figura 50. Distribución Espacial de Cloruros.....	89
Figura 51. Diagrama de cajas de las unidades geológicas de la Alta Guajira.	90
Figura 52. Diagrama Cl Vs conductividad eléctrica.	91
Figura 53. Diagrama Cl Vs Temperatura.	92
Figura 54. Diagrama SO ₄ Vs Temperatura.	93
Figura 55. Diagrama Conductividad eléctrica Vs Temperatura.	94

Figura 56. Modelo hidrogeológico conceptual esquemático de la Alta Guajira. . 102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones hidroclimatológicas presentes en la Alta Guajira (IDEAM)	48
Tabla 2. Síntesis de los valores obtenidos para el cálculo de Evapotranspiración Potencial (ETP) con el programa “Macra” para las estaciones de Nazareth (arriba) y Puerto Bolívar (abajo).....	56
Tabla 3. Rangos de resistividades asociados a los tipos de rocas existentes	61
Tabla 4. Estadística de los parámetros fisicoquímicos in-situ tomados en época de baja precipitación en el área de estudio.	68
Tabla 5. Estadística de los parámetros fisicoquímicos in-situ tomados en época de alta precipitación en el área de estudio	69
Tabla 6. Información del Inventario de puntos de agua por unidad geológica	72
Tabla 7. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el inventario de puntos de agua en época de baja precipitación relacionado con la unidad geológica sobre la que aflora la captación.....	72
Tabla 8. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el inventario de puntos de agua en época de alta precipitación relacionado con la unidad geológica sobre la que aflora la captación.....	73
Tabla 9. Pozos para prueba de bombeo a caudal constante	76
Tabla 10. Transmisividad prueba de bombeo pozo 6- II- C 5.	78
Tabla 11. Clasificación geoquímica de los puntos de agua	83

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Carteras de campo; estas se encuentran en formato Excel y se entregan digital

Anexo B. Mapa Geológico

Anexo C. Análisis climatológico, en Excel y se entrega en formato digital

Anexo D. Inventario de puntos de agua

Anexo E. Pruebas de bombeo y recuperación

Anexo F. Mapa hidroquímico

Anexo G. Análisis hidroquímico

Anexo H. Mapa hidrológico

Anexo I. Modelo hidrogeológico conceptual

Anexo J. Fotos

Nota: Los anexos A, C, D, E, G y J se encuentran en archivos nativos.

RESUMEN

Gran parte del departamento de La Guajira se caracteriza por presentar dificultades en cuanto a la disponibilidad de agua superficial para el abastecimiento de comunidades y el uso en las diferentes actividades allí desarrolladas. Un claro ejemplo de ello ocurre en la Alta Guajira en el corregimiento de Siapana, en donde sus pobladores han padecido a lo largo de la historia la dificultad para tener acceso al recurso hídrico. Por lo anterior, el Programa de Exploración de Aguas Subterráneas del Servicio Geológico Colombiano viene adelantando estudios en pro de formular un modelo hidrogeológico conceptual para el sistema acuífero existente en el sector, evaluando el potencial que podría tener el agua subterránea como alternativa de solución a la problemática planteada.

Dentro de las diferentes fases que se abarcaron en este estudio se encuentra la verificación de la cartografía geológica existente, la prospección geoelectrica realizada mediante SEV's, el inventario de puntos de agua subterránea y superficial, el muestreo y análisis hidrogeoquímicos, los ensayos hidráulicos en pozos, la evaluación hidrológica, entre otras. De la interpretación de los anteriores componentes, se plantea el modelo hidrogeológico conceptual preliminar; el cual muestra, el potencial para la extracción del recurso hídrico subterráneo que poseen los depósitos cuaternarios y algunas formaciones geológicas terciarias existentes en el área de estudio, mostrando condiciones favorables para la infiltración, flujo y almacenamiento del recurso a través de la porosidad intergranular, fracturas o disolución de las mismas.

Sin embargo es necesario precisar que la calidad del agua presente en los depósitos y capas acuíferas de la zona no es la mejor para su uso sin un tratamiento previo a su aprovechamiento, debido a que la interpretación geoelectrica corroborada con los análisis de laboratorio, muestran que los espacios intersticiales, fracturados o producto de la disolución del sistema acuífero se encuentran saturados por agua poco dulce a salobre.

ABSTRACT

Much of the department of La Guajira is characterized by difficulties in the availability of surface water for communities supply and use in the various activities carried out there. A clear example of this occurs in the Alta Guajira in the village of Siapana, where his people have suffered throughout history the difficulty of access to water resources. Therefore, Exploration Program Groundwater Colombian Geological Service has been carrying out studies towards developing a conceptual hydrogeologic model for the existing aquifer system in the sector, assessing the potential groundwater could have as an alternative solution to the issues raised.

Within the different phases that are covered in this study is the verification of the existing geological mapping, geoelectric survey conducted by SEV's, inventory points groundwater and surface water sampling and hydrogeochemical analysis, hydraulic tests in boreholes, hydrological assessment, among others. The interpretation of the above components, the preliminary conceptual hydrogeologic model is proposed; which shows the potential for extraction of underground water resources possessed by Quaternary deposits and some existing tertiary geological formations in the study area, showing favorable conditions for infiltration, storage and resource flow through the intergranular porosity, fractures or dissolving them.

However, to state that the quality of water in reservoirs and aquifers in the area is not the best for use without a treatment prior to use, because the geoelectric interpretation corroborated by laboratory tests show that interstitial, fractured or product of the dissolution of the aquifer system spaces are saturated by sweet little brackish water.

INTRODUCCIÓN

Dentro del “Programa de Exploración de Aguas Subterráneas” planteado por la Subdirección de Recursos del Subsuelo, se contempló la realización del Modelo Hidrogeológico Conceptual en la Alta Guajira, sector Siapana – Monserrate – Aulechith y Puerto López para en un área total de 962 Km².

La oferta +hídrica del lugar es deficiente debido a las bajas precipitaciones anuales y alta tasa de evaporación. En cuanto a las lluvias se han podido definir cuatro comportamientos climatológicos bien delimitados: la "gran estación de lluvias" (octubre y noviembre), una de lluvias menores, durante los meses de abril y mayo, y dos estaciones secas entre enero - marzo, y junio - septiembre, esta última de gran intensidad.

Como producto de este estudio se presenta el modelo hidrogeológico conceptual con base en la información geológica, hidrológica, hidrogeológica, geofísica, hidráulica e hidrogeoquímica principalmente, el cual está dirigido a proporcionar información cualitativa como cuantitativa de las propiedades, condiciones y potencialidades de los acuíferos existentes; insumo que pretende ser un soporte técnico para las autoridades competentes en sus planes de exploración de aguas subterránea.

1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACIÓN

El departamento de La Guajira está situado en el extremo NE del país y de la llanura del Caribe, en la parte más septentrional de Suramérica; localizado entre 10° 23' y 12° 28' de latitud N y los 71° 06' y 73° 39' de longitud al W de Greenwich. Su superficie es de 20.848 km² y limita con el mar Caribe hacia la parte N y W, con la República Bolivariana de Venezuela por el S y con los departamentos del Cesar y Magdalena hacia el S y SW, respectivamente (Figura 1).



Figura 1. Localización del área de estudio en La Alta Guajira (IGAC, Mapa Digital Integrado, 2003)

1.2 OROGRAFÍA

El relieve incluye montañas, acantilados, planicies y dunas. La Guajira ha sido subdividida por su configuración territorial en dos grandes regiones de NE a SW:

Alta y Baja Guajira. La primera, situada en el extremo peninsular es semidesértica, de escasa vegetación, donde predominan los cactus y cardonales; entre la cual sobresalen tres sistemas montañosos bajos (no superan los 800 m de altura), cuya orientación general es de noroeste a sureste (Macuira, Jarara, Parash), oeste a este (Cosinas) o suroeste a noreste (Carpintero). La segunda región, se extiende desde la estribación E de la Sierra Nevada de Santa Marta y los Montes de Oca; es más húmeda, de tierras cultivables y posee todos los pisos térmicos.

1.3 CLIMA

El clima, especialmente en la península, es árido, seco, de alta radiación solar y alto porcentaje de evaporación, altas temperaturas (máximas absolutas oscilando entre 36°C y 40°C mientras que las mínimas muestran una variación de 17°C a 21° C); modificadas un poco con la brisa marina y los Vientos Alisios del NW que soplan durante la mayor parte del año; cuya acción evita o impide la formación de nubes. Las lluvias son escasas y se presentan generalmente en los meses de septiembre a noviembre, cuando la Zona de Convergencia Tropical (ZCIT) se desplaza hacia el N. Por su configuración climática, La Guajira es una región con limitaciones en el recursos hídricos (CORPOGUAJIRA, 1992).

Todo lo anterior ocasiona que muchas de las corrientes localizadas en la región de la Alta Guajira se caracterizan principalmente por corrientes del tipo intermitente o efímeras (fluyen únicamente en épocas de invierno), cuyos lechos son profundamente disectados debido a las crecientes violentas de corta duración y al transporte aluvial abundante.

Los arroyos que descienden de los macizos guajiros forman cauces anastomosados que en la vertiente N y NE llegan hasta el mar y en la vertiente W y SW se evaporan e infiltran en los sedimentos o rocas más porosas.

1.4 VÍAS DE ACCESO

El departamento de La Guajira posee diversos sistemas para arribar por vía terrestre, aérea o marítima:

- Al departamento de La Guajira, se accede por vía terrestre partiendo desde Bogotá en un recorrido de 1.118 kilómetros por carretera pavimentada hasta la ciudad de Riohacha, capital del departamento.
- Desde Cartagena de Indias, bordeando el Mar Caribe, y visitando las ciudades de Barranquilla y Santa Marta, se llega a Riohacha. El recorrido es de 375 kilómetros por carretera pavimentada.
- Desde Valledupar, capital del departamento del César, por vía terrestre, se puede acceder hasta Riohacha por carretera pavimentada en un recorrido de 193 kilómetros.

- Por vía aérea, desde Bogotá hasta el aeropuerto Almirante Padilla de Riohacha. El traslado toma aproximadamente una hora con treinta minutos.

- Por vía marítima se puede arribar al puerto de Riohacha.

Para acceder específicamente hasta el área de estudio (corregimiento de Siapana), es necesario desplazarse desde la ciudad de Riohacha hasta el municipio de Uribia por la vía pavimentada en sentido NW-SE hasta el sitio llamado Cuatro Vías y de éste continuar por la vía pavimentada paralela al ferrocarril en sentido NE (38.1 Km).

Existen vías carreteables en mal estado que comunican la cabecera urbana del municipio de Uribia con algunos corregimientos de la península de La Guajira como lo son El Cabo de la Vela, Bahía Honda, Punta Taroa, Puerto Estrella, Puerto Inglés, Puerto López y Nazareth. Para llegar hasta el corregimiento de Siapana es necesario disponer de un tiempo promedio entre 6 a 7 horas.

1.5 SUELOS

El conjunto de suelos de la Alta Guajira es variado y contrastante en muchos aspectos. Por ejemplo, hay suelos poco o nada evolucionados como los aluviales en los fondos de los arroyos o al pie de los grandes macizos, los depósitos eólicos litorales o continentales, y los suelos truncados de las mesas litorales desarrollados sobre materiales calcáreos consolidados. También hay suelos evolucionados en la llanura Guajira formados bajo condiciones climáticas diferentes a las actuales. Horizontes con acumulaciones de carbonato de calcio son frecuentes en muchos de los suelos estudiados, lo mismo que los colores rojizos que indican procesos de rubeficación (liberación del hierro de los minerales primarios), la dispersión de partículas de óxido de Fe y su progresiva oxidación o hidratación (CÓRDOBA & CORTÉS, 1979).

En la Alta Guajira el clima ha sido y es el factor más importante en la génesis de los suelos. La deficiencia de precipitación, las altas temperaturas, la pérdida excesiva de agua por evapotranspiración, los vientos fuertes y constantes y la incidencia directa de la energía solar, han contribuido a la formación de los suelos típicos de la zona, cuyas características más sobresalientes (CÓRDOBA & CORTÉS, 1979) son: moderada a alta salinidad, deficiencia de humedad, abundancia de carbonatos, tendencia a la compactación de los materiales, erosión intensa (decapita total o parcialmente el nivel del suelo), presencia de capas delgadas o espesas de arenas transportadas por el viento, materia orgánica escasa y pH básico. Los tipos de suelos más destacados son los suelos del Macizo Guajiro y los suelos de las formas litorales.

Los llamados suelos del Macizo Guajiro son suelos que abarcan casi toda la Alta Guajira, formados en cerros y serranías tales como Macuira, Jarara, Cosinas,

Parashi, Carpintero y La Teta. Se componen de materiales diversos, emplazándose sobre las estribaciones y piedemonte que favorecen el depósito de arenas y materiales, superficies de erosión labradas en sedimentos marinos (margas y arcillas yesíferas), en valles y corredores conformados por depósitos de arenas eólicas o coluviales y por lechos de arroyos constituidos por aluviones heterogéneos.

Los suelos de los cerros y serranías presentan color azul-violeta, son muy superficiales. Se han formado a partir de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias y comparten el área con extensos afloramientos rocosos. Hacia el pie de los cerros y serranías aparecen suelos salino-sódicos antiguos, a menudo truncados y asociados a horizontes de acumulación de carbonato de calcio. Los suelos del piedemonte del Macizo están constituidos por materiales heterogéneos, salinos y compactados (color rosado). La presencia de estos suelos evolucionados indica una época pasada de relativa estabilidad geomorfológica y un clima más húmedo. Hay restos de horizontes B de alteración y B de enriquecimiento de arcillas, rubificados y truncados, descansando sobre rocas diversas pero con dominancia de calizas, granitos y neis. Hay también suelos muy poco evolucionados y frecuentes afloramientos rocosos.

Los suelos de las superficies de erosión presentan color rojo claro y están constituidos por margas, calizas blandas y arcillas arenosas y yesíferas. En muchas zonas se encuentran grandes cantidades de fragmentos de cuarzo esparcidos por la superficie. La alta salinidad sumada a la erosión hídrica y eólica hace casi imposible el crecimiento de la vegetación. Durante la época de las lluvias las aguas depositan en estas áreas materiales que varían desde las arcillas arenosas y margosas que arrancan de los glacis (suelos de las superficies de erosión) y demás afloramientos hasta arenas cuarcíticas y dioríticas de los cerros del macizo.

Los suelos de las formas litorales son altamente salino-sódicos, no presentan evolución y en algunos sectores puede ocurrir hidromorfía (estado permanente o temporal de saturación de agua en el suelo que lleva asociado la existencia de condiciones reductoras).

1.6 HIDROGRAFÍA

La corriente de agua más importante del departamento es el río Ranchería, que nace en la Sierra Nevada de Santa Marta y desemboca en el mar Caribe; muchas de las corrientes son insuficientes y de cursos de agua esporádicos, con crecidas violentas y cortas. Unos pocos valles privilegiados se benefician de manantiales cuyo caudal excepcionalmente es permanente (vertiente NE de la Serranía de la Macuira). Las aguas superficiales se aprovechan a menudo por el sistema de jagüey, pero igualmente se ven afectados por las sequías prolongadas. Las

reservas subterráneas, de difícil aprovechamiento y recarga, son además frecuentemente salobres.

En el área de estudio, específicamente en el sector de Siapana, los arroyos más importantes son el Huajarimaha, Youjararu, Huachácharu, Ishuarep. El arroyo Huajarimaha lleva agua corriente hasta las estribaciones de la serranía, infiltrándose luego en los depósitos del Cuaternario; los demás arroyos son intermitentes.

2. GEOLOGÍA

En éste capítulo se realiza un resumen de las unidades litológicas (ver Anexo A) que se encuentran en el área de estudio en la Alta Guajira descritas en el trabajo realizado por el Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá titulado “Proyecto de Investigación: Cartografía e Historia Geológica de la Alta Guajira, implicaciones en la búsqueda de recursos minerales; Acuerdo Específico 030/2006.

La descripción de las unidades geológicas se realiza de acuerdo al tipo de roca así: unidades metamórficas, ígneas y sedimentarias. En cada grupo se organizan de la más antigua a más reciente. Así mismo, se mencionan los depósitos recientes (ver Anexo B)

2.1 ROCAS METAMÓRFICAS

Las unidades metamórficas del área de estudio en la Alta Guajira son de edades Paleozoico (Neis de Macuira) y Mesozoico (Complejo Estructural de Alas y Formación Paraúinkrein).

2.1.1 Neis de Macuira (Pznm)

Radelli (1962) define la Serie Macuira. Posteriormente, MacDonald (1964) llama Formación Macuira a los esquistos micáceos cuarzo-feldespáticos y hornbléndicos y denomina Miembro Uray a los neises de hornblenda-plagioclase. Lockwood (1965) extiende el nombre de Grupo Macuira.

La unidad se extiende en una franja con dirección NE con una morfología de cerros de mediana altura escarpados con pendientes medias en las zonas S y central de las serranías de Macuira y Jarara. Debido a la alta meteorización, esta unidad presenta colores rojizos (neises anfibólicos y anfibolitas) y amarillos (neises cuarzo feldespáticos) (Figura 2).



Figura 2. Neis de Macuira. A la izquierda estructuras plegadas en migmatitas, arroyo Alepsi, este de la Serranía de Jarara. Derecha, pliegues intrafoliales en neises, cauce superior del arroyo Japuralao-Serranía de Simarúa (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

Está constituida principalmente por rocas de alto grado de metamorfismo con estructura néisica y tamaño de grano medio a grueso. Aunque predominan los neises, se observan intercalaciones de esquistos y anfibolitas. Los neises están caracterizados por alternancia de bandas oscuras y claras por una fuerte orientación mineral. Litológicamente el Neis de Macuira presenta neises cuarzo-feldespáticos, anfibólicos, bióticos, anfibolitas, esquistos micáceos, migmatitas, pegmatitas y mármoles. Al SW del Cerro Irruatu se observa un neis anfibólico consolidado que hidrogeológicamente se comporta como una roca con porosidad secundaria moderada.

Las paragénesis metamórficas indican unas condiciones de metamorfismo de grado medio en facies Anfibolita. La presencia de clorita, formada a partir de biotita y de actinolita, identificada en los neises anfibólicos aflorantes al N de la ranchería de Alas (Serranía de Jarara) indica metamorfismo retrógrado en facies Esquisto Verde.

El protolito de los esquistos corresponde a una secuencia pelítica compuesta por lodolitas y arenitas con proporciones menores de conglomerados. Las anfibolitas fueron originadas a partir de rocas máficas (volcánicas?) mientras que los neises provienen del metamorfismo de secuencias sedimentarias.

En campo se observa al Neis de Macuira en contacto con formaciones sedimentarias de edades Jurásico y Cretácico, lo cual permite inferir una edad pre-Jurásico. Ante la falta de evidencias isotópicas para precisar la edad de esta unidad, se le asigna una edad Paleozoico lo cual concuerda con las consideraciones de Lockwood (1965) y de Irving (1971).

2.1.2 Complejo Estructural de Alas (K?cea)

Se denomina como Metasedimentitas del Área de Alas a “un cinturón fragmentado de dirección noreste, que aflora en el extremo sureste de la Serranía de Jarara y que es estructuralmente complejo y ha sufrido metamorfismo dinámico” (LOCKWOOD, 1965).

En el Proyecto de Investigación: Cartografía e Historia Geológica de la Alta Guajira, implicaciones en la búsqueda de recursos minerales (Acuerdo específico 030/2006) se propone la utilización del término “Complejo Estructural de Alas” para designar las rocas aflorantes al sur del trazo principal del sistema de fallas de Alas, en la Serranía de Jarara, debido a sus complejas características estructurales al tratarse de una zona con presencia de bloques de esquistos, mármoles, metarenitas, milonitas y brechas de falla originadas a partir del metamorfismo de una secuencia sedimentaria, asociados con bloques de rocas metamórficas en facies anfibolita y con estructura néisica típicas del Neis de Macuira y bloques de rocas sedimentarias tipo litoarenitas, esparitas y bioesparitas. Las litologías identificadas permiten establecer que los bloques metamórficos de origen sedimentario que conforman la unidad han sufrido metamorfismo de tipo regional y dinámico (milonitas, protomilonitas, ultramilonitas, cataclasitas y brechas de falla).

El Complejo Estructural de Alas aflora en el extremo suroriental de la Serranía de Jarara; buenas exposiciones se encuentran a lo largo del carretable que conduce de la ranchería de Jimuth hacia la ranchería de Witpa, en alrededores de la ranchería de Alas y sobre el cauce del arroyo Witpa (Figura 3).

Debido a la variedad litológica presente en la unidad, la expresión morfológica no es uniforme. Los mármoles se distinguen por formar escarpes abruptos y comúnmente están restringidos a las partes altas de los cerros. Los esquistos, metarenitas, milonitas y brechas de falla formadas a partir de arenitas y lodolitas no presentan características morfológicas que las distingan de otro tipo de litología ya que se pueden encontrar en altos y bajos topográficos de cimas redondeadas. Sin embargo, en cercanías al contacto fallado con el Neis de Macuira, la morfología comprende cerros redondeados de color grisáceo y pendientes no superiores a 30%.

Es difícil establecer la edad del Complejo Estructural de Alas debido a la ausencia de datos geocronológicos, presencia de bloques de distintas litologías y escasez de restos fósiles. Es claro que la unidad es post-Paleozoico ya que involucra bloques del Neis de Macuira y es anterior a la edad de las rocas sedimentarias sin metamorfosar de Lockwood (1965) y que constituyen los bloques sedimentarios del Complejo. Dentro de estos últimos cuerpos, exactamente en las bioesparitas, Bürgl (1960) y Rollins (1965) identifican fauna del Valanginiense, la cual Rollins (1965) correlaciona con la contenida en las rocas calcáreas de la Formación

Moina, mientras que las arenitas y conglomerados Lockwood (1965) las correlaciona con las porciones superiores de la Formación Palanz. Estas observaciones sugieren que los eventos metamórficos responsables de la formación de milonitas, mármoles y esquistos serían anteriores al Berriasiano-Valanginiano (edad de la Formación Palanz) probablemente de edad Jurásico.



Figura 3. Complejo Estructural de Alas (sur de la Serranía de Jarara) en contacto con el Neis de Macuira. Nótese el contraste de tonalidades rojizas (al norte) y grises (al sur), así como la presencia de bloques del Neis dentro del Complejo, como lo señala la flecha (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

2.1.3 Formación Paraúinkrein (Ksp)

Unidad definida por MacDonald (1964) para agrupar la secuencia de rocas arcillosas con intercalaciones arenosas y calcáreas, ligeramente metamorfoseadas, que afloran cerca a la ranchería de Parabancleín.

Presenta una morfología dominante de colinas bajas redondeadas, alineadas en sentido NW-SE, que no sobrepasan los 10 metros de altura y pendientes que no

exceden el 10%, reflejo de la predominancia de litologías arcillosas finas que le proporcionan al paisaje tonalidades amarillo rojizas. En zonas donde predominan las intercalaciones de metarenitas, metaconglomerados y esparitas, las geoformas presentan mayores pendientes (30%), alturas promedio de 50 m y coloraciones amarillo grisáceas.

En el área afloran principalmente metalodolitas que varían a metarenitas de grano muy fino, las cuales localmente pueden ser clasificadas como milonitas debido a la intensa deformación de la zona; en menor proporción se encuentran niveles lenticulares de metaconglomerados y metaarenitas, así como capas cizalladas de micritas y biomicritas (Figura 4).



Figura 4. Formación Paraúinkrein. Detalle de los niveles de metalodolitas predominantes en la unidad. A la izquierda Metalodolitas verdes, arroyo Riyocito. A la derecha, el martillo marca segregaciones cizalladas de cuarzo lechoso. Microplegamiento (señalado con la flecha) con eje de pliegue 18/35 y plano 314/60, arroyo Watkalu (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

Las litologías identificadas generalmente muestran conservación de la laminación original, con plegamiento y desarrollo de foliación incipiente S1 oblicuamente a So, al cual está dada por la disposición alineada de clorita y micas blancas. Las rocas están afectadas por procesos de silicificación y precipitación de siderita que afecta prácticamente a toda la formación y que en muchos casos enmascara la composición original, dificultando su clasificación. Las observaciones de campo y petrográficas sugieren que la Formación Paraúinkrein es el resultado del metamorfismo de bajo grado de una secuencia sedimentaria que no generó mineralogías diagnósticas (metamorfismo de Fondo Oceánico?) y que fue posteriormente afectada por fuertes eventos tectónicos.

Se propone que las rocas de esta formación provienen del metamorfismo de bajo grado de una secuencia predominantemente arcillosa con intercalaciones lenticulares de arenitas conglomeráticas, conglomerados, esparitas, y bioesparitas que se depositaron en un ambiente marino de plataforma con épocas de

exposición en superficie, evidenciada en la alta presencia de láminas delgadas oxidadas de color rojizo. La depositación de lentes de conglomerados y arenitas conglomeráticas evidencia la acción de corrientes. La silicificación está relacionada a reemplazamiento de carbonato de calcio por sílice de tipo probablemente inorgánico, originada a partir de disolución de silicatos por acción de aguas meteóricas.

MacDonald (1964) reporta, al SE de la ranchería de Parabancleín, la presencia de fósiles representativos del intervalo Albiano superior-Turoniano.

2.2. ROCAS ÍGNEAS

La unidad ígnea de La Alta Guajira en el área de trabajo está representada por la Granodiorita de Siapana

2.2.1 Granodiorita de Siapana (Jgs)

La primera referencia de este plutón la hace Stutzer (1934). Luego Radelli (1962) le asigna el nombre de Granodiorita de Siapana a este cuerpo. Años más tarde MacDonald (1964), retoma el nombre de Granodiorita de Siapana de Radelli (1962) para describir un cuerpo irregular con una extensión aproximada de 85 km², aflorante en la Serranía de Macuira al NE de la población de Siapana, de donde toma su nombre.

La morfología se caracteriza por un relieve semiplano, colinado a montañoso con suelo arenoso grueso y bloques esferoidales de color blanco diseminados.

Según Radelli (1962) la composición mineralógica de la granodiorita es muy constante y sencilla, compuesta por abundante cuarzo, oligoclasa, ortosa, microclina y biotita como minerales esenciales; moscovita, circón, apatito, poca epidota y óxidos de hierro como accesorios. La masa granodiorítica frecuentemente está atravesada por filones de rocas de color verde oscuro o verde gris, de estructura porfirítica, correlacionadas con microgranitos y microgranodioritas de distintos espesores y filones pegmatíticos y aplíticos que además de atravesar la granodiorita afectan los terrenos circundantes (Figura 5).

Los contactos discordantes, el carácter masivo, no foliado y la presencia de diques de rocas porfiríticas-afaníticas cerca de los contactos indican que se emplazó en la epizona. Los efectos de metamorfismo de contacto alrededor del plutón son menores. MacDonald (1964) describe un débil metamorfismo dinámico evidenciado en cristales de cuarzos y feldespatos fracturados y deformados, produciendo esquistosidad débil que intersecta el bandeamiento ígneo. Posiblemente el subparalelismo local de la biotita en el plutón es debido al mismo evento.

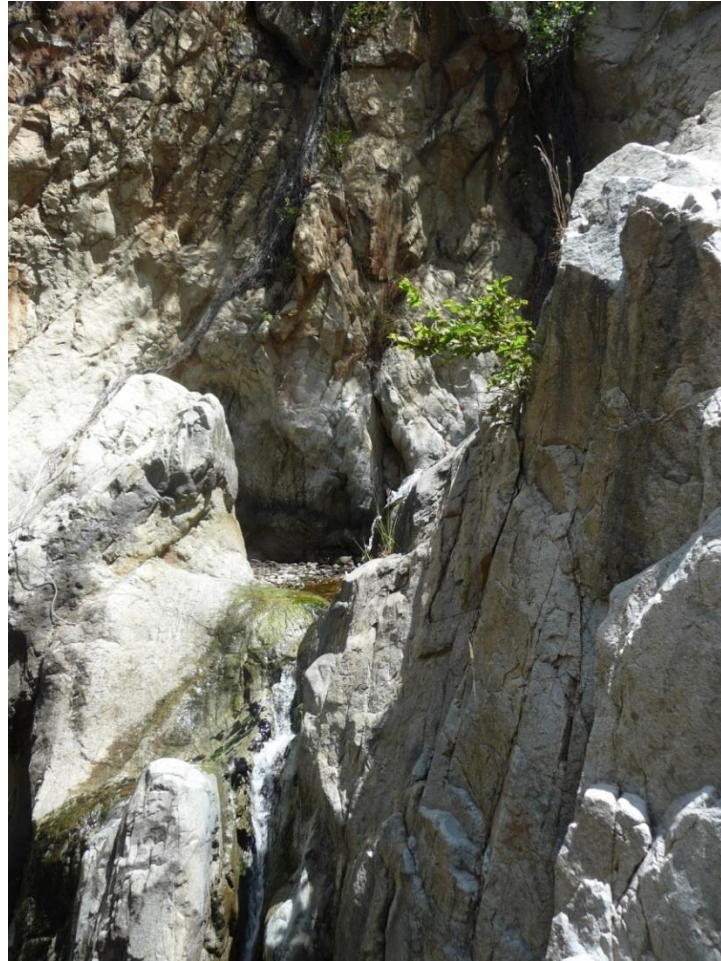


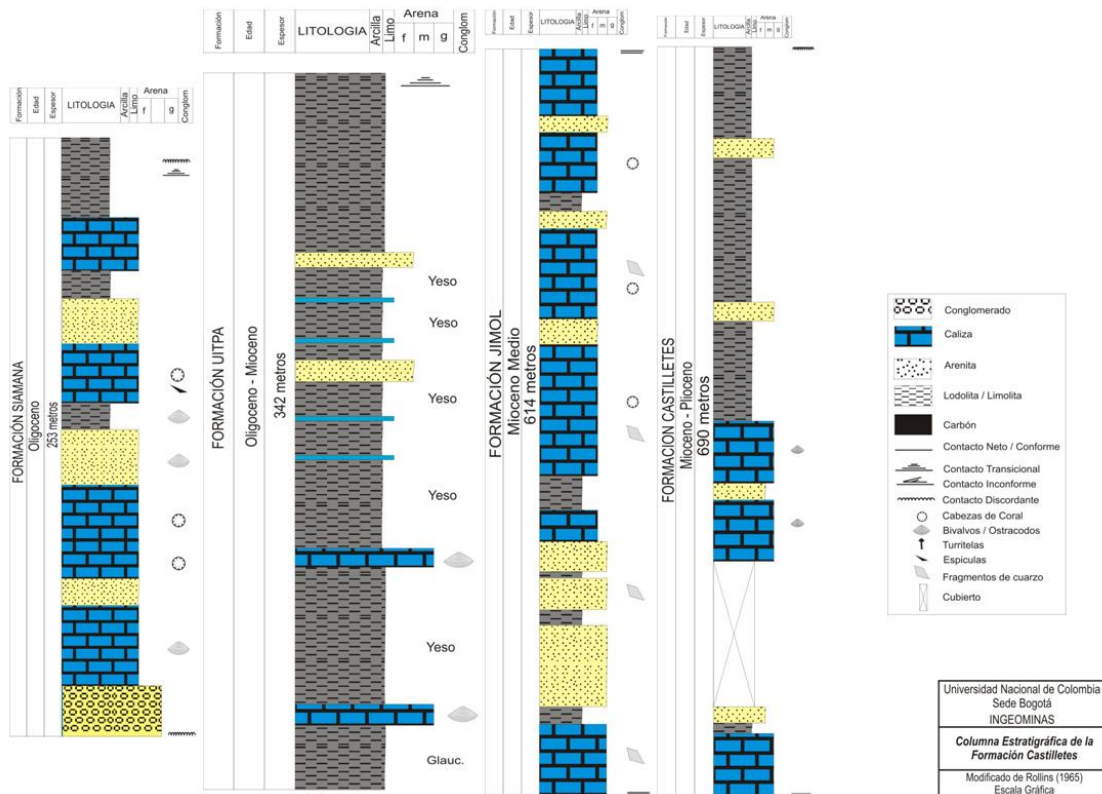
Figura 5. Granodiorita de Siapana. Se observa la típica tonalidad y morfología de laderas con pendientes altas y cimas redondeadas (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, arroyo Wantalu-2011).

Cardona *et al.* (2006) obtienen una edad 167 ± 9.4 Ma. (SHRIMP 206Pb/238U en 10 circones prismáticos) por lo que la edad de cristalización del cuerpo es del Jurásico Medio. MacDonald (1964) reporta una edad radiométrica obtenida en una pegmatita de cuarzo-moscovita-feldespatos aflorante en el arroyo Jaráru de 195 ± 4 Ma. (K/Ar en moscovita) la cual es interpretada como la edad mínima del episodio de intrusión. La granodiorita por lo tanto se cree que sea del Triásico Temprano o más viejo, es más joven que el Neis de Macuira y posiblemente más joven que los Esquistos de Jarara (MacDONALD, 1964).

2.3 ROCAS SEDIMENTARIAS

2.3.1 Unidades Terciarias

Las unidades de edad Eoceno y Neógeno de la Alta Guajira en el lugar de trabajo están representadas por las formaciones Siamaná, Uitpa, Jimol y Castilletes, cuyas columnas litológicas generalizadas se presentan a continuación (Figura 6):



2.3.2 Formación Siamaná (Es)

Esta unidad, propuesta por Renz (1960 en ROLLINS, 1965) toma su nombre de la ranchería Sillamahana, ubicada en el borde NE de la Serranía de Cosinas, al W del área de estudio fuera de la zona de estudio. El término “Siamaná”, es una deformación del nombre de dicha ranchería.

A nivel general, la unidad presenta una morfología de cerros redondeados y tabulares que alcanzan hasta los 50 metros de altura, en los que sobresalen los niveles cementados más resistentes a la erosión, intercalados con rocas matriz-soportadas de grano fino. En ocasiones se observa el escalonamiento de las

capas, con comportamientos subhorizontales, formando secuencias de capas tabulares.

En general, la unidad está constituida por rocas terrígenas y calcáreas. Las primeras están representadas por capas medias a gruesas, tabulares, planas paralelas, sin estructuras internas, de arenitas calcáreas de grano fino a muy fino, fosilíferas, esporádicamente conglomeráticas, de coloración amarillo-café con abundantes guijos de cuarzo lechoso, esquistos, neises y ocasionalmente fragmentos de rocas graníticas. La segunda litología corresponde a rocas calcáreas tipo bioesparitas, en capas gruesas que alcanzan hasta los 2 metros de espesor, planas paralelas, tabulares, sin estructuras internas y con coloración clara en tonos amarillos, rosados y cafés (Figura 7). También se reportan niveles de limolitas calcáreas cuya ocurrencia está supeditada a la presencia de las capas arenosas.

Una de las características principales de esta formación es la presencia de restos de corales cuya ornamentación está bien preservada, dado el buen estado de sus tabiques. Además, se reportan varias clases de ichnofósiles, siendo comunes los *thalassinoides* de tamaños centimétricos. Son comunes gastrópodos (turritelas) y bivalvos de varios tipos.

Hidrogeológicamente, la unidad presenta rocas consolidadas y semi-consolidadas con porosidad secundaria moderada, causada por fracturas y disolución de éstas en las rocas carbonatadas. En el arroyo Pararu hay un pozo de 7 metros de profundidad del cual los habitantes reportan agua salobre.

Las variaciones de espesor de la unidad son considerables y depende directamente de su sitio de afloramiento. La sedimentación en el flanco N de la cuenca comprende espesores menores de los que se tienen en el flanco S, es decir, sobre la Serranía de Cosinas; Renz (1960 en ROLLINS, 1965) mide en la localidad tipo 430 metros de espesor, por su parte Rollins (1965) mide un espesor de 302 metros de sección tipo.

A la base, la Formación Siamaná se encuentra suprayaciendo de manera discordante depósitos el Cretácico y Jurásico (al N de la Serranía de Cosinas), en un contacto fallado marcado por la Falla de Cuisa.

El contacto superior de la Formación Siamaná con la Formación Uitpa (Figura 8) presenta un carácter discordante angular, como se observa en la zona de Anshirú, donde un paquete de bioesparitas de color rosa a crema, que representan el tope de la unidad, infrayacen las limolitas grises típicas de la Formación Uitpa. Sin embargo, al SE de la Serranía de Jarara, en el arroyo Riecito Sur, el contacto entre dichas unidades es neto, igual al que reporta Renz (1960 en

ROLLINS, 1965), en la localidad tipo de la Formación Uitpa, al N de la ranchería del mismo nombre.

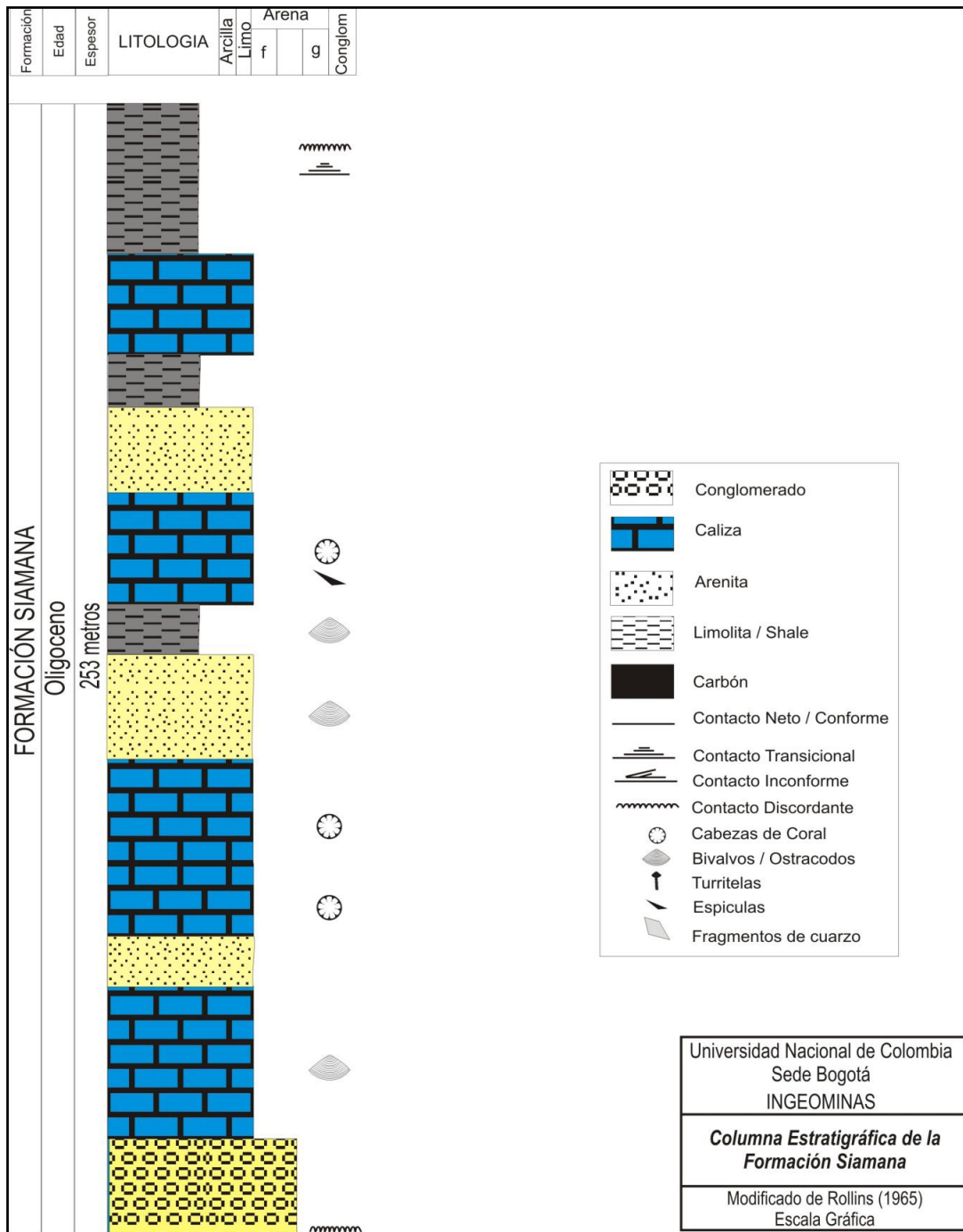


Figura 7. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Siamaná. Modificado de Rollins (1965) (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

La base de la Formación Uitpa es marcada en la primera aparición de capas medias de lodolitas arenosas de color rojizo, altamente meteorizadas y las cuales

se intercalan con capas medias de bioesparitas grises cuyas características son muy similares a las mostradas por la Formación Siamaná en el sector.



Figura 8. Formación Siamaná. Se observa el contraste de morfologías: la zona plana corresponde a arenitas muy finas y limos correspondientes al tope de la Formación Uitpa; mientras que, las laderas con pendientes altas en las que contrastan intercalaciones de niveles calcáreos con niveles de areniscas, corresponden a morfologías desarrolladas por la Formación Siamana (Imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímicos Ojo de Agua Witpa-2011)

Por la abundancia de restos de arrecifes coralinos en la Formación Siamaná, se interpreta un ambiente de aguas claras, someras, tranquilas, todas en la zona fótica superior. En algunos niveles, a la base de la unidad, son fuertemente predominantes los ichnofósiles sobre los cuales, al seguir la secuencia estratigráfica aparecen los arrecifes. Esto sugiere que la cuenca fue profundizando hasta llegar a su nivel de mayor estabilidad con el ambiente coralino. La ocurrencia, al tope de la unidad, de niveles bioesparíticos con abundantes fragmentos fósiles sugiere un ambiente marino de alta energía y poco profundo.

La unidad ha sido datada por varios autores, ubicándola a lo largo del Oligoceno. Renz (1960 en ROLLINS, 1965) le asigna por edad el Oligoceno medio y propone que la parte basal de la formación pertenece al Oligoceno inferior. Lockwood (1965) data la parte superior de la unidad, proponiendo para esta una edad de Oligoceno superior; reporta la especie de foraminíferos, *Operculinoides carmensis*, identificada por H. Bürgl (LOCKWOOD, 1965) y cita las especies *Miogypsina* y *Lepidocyclina*, reportadas por Renz (1960 en ROLLINS, 1965).

2.3.3 Formación Uitpa (Eu)

Definida por Renz (1960 en ROLLINS, 1965) y modificada por Rollins (1965), toma su nombre de la denominación indígena del manantial de Uitpa, ubicado en el borde SE de la Serranía de Jarara.

La Formación Uitpa posee una morfología típica de valles amplios y colinas suaves, que permite reconocerla fácilmente (Figura 9). Su litología con predominio de lodolitas y limolitas semi-consolidadas, genera una topografía característica, suavemente ondulada, compuesta por una serie de colinas de poca altura (de entre 2 m y 10 m) y suaves pendientes, separadas entre sí por amplias zonas planas cuyas alturas no sobrepasan los 6 metros y que permanecen a lo largo y ancho de grandes valles irregulares.



Figura 9. Formación Uitpa. Topografía típica de la unidad correspondiente a colinas suaves relacionadas a grandes valles y disectadas por cauces de arroyos estacionales (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, alrededores a la ranchería Aulechith- 2011).

Litológicamente, la Formación Uitpa agrupa de base a tope una secuencia granodecreciente de arenitas muy finas y limolitas en su mitad inferior hasta lodolitas en su parte superior, cuya porosidad es intergranular baja.

A la base, la unidad inicia con una serie de capas medias a gruesas de arenitas muy finas, las escasas estructuras sedimentarias apreciables muestran una laminación plana paralela y ligeramente ondulosa. Estas arenitas se encuentran intercaladas con niveles ocasionales de rocas calcáreas en capas medias a delgadas con guijos finos a medios de cuarzo lechoso sorteado esporádicamente. Son comunes los niveles delgados y muy delgados (1 cm - 3 cm) de yeso acicular y laminar, algunos de los cuales se disponen paralelamente a la estratificación aparente. Faunísticamente, la base de la Formación Uitpa es altamente fosilífera, con abundantes gastrópodos en posición de vida, en los que predominan las turritelas; también se registran bivalvos, espinas de peces, foraminíferos de gran tamaño, esporádicos fragmentos de equinodermos y múltiples fragmentos de conchas.

Al tope, la Formación Uitpa presenta intercalaciones de bioesparitas en capas delgadas supeditadas a capas semi consolidadas de limolitas y lodolitas calcáreas con yeso. El tamaño de grano se torna ligeramente más grueso, y los niveles de arenitas y limolitas poseen un notorio componente calcáreo, probablemente por la lixiviación de las formaciones que suprayacen la Formación Uitpa (formaciones Jimol y Castilletes). Algunas capas hacia el tope de la unidad, poseen estructuras planas paralelas, ondulosas y evolutas, presentandose bioturbadas (Figura 10).

Renz (1960 en ROLLINS, 1965) propone un espesor para la formación de 150 metros para la sección tipo, identificando este mismo espesor en el área de Siamaná. Este mismo autor aclara que hacia la parte central de la cuenca, entre las serranías de Jarara y Cosinas, el espesor de la formación aumenta considerablemente, ya que, aclara el autor, al parecer la sedimentación continuó durante un periodo más largo.

Estratigráficamente, la Formación Uitpa suprayace la Formación Siamaná en un contacto angular, e infrayace a la Formación Jimol en la franja central de La Alta Guajira y a la Formación Castilletes en la franja más septentrional de la península. En ambos casos, los contactos registrados son netos. Rollins (1965) propone un contacto inconforme entre la Formación Uitpa y la Formación Jimol, en cercanía de la Bahía de Cosinetas.

Por su litología y fauna reportada se propone para la Formación Uitpa un ambiente somero que, aunque estable, rápidamente alcanzó grandes profundidades, condición que se mantuvo constante por bastante tiempo, lo que se deduce por el espesor de las lodolitas. Hacia el tope de la secuencia se insinúa una rápida somerización de la cuenca. A la base, la secuencia litológica sugiere ambientes cercanos a la playa, con escaso aporte de material terrígeno.

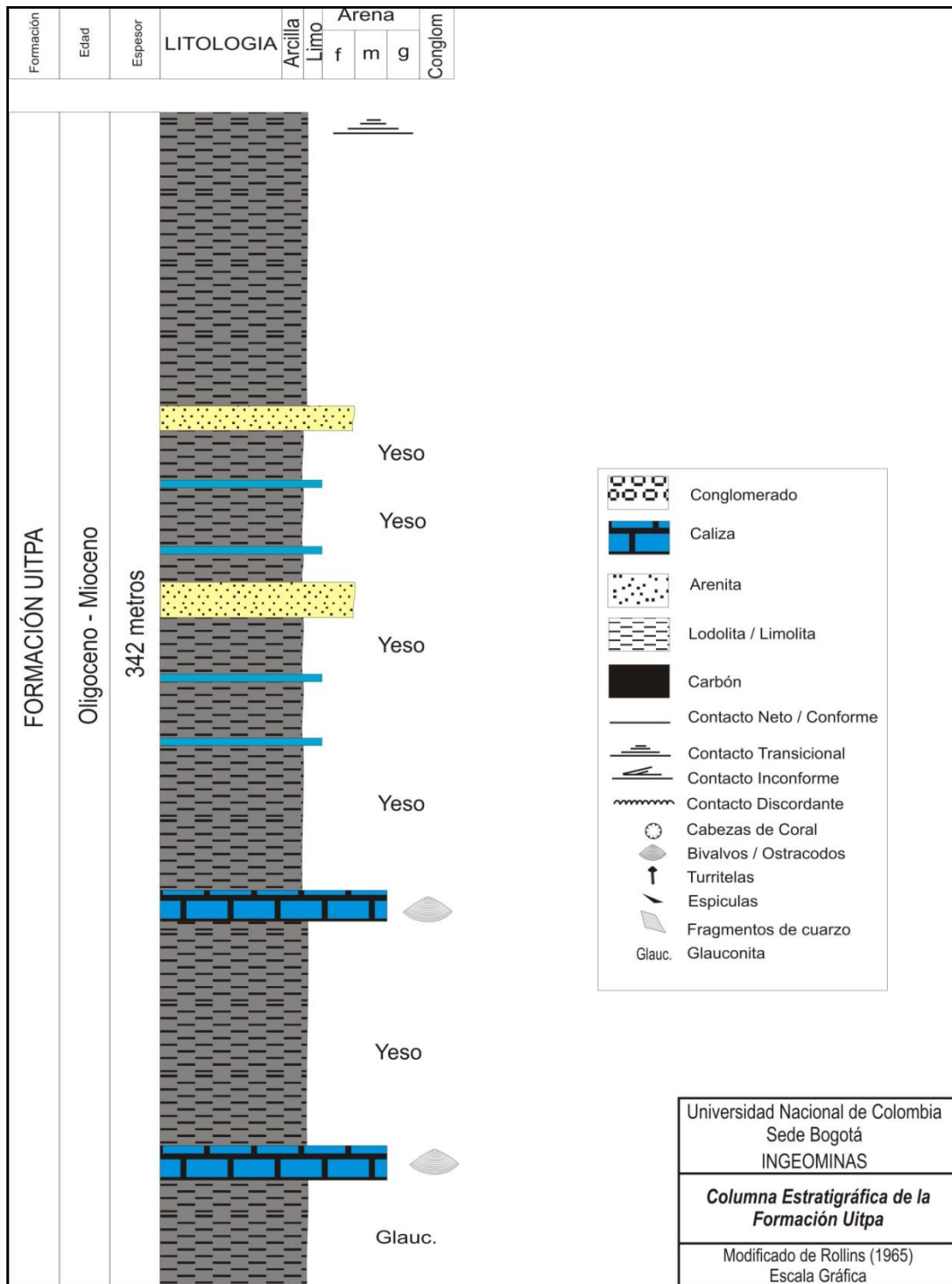


Figura 10. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Uitpa. Modificado de Rollins - 1965 (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

Los diferentes autores reportan, basados en la fauna fósil, edades diferentes para la Formación Uitpa. Becker & Dusenbury *et al.* (1958, en de PORTA, 1974) dan una edad de Aquitaniano mientras que Renz (1960, en ROLLINS, 1965) la ubica en la parte superior del Oligoceno medio y Rollins(1965) la ubica en el intervalo Oligoceno - Mioceno inferior. En la parte media hacia el tope, la macrofauna no es común en la Formación Uitpa, pero se registra microfauna compuesta por foraminíferos

2.3.4 Formación Jimol (Nj)

Propuesta por Renz (1960 en ROLLINS, 1965), la formación toma su nombre del Cerro Jimol y describe una secuencia de limolitas arenosas masivas de color café, expuestas en la parte central de la bahía de Cocinetas. Rollins (1965) redefine la unidad aclarando que “desafortunadamente, la descripción de los cuerpos de roca de la sección tipo proporcionados por Renz (1960 en ROLLINS, 1965) no son claros, y propone que las rocas que afloran en el Cerro Jimol pertenecen a la Formación Siamaná.

Morfológicamente, la Formación Jimol se manifiesta como una serie de valles y cerros tabulares, donde las capas poseen un comportamiento subhorizontal. En algunos lugares la unidad se presenta como pequeños cerros donde las capas se inclinan con suaves ángulos de buzamientos que varían entre los 10 y los 45° en dirección E-NE, predominando los ángulos bajos (Figura 11).

La Formación Jimol se compone de una secuencia de capas medias a gruesas de arenitas de cuarzo calcáreas, fragmentos líticos y restos de conchas cuyo tamaño varía entre arena muy fina a guijo grueso. Las arenitas exponen tonalidades amarillas y en algunas ocasiones rosadas, de 50 cm a 1 m de espesor, con estructuras internas de láminas medias a gruesas y estratificación inclinada con que se asciende estratigráficamente, gradando en su parte media a bioesparitas impuras con fragmentos de bivalvos en las que hay niveles arenosos. Se torna al tope como una unidad en la que predominan las arenitas finas intercaladas con limolitas, con abundante carbonato. Estas arenitas son duras, masivas, de grano medio a fino aunque posee algunos niveles de grano grueso; se presentan en capas medias a muy gruesas, algunas veces masivas sin estructuras sedimentarias, en otros se observa laminación inclinada y planar (Figura 12).

Los espesores estimados son variados. Renz (1960 en ROLLINS, 1965) al proponer la Formación Jimol, estima para esta un espesor aproximado de 940 m, Rollins (1965) al redefinir la unidad y aclarar que Renz había introducido parte de la Formación Siamaná, mide un espesor de 614 m en la localidad de referencia propuesta por este mismo autor.

Los contactos de la Formación Jimol se definen a la base como neto entre arenitas muy finas que suprayacen concordantemente las lodolitas y limolitas de la Formación Uitpa. Renz (1960 en ROLLINS, 1965) especifica que el contacto superior de la unidad no está claramente definido debido a la transgresión de la Formación Tucacas (modificada a Castilletes por RENZ, 1960 en ROLLINS, 1965) en el Mioceno sobre la Formación Jimol. Se asume que este contacto, aunque solo ha sido distinguible por sensores remotos y no ha sido observado aún en campo, es neto discordante por las direcciones de buzamiento de las capas, que en la Formación Jimol predominan al NW y en Castilletes son subhorizontales, buzando ligeramente ($>3^\circ$) hacia el NE y N.



Figura 11. Formación Jimol. Morfología típica de cerros de poca altura que buzcan suavemente hacia el Este (Imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, Cerro Jimol- 2011).

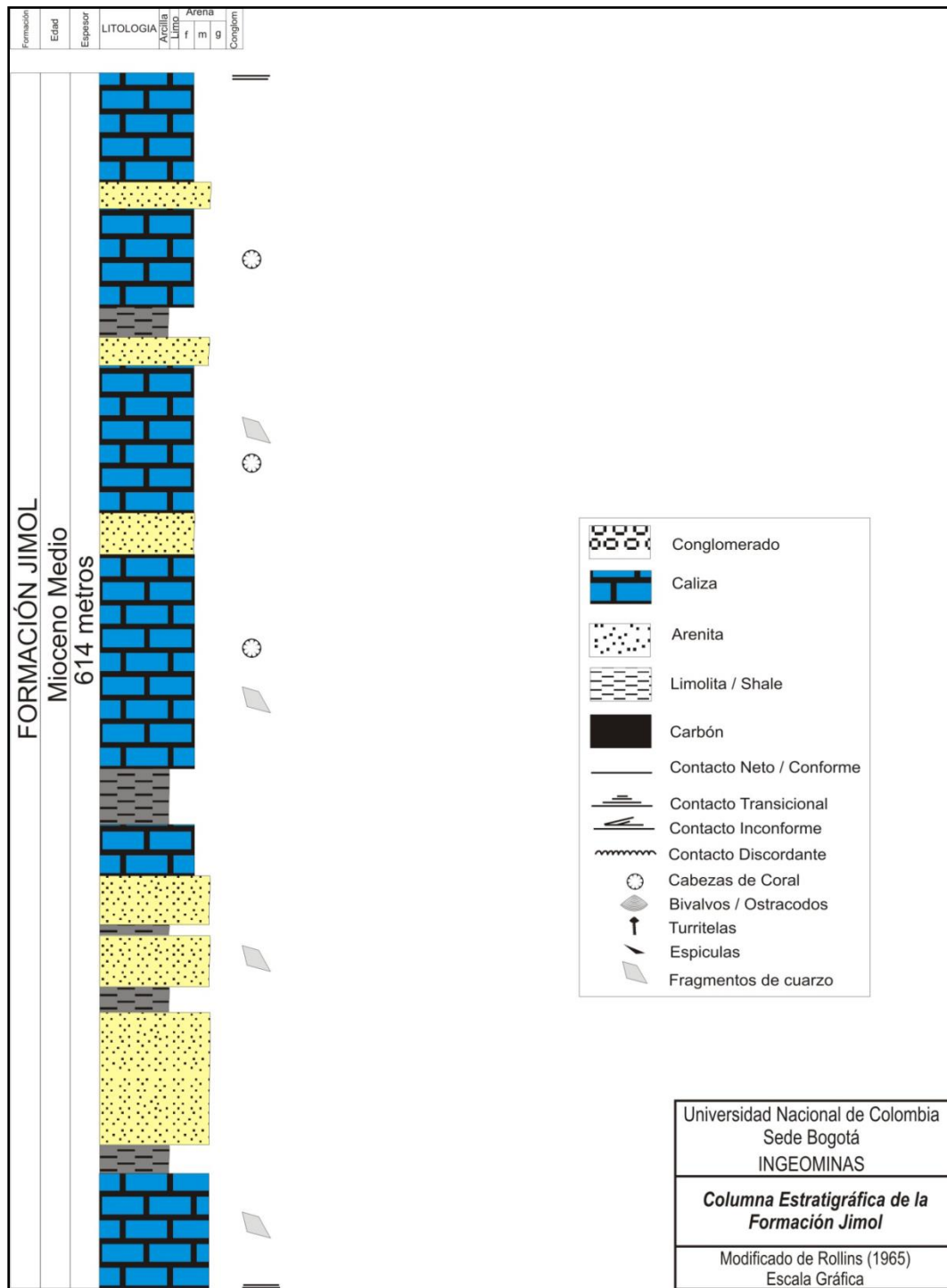


Figura 12. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Jimol. Modificado de Rollins - 1965 (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

Por su litología, las estructuras sedimentarias, la fauna fósil registrada y el estado de la misma, buena parte en posición de vida, se supone para la Formación Jimol un ambiente de depositación de aguas marinas someras, con eventuales ambientes de playa que posiblemente se mantuvieron estables por prolongados periodos de tiempo, y que fueron intercalados con ascensos ligeros del nivel del mar, que al desplazar continente adentro la línea de costa, generó ambientes con regímenes energéticos ligeramente mayores, propicios para la acumulación de múltiples fragmentos de conchas y material lítico de distinta procedencia.

Al suprayacer a la Formación Uitpa, la Formación Jimol es posiblemente Mioceno Medio, según Rollins (1965), quien la ubica en esta época por la macrofauna reportada, rica en pelecípodos y gastrópodos.

2.3.5 Formación Castilletes (Nc)

El nombre Formación Castilletes hace alusión a una población en el extremo NE de la frontera Colombo-Venezolana, en el sector de Bahía de Cocinetas. Es propuesta por Rollins (1965), quien a su vez la formula como una redefinición de la Formación Tucacas de Renz (1960 en ROLLINS, 1965). La idea de Rollins (1965) de sustituir el término “Tucacas” por “Castilletes” obedece a que el primero planteaba confusión con el nombre de una población en el estado de Falcón de Venezuela.

Su rasgo morfológico principal está asociado con mesetas de bases amplias y topes planos con alturas menores a 20 m. En el sector E de La Alta Guajira, en los alrededores de la Bahía de Cocinetas, presenta escarpes abruptos, que frecuentemente se encuentran cubiertos por bloques métricos a decamétricos de coloraciones amarillas, rosadas, pardas claras y blanquecinas cuyo espesor promedio oscila entre 20 y 30 metros (Figura 13).

La Formación Castilletes se caracteriza por presentar bioesparitas, arenitas calcáreas y lodolitas calcáreas dispuestas en capas medias a gruesas, con geometrías tabulares, usualmente no están fracturadas, diaclasadas o falladas. Al norte de la zona de estudio, la base de la Formación Castilletes comprende intercalaciones de conglomerados arenosos, arenitas conglomeráticas y arenitas calcáreas. Ascendiendo estratigráficamente se observa conglomerados de gránulos y guijos muy finos subredondeados, compuestos por cuarzo, cuarcitas y esquistos, cementados por material calcáreo (Figura 14). Los fósiles de ostras y bivalvos son abundantes. Al tope se encuentra un conglomerado arenoso de guijos finos y granulares, con cemento calcáreo, estratificación plana paralela y granodecrecimiento al tope, dispuesto en capas muy gruesas (2 metros.) Los guijos son de cuarzo lechoso y algunas cuarcitas. El registro microfósil observado corresponde a ostreidos, bivalvos pectínidos, gastrópodos tipo melongenas, turritelas y a nivel microscópico restos de algas rojas.



Figura 13. Formación Castilletes. Morfología típica de laderas con pendientes subverticales formando mesetas de bases anchas y topes planos con capas menos susceptibles a la erosión (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, Corregimiento de Castilletes- 2011).

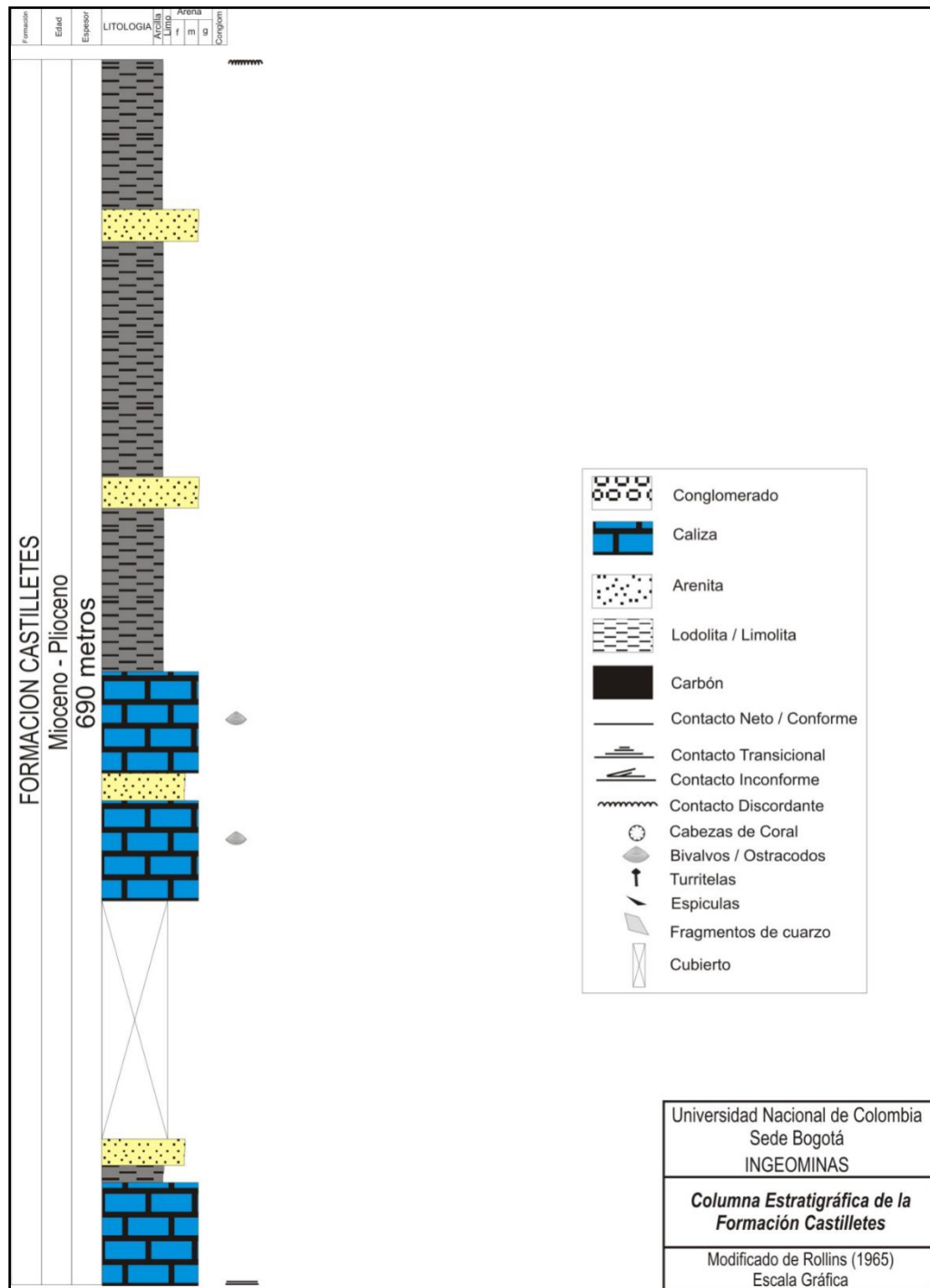


Figura 14. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Castilletes. Modificado de Rollins - 1965 (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

El espesor que alcanza la Formación Castilletes en el área de la Alta Guajira, según Rollins (1965) es de 690 m, mientras que según Thomas (1972) es de 200 m. Sin embargo, las observaciones de campo determinan un espesor preliminar no superior a 20 o 30 m., teniendo en cuenta la estratificación subhorizontal de la unidad en toda la Alta Guajira.

La Formación Castilletes se encuentra infrayacida en un contacto neto por la Formación Uitpa. Es suprayacida discordantemente por depósitos de tipo eólico, de llanura de inundación y de cauce aluvial.

Se propone un ambiente marino somero, (presencia de backgrounds) con una temperatura posiblemente superior a la actual dado que el tamaño de los fragmentos fósiles es mayor al de los organismos actuales, posiblemente de playa, o cercano a ésta, de aguas claras, y poco sedimento disuelto en el fluido, condiciones evidenciadas en la presencia de las algas rojas y de sedimentos depositados en un régimen energético alto.

Thomas (1972) con base en macrofósiles del phylum Mollusca propone una edad Mioceno medio – Plioceno y Ramírez (2007) retoma dichas edades y las soporta con base en estratigrafía de secuencias transgresivas y regresivas, correlaciones de superficies de máxima inundación, abundancia de TOC y datos de pozos. El registro fósil en el sector de Bahía Cocinetas en las capas basales de la formación, según Thomas (1972) está representado por bivalvos, scaphopodos y gastropodos.

2.4 DEPÓSITOS CUATERNARIOS

En La Alta Guajira se presenta una amplia variedad de depósitos recientes, algunos de los cuales aún están en formación en procesos que ocurren de manera simultánea pero unos más activos que otros. Son cuerpos semi-consolidados e inconsolidados de gran extensión areal, ya que recubren las topografías desarrolladas por las unidades ígneas, metamórficas y sedimentarias descritas anteriormente.

2.4.1 Depósitos de Cauce Aluvial (Qca)

El nombre de esta unidad es retomado de Rodríguez & Londoño (2002) quien toma esta denominación de Mosquera *et al.* (1976) para denominar depósitos acumulados en las márgenes de ríos y arroyos. En los períodos de sequía se encuentran en el interior de los cauces de arroyos intermitentes.

Generalmente presentan superficies lisas, de texturas suaves, tamaño de grano fino que rellenan bajos topográficos y que en fotografías aéreas e imágenes de satélite presentan alto contraste respecto a las unidades circundantes. Su extensión areal es muy variable, puesto que a pesar que puede alcanzar varios kilómetros de largo, su ancho puede oscilar entre pocos metros hasta uno o dos

kilómetros. Su profundidad oscila desde pocos centímetros hasta pocas decenas de metros.

Esta unidad corresponde a depósitos semi-consolidados y no consolidados de origen aluvial que en algunos lugares se encuentran mezclados con material de origen eólico, por disgregación de la capa superior del suelo actual o de las unidades geológicas sobre las que discurren las corrientes. Están constituidos por gravas, arenas y arcillas en proporciones muy variables de acuerdo con la distancia a la fuente de transporte, cubriendo áreas extensas en las zonas planas y bajas topográficamente (Figura 15).



Figura 15. Depósitos de cauce aluvial. Aspecto general de los depósitos generados por un arroyo estacional. Nótase la variedad de cantos de diferentes tamaños (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, arroyo Choua, Choichirim – 2011).

Los depósitos de cauce aluvial reciente suprayacen de manera irregular neta a todas las unidades sobre las cuales se depositan, por lo cual se consideran de edad reciente.

Estos depósitos se forman debido a la actividad actual de las corrientes de agua continentales de diferente orden que tiene su mayor tasa de actividad en las épocas de lluvias en la región.

Los depósitos de cauce aluvial son de edad reciente ya que suprayacen la totalidad de las unidades cartografiadas. Además es evidente su proceso continuo de formación.

2.4.2 Depósitos Eólicos (Qe)

Nombre informal para definir y describir los depósitos de origen eólico, los cuales son formados por la acumulación de arena de playa transportada por el viento. Son producto del proceso geológico más activo actualmente en La Guajira: la erosión eólica

Se encuentran distribuidas ampliamente hacia partes intermedias de las serranías de Cosinas, Macuira y Jarara, como producto de la depositación de material transportado por corrientes de los aslisios que soplan desde la Costa Caribe. Ocasionalmente se encuentran fuertemente disectadas por la acción erosiva de los arroyos y en otros sectores se han estabilizado por la presencia de vegetación (Figura 16).



Figura 16. Depósitos Eólicos (Qe). Vista panorámica desde el flanco sur de la Loma Youleman (sur de la Serranía de Jarara) hacia el este, donde se observa la disposición de los depósitos eólicos sobre rocas sedimentarias del Terciario en posición subhorizontal (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

En general las arenas se caracterizan por ser depósitos espesos, poco o nada consolidados, que presentan un color que varía desde amarillo claro a amarillo intenso, con tamaño de grano arena fina a muy fina, muy bien seleccionadas y con granos subredondeados. Composicionalmente se caracterizan por un alto

contenido de cuarzo (80%) y contenidos menores de feldespato (10%) y fragmentos líticos de color negro (10%) que podrían corresponder a minerales pesados. En algunos sectores las arenas eólicas presentan un contenido moderado de fragmentos de conchas.

2.4.3 Depósitos de Llanuras de Inundación (QII)

El nombre de esta unidad corresponde a una nomenclatura de carácter informal (RODRÍGUEZ & LONDOÑO, 2002). Es una de las unidades con mayor distribución areal, ya que como su nombre lo indica está asociada a los depósitos generados por los drenajes (intermitentes) presentes en la zona de estudio.

Geomorfológicamente se caracterizan por generar relieves muy planos, extensos y poco disectados.

Estos depósitos de escasa profundidad son de carácter inconsolidado a semi-consolidado, presentan un tamaño de grano arena fina a arcilla y color café-amarillento. Son matriz soportados, con relación matriz: armazón variable (generalmente 90:10%). La matriz del depósito presenta tamaño de grano arcilla, la cual embebe fragmentos blancos de costras calcáreas denominadas “caliche” con tamaño de grano menor a 1 cm y fragmentos de rocas negras con texturas afaníticas. En la parte superior es común observar grietas que permiten la filtración de carbonatos a las capas inferiores (Figura 17).



Figura 17. Depósitos de Llanura de Inundación. Aspecto general de la acreción vertical de los depósitos formados mediante la descarga del material en suspensión transportado por la corriente de agua al desbordarse un cauce (imagen tomada en la comisión de muestreo de aguas para análisis fisicoquímico, arroyo Choua, Choichirimana- 2011).

Esta unidad se encuentra suprayaciendo de manera discordante la mayoría de las unidades aflorantes en la Alta Guajira, debido a su amplia extensión areal.

El origen de estos depósitos está relacionado con la dinámica de los arroyos presentes en el área, los cuales por su naturaleza torrencial intermitente (sólo se comportan como arroyos en época de invierno) generan amplios depósitos durante su desborde.

Teniendo en cuenta que estos depósitos están asociados a la dinámica fluvial actual, se le atribuyen una edad reciente (Holoceno).

2.4.4 Depósitos de Llanuras Intermareal (QII)

Nombre informal bajo el cual se incluyen los depósitos inconsolidados de color café oscuro, identificados a lo largo de las zonas costeras. Estos depósitos comprenden una gran extensión areal, formando topografías planas, las cuales están limitadas por las colinas suaves y redondeadas de las formaciones adyacentes (Figura 18).



Figura 18. Depósitos de Llanura Intermareal (QII). Desarrollo de morfologías bajas y planas limitadas por colinas bajas, en este caso de la Formación Uitpa (Eu), Bahía Portete (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

Estas llanuras composicionalmente corresponden a lodos cohesivos, calcáreos, en cuya superficie se presentan grietas de desecación continuas y de forma hexagonal. Hacia el sector oriental de Puerto Nuevo, se presentan zonas de

manglar. Su ambiente de depositación se relaciona a la acumulación de material fino por acción mareal.

2.4.5 Depósitos Evaporíticos Recientes (Qes)

Nombre informal empleado para denominar los depósitos marinos restringidos o cerrados que están cercanos a la costa actual asociados con la evaporación de aguas ricas en sales. Se diferencian de los depósitos de llanura mareal en que estos se desarrollan como consecuencia de los ciclos mareales diarios, mientras que los evaporíticos no obedecen a dichos ciclos.

Los depósitos evaporíticos recientes tienen morfologías planas, desarrolladas a nivel del mar y se extienden en áreas que pueden alcanzar varios kilómetros cuadrados de extensión.



Figura 19. Depósitos Evaporíticos Recientes (Qes). Nótese la alta concentración de sales minerales precipitadas sobre el sedimento marino posterior a la evaporación del agua. La mayor concentración de precipitados corresponde a yeso, halita y posiblemente a carbonatos ya que efervescen ligeramente al contacto con HCl (tomado del Convenio INGEOMINAS-UNAL, 2009).

Los depósitos evaporíticos en la Alta Guajira están asociados con aguas poco profundas y tranquilas desarrollados en playas que conservan diferentes proporciones de humedad en su interior. Están conformados por sedimentos semi-consolidados con tamaños de grano arena media a fina color café oscuro, en fragmentos subangulares y bien seleccionados. La composición principal es de cuarzo, feldespato y eventualmente magnetita. Los fragmentos terrígenos comprenden cuarcitas y algunos fragmentos biogénicos. Igualmente se

encuentran arcillas plásticas que cuando el agua de mar se evapora, forman polígonos de desecación de colores grises o negros, estos últimos cuando están asociados con materia orgánica.

Se encuentran suprayaciendo todas las unidades costeras aflorantes en la zona de estudio, razón por la cual se consideran de edad reciente. Esta unidad es coetánea con todos los depósitos marinos recientes dado que actualmente se están produciendo nuevos depósitos de este tipo.

3. ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO

Con la información hidroclimatológica del IDEAM, se desarrolló una base de datos con 15 estaciones presentes en el área de estudio para evaluar el componente climatológico del área de estudio

En la Tabla 1 se relacionan las diferentes estaciones analizadas y evaluadas (ver Anexo C).

Tabla 1. Estaciones hidroclimatológicas presentes en la Alta Guajira (IDEAM)

ESTACION	NOMBRE ESTACION	TIPO ESTACION	FECHA INSTALACION
1507006	BUENOS AIRES	PM	1971-jul
1507019	CAIMITO	PM	1978-abr
1507007	IRRAIPA	PM	1971-ago
1507008	KAURAQUIMANA	PM	1971-jul
1508502	NAZARETH	CP	1971-jul
1507002	NUEVO AMBIENTE	PM	1971-jul
1507009	PERPANA	PM	1971-jul
1507506	PTO BOLIVAR	CP	1986-oct
1508001	PTO ESTELLA	PM	1971-Jul
1508009	PTO LÓPEZ	PM	1937-Sep
1508504	RANCHO GRANDE	CO	1971-Jul
1508004	SIAPANA	PM	1971-jul
1508007	SILLAMANA	PM	1971-Jul
1508002	SIPANAO	PM	1971-jul
1507020	TUMAMANA	PM	1979-ene

3.1 HUMEDAD RELATIVA (%)

La humedad relativa promedio en el área de estudio es del orden de 74%, con valores máximos en los meses de octubre a diciembre y menores el resto del año (Figura 20)

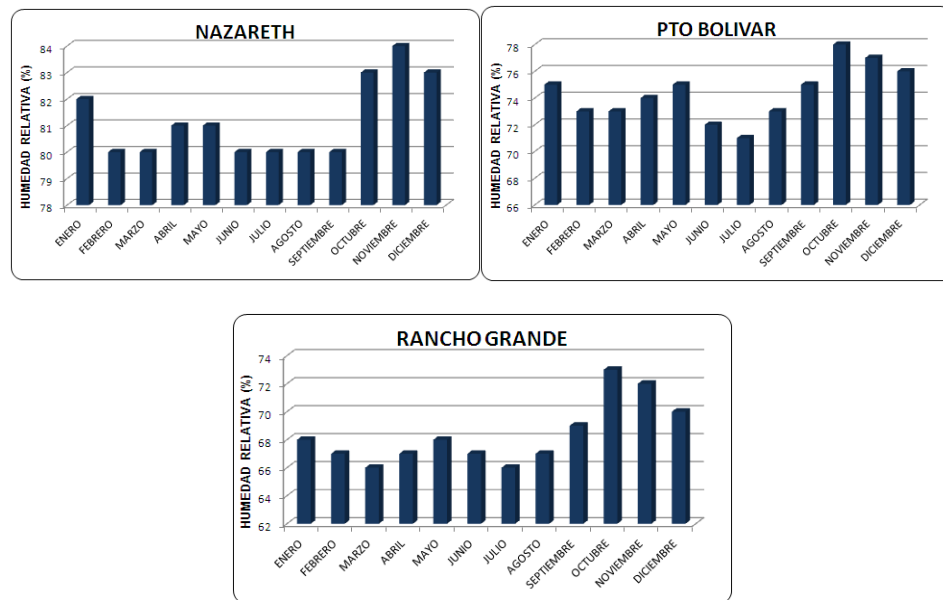


Figura 20. Histogramas de Humedad Relativa para estaciones localizadas en el municipio de Uribá (fuente: IDEAM).

3.2 BRILLO SOLAR (H/DÍA)

Brillo Solar obtenido a través de la información del IDEAM denota que los meses de junio a septiembre presenta los periodos de mayor brillo solar y de menor brillo solar los meses de abril - mayo y octubre - noviembre. El valor promedio es del orden de 7.51 h/día para las estaciones evaluadas (Figura 21).

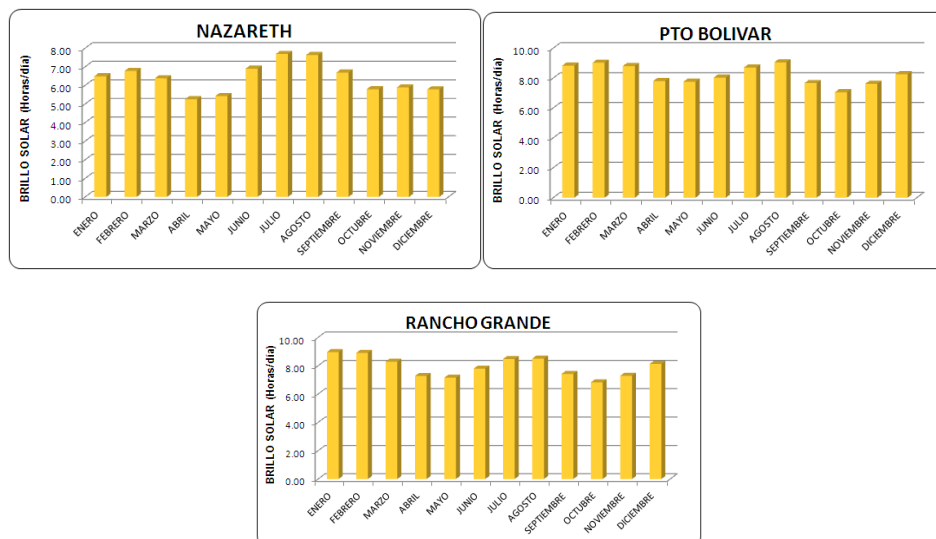


Figura 21. Histogramas de Brillo Solar para estaciones localizadas en el municipio de Uribá (fuente: IDEAM).

3.3 PUNTO DE ROCÍO

El valor promedio para las estaciones evaluadas es del orden de 23.1 con los mayores valores en los meses de abril a diciembre y con los menores valores los meses de enero a marzo (Figura 22).

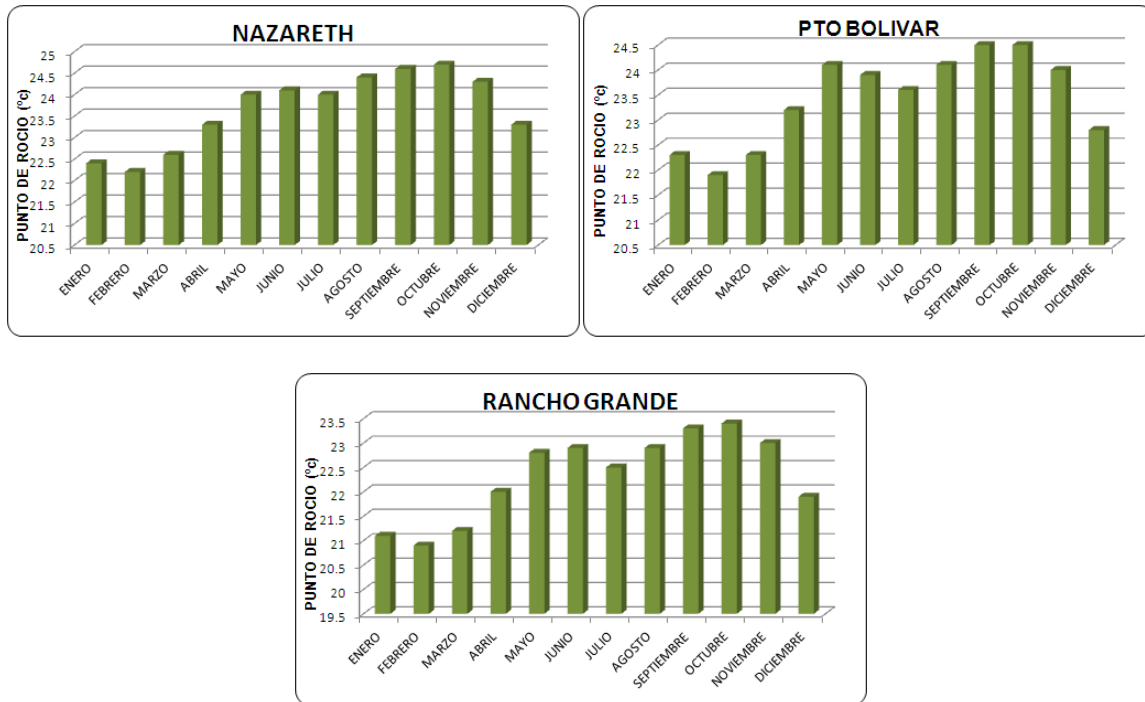


Figura 22. Histogramas de Punto de Rocío para las estaciones localizadas en el municipio de Uribia (fuente: IDEAM).

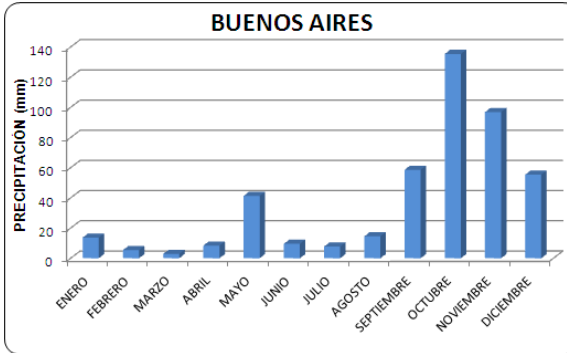
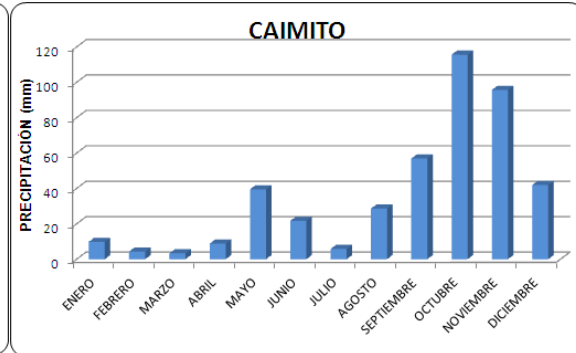
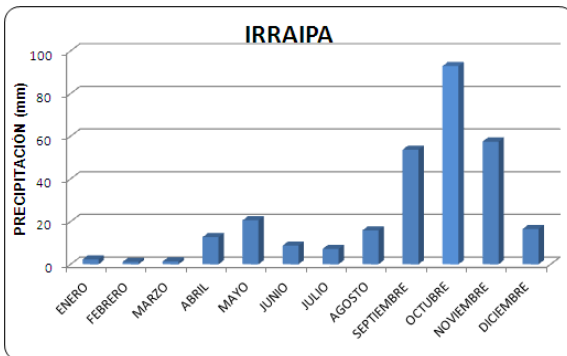
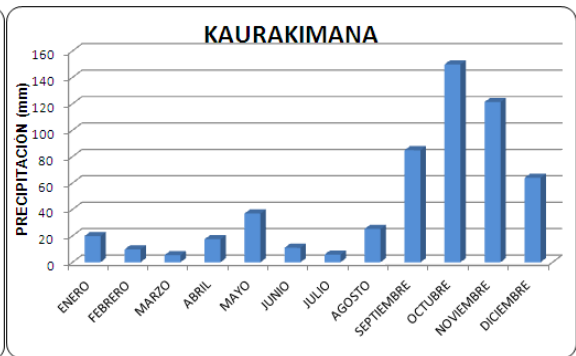
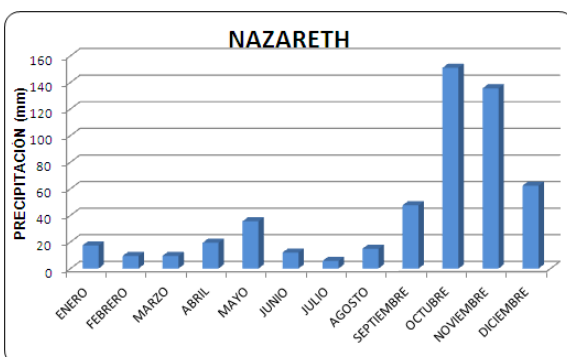
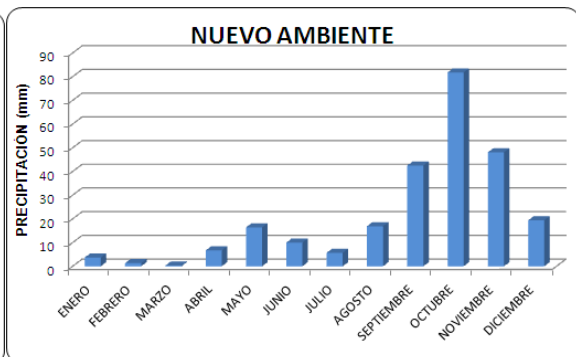
3.4 PRECIPITACIÓN (P)

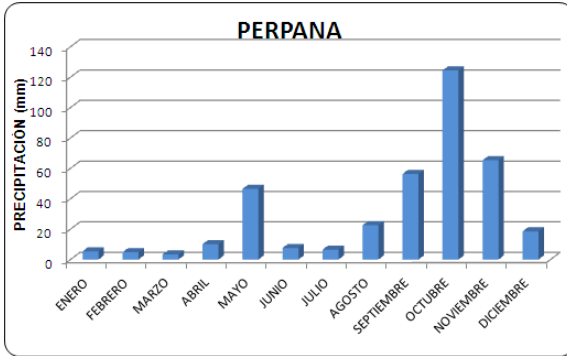
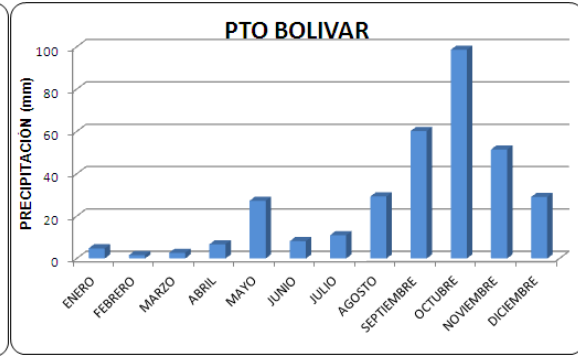
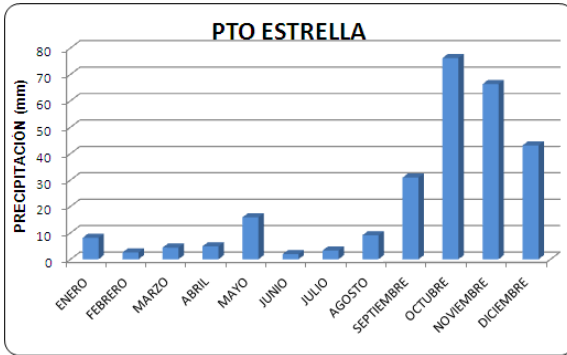
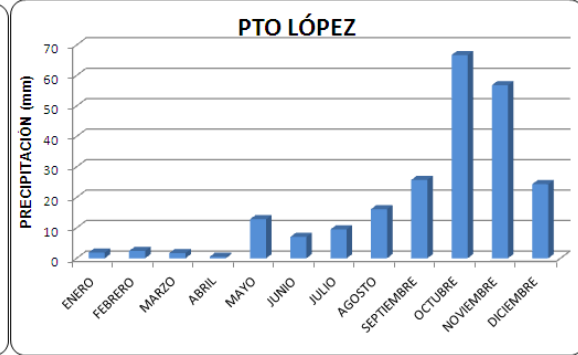
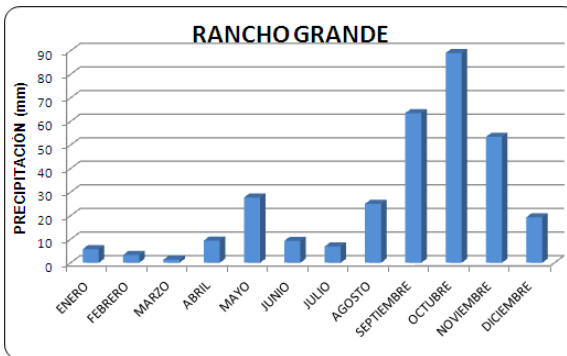
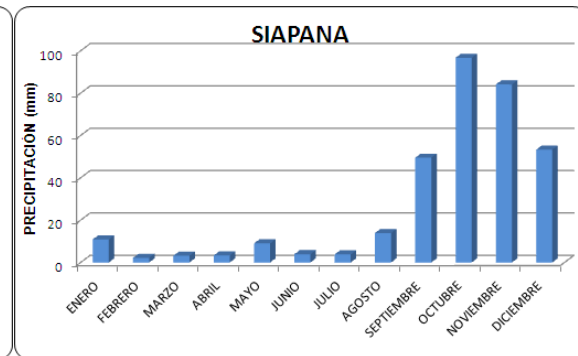
A continuación se observan los diferentes histogramas (Figura 23), con un comportamiento unimodal, con la mayor precipitación en los meses de octubre y noviembre, siendo el de máxima precipitación el mes de octubre.

Los valores de menor precipitación se presentan el resto del año siendo los más críticos en los meses de febrero, marzo y julio.

Para el cálculo de la Precipitación (P) media se emplearon dos métodos: Mapa de Isoyetas y la Media Aritmética. Para el primer caso, se trazaron isolíneas con el valor promedio multianual de precipitación de 15 estaciones, cuyo valor es del orden de 333 mm/año en la zona de interés (Figura 24).

Con el segundo método, cálculo de la precipitación por medio de la Media Aritmética se obtiene un valor de 342,5 mm/año.





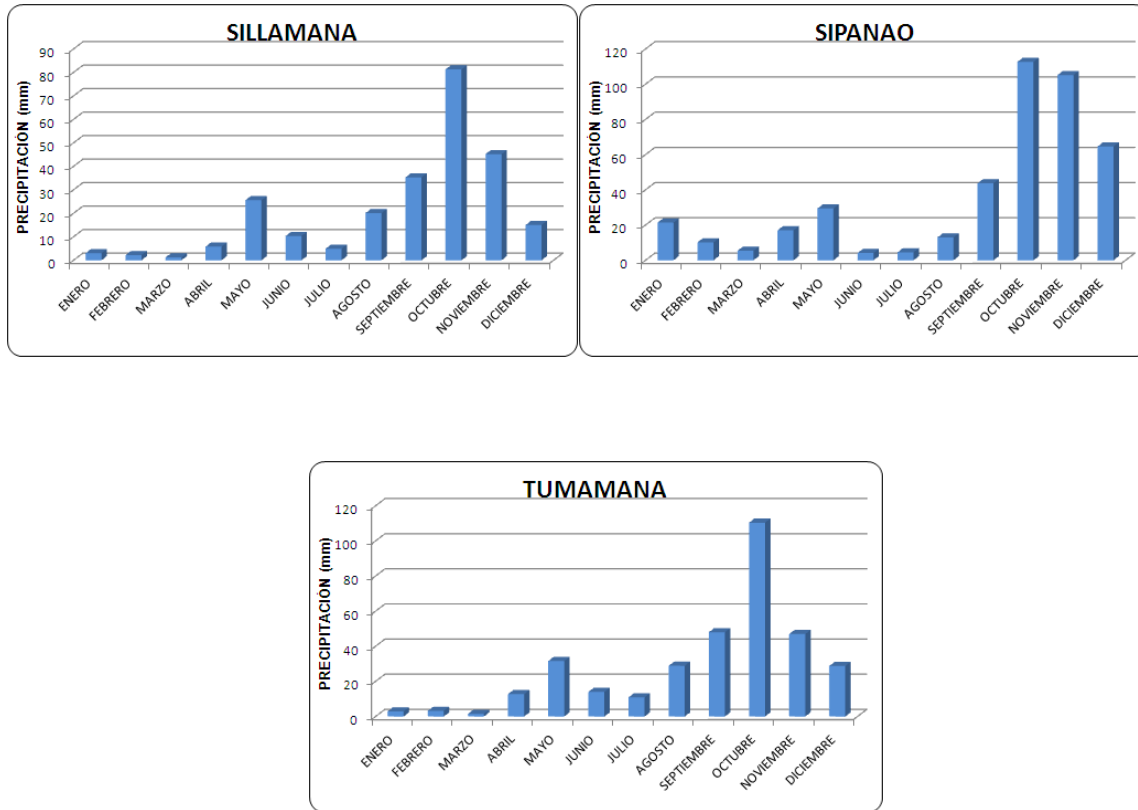


Figura 23. Histogramas de precipitación para las estaciones localizadas en el municipio de Uribá (Fuente: IDEAM).

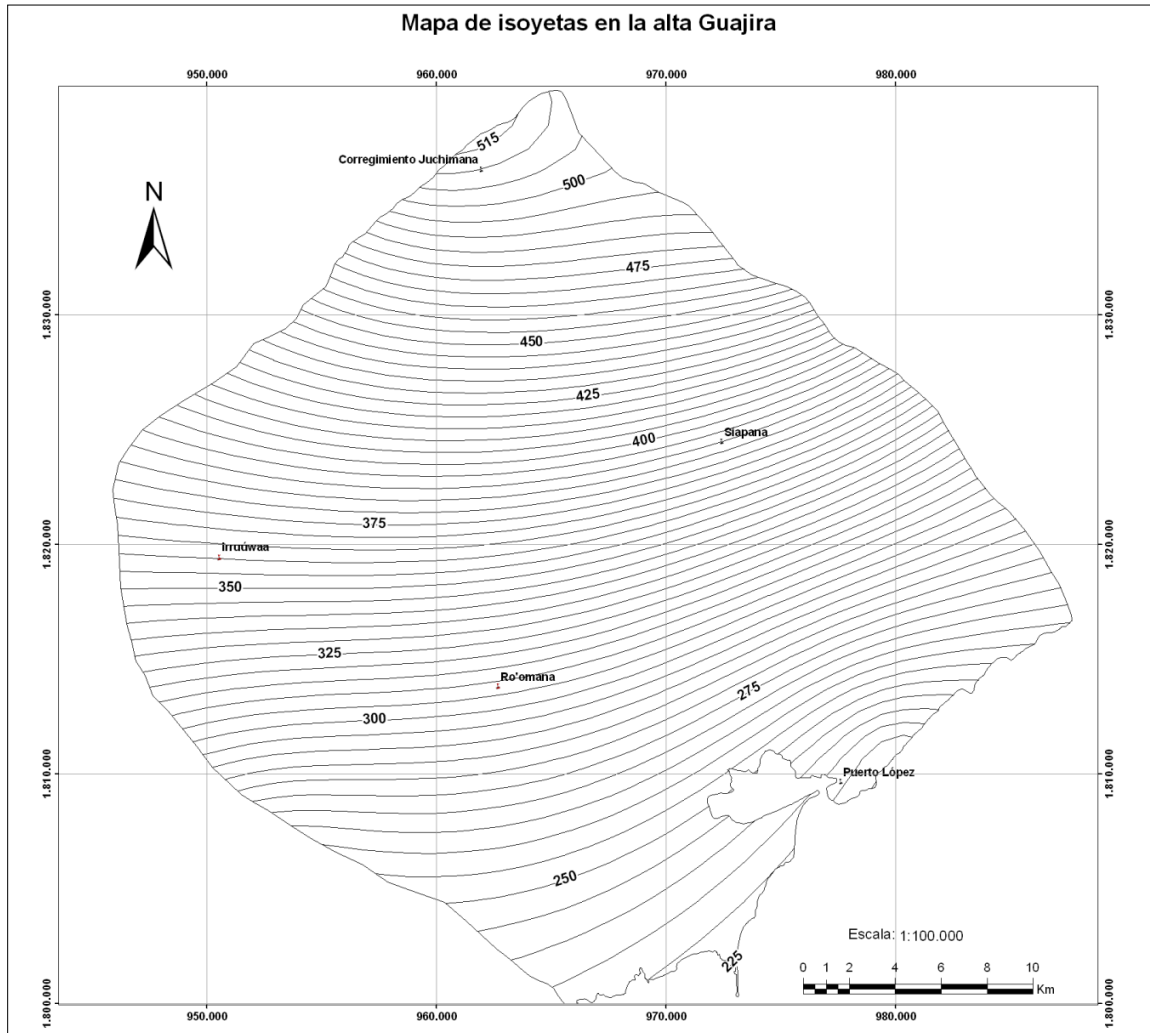


Figura 24. Mapa de isoyetas de la Alta Guajira.

3.5 TEMPERATURA (°C)

La temperatura (Figura 25) se ha tomado de las estaciones climatológicas existentes en el área de influencia del área de estudio. A continuación se presentan los diferentes histogramas, en los cuales se observa un comportamiento monomodal, con temperaturas máximas en agosto - septiembre y mínimas en enero y febrero; con un valor promedio de 28.1 °C.

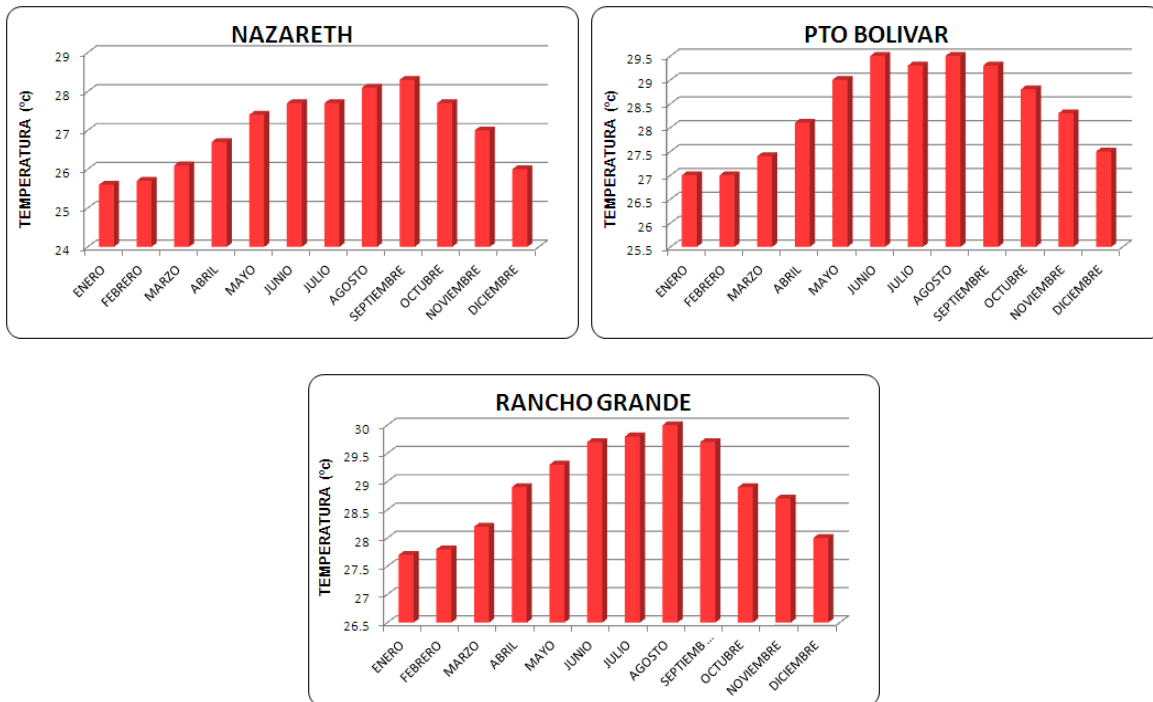


Figura 25. Histogramas de temperatura para las estaciones localizadas en el municipio de Uribia (Fuente: IDEAM).

3.6 ECUACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO – CÁLCULO DE PARÁMETROS

La ecuación general del ciclo hidrológico está dada por los siguientes parámetros que integran la entrada y salida del agua hasta el punto de aforo de los arroyos.

$$P = ETR + R + I$$

Donde:

- P = Precipitación
- ETR = Evapotranspiración Real
- I = Infiltración
- R = Escorrentía

Dado que no siempre las entradas son iguales a las salidas en el balance de masas, la ecuación se compensa con el cambio de almacenamiento que tiende a cero (0) cuando se procesa un suficiente número de años.

Se analizaron las diferentes metodologías para determinar los valores de Evapotranspiración Potencial (ETP), con el programa “Macra” se pudieron obtener los valores de ETP con 6 metodologías diferentes una vez habiendo procesado, para cada estación, los parámetros exigidos en cada método (Tabla 2, Figura 26), los cuales exigen valores de Brillo Solar (horas/día), Humedad Relativa (%), Precipitación (mm/año), Temperatura (°C), Velocidad del Viento (m/s) y Tensión de Vapor (Mb); adicionalmente de los valores de latitud, longitud y altura para cada estación hidroclimatológica. Es importante aclarar que hasta esta instancia sólo se tomó la información de las estaciones (CP) de Nazareth y Puerto Bolívar que son las que contienen la mayor cantidad de parámetros necesarios para el cálculo de ETP con el programa “Macra”

Tabla 2. Síntesis de los valores obtenidos para el cálculo de Evapotranspiración Potencial (ETP) con el programa “Macra” para las estaciones de Nazareth (arriba) y Puerto Bolívar (abajo)

	En	Fe	Ma	Ab	Ma	Jn	Jl	Ag	Se	Oc	No	Di	Media Multianual
TURC	100.5	102.1	116.3	111.1	112.3	122.5	129.6	131.1	123.2	109.2	100.9	93.6	1352.3
HARGREAVES	78.5	81.4	98.7	98.2	103.2	102.0	105.7	106.9	101.6	90.0	76.2	74.8	1117.1
GARCÍA Y LÓPEZ	131.8	122.7	140.4	139.0	149.9	149.9	154.9	158.6	155.3	148.0	135.2	133.3	1719.0
THORTHWAITE	118.3	106.8	127.5	134.8	154.1	155.6	160.8	170.0	169.1	160.8	140.8	125.6	1724.3
CHRISTIASEN	115.8	113.5	139.8	127.4	135.2	151.3	165.4	166.2	146.9	121.7	105.6	102.9	1591.7
PENMAN	116.8	112.4	139.7	135.9	144.0	152.2	161.9	161.9	146.6	130.1	112.2	106.2	1619.9

	En	Fe	Ma	Ab	Ma	Jn	Jl	Ag	Se	Oc	No	Di	Media Multianual
TURC	119.0	120.1	137.8	134.2	133.5	134.1	140.6	145.6	133.1	120.9	117.0	113.4	1549.1
HARGREAVES	95.2	97.3	117.7	118.2	122.4	125.2	131.5	127.7	115.7	104.6	94.0	94.0	1343.5
GARCÍA Y LÓPEZ	159.5	148.1	167.9	167.1	179.4	185.9	192.5	189.5	176.5	170.0	163.1	164.4	2063.8
THORTHWAITE	141.3	127.6	150.8	163.3	194.2	202.8	203.3	209.5	196.7	188.3	171.2	153.3	2102.1
CHRISTIASEN	160.8	161.6	191.8	181.6	187.8	187.5	201.7	210.1	181.9	159.5	152.4	155.5	2132.0
PENMAN	230.2	226.5	267.5	272.5	277.9	293.6	309.5	280.1	231.1	212.0	199.3	213.9	3014.1

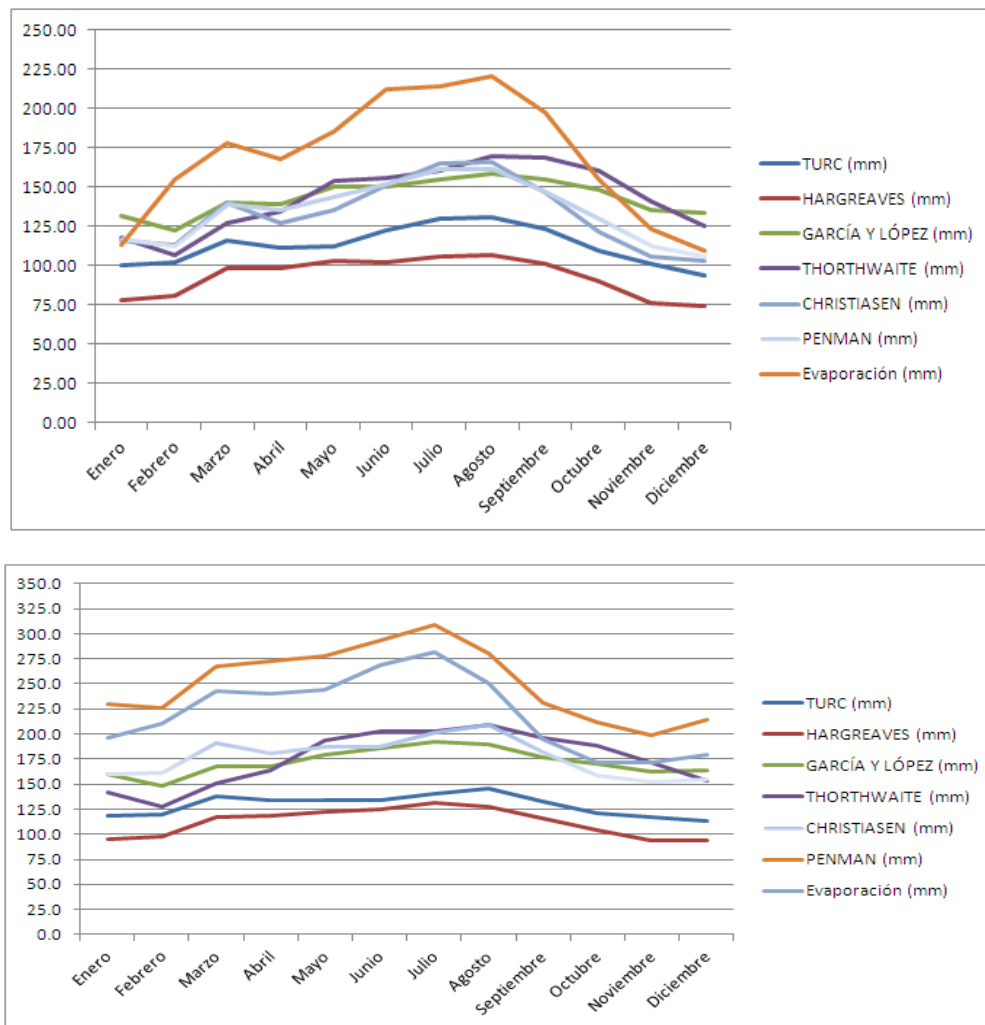


Figura 26. Graficas realizadas con los valores del cálculo de Evapotranspiración Potencial (ETP) mencionados en la tabla 2. Arriba estación de Nazareth, abajo estación de Puerto Bolívar.

Teniendo en cuenta el valor reportado del parámetro Evaporación en las estaciones de Nazareth y Puerto Bolívar por el IDEAM, se puede concluir, gráficamente, que el método que sigue la tendencia en magnitud de acuerdo a los resultados obtenidos con el software “Macra” a los reportados en cada una de las estaciones es Christiasen para el caso de Nazareth y Penman para la estación de Puerto Bolívar

3.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR)

Teniendo en cuenta la información suministrada por el IDEAM, las únicas estaciones climatológicas cercanas al área de estudio que existen, registran los valores del parámetro Temperatura. Las cuales son las de Nazareth y Puerto

Bolívar; se calculó el valor de la evapotranspiración real por medio del método de *TURC*, teniendo en cuenta una temperatura promedio anual de 27°C y de 28.4 °C respectivamente para las estaciones mencionadas:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}}$$

Dónde: L1 = Estación de Nazareth

L2 = Estación de Puerto Bolívar

L3 = Estación de Rancho Grande

P = 344,7 mm/año (Isoyetas)

P = 357,3 mm/año (Media Aritmética)

$$L1 = 300 + 25t + 0.05t^2 = 1011,49 \quad \text{con } t = 27^\circ \text{C}$$

ETR = 341,92 mm/año (Isoyetas)

$$L2 = 300 + 25t + 0.05t^2 = 1050,14 \quad \text{con } t = 28.4^\circ \text{C}$$

ETR = 343,34 mm/año (isoyetas)

ETR = 354,48 mm/año (Media Aritmética)

$$L3 = 300 + 25t + 0.05t^2 = 1064,06 \quad \text{con } t = 28.9^\circ \text{C}$$

ETR = 343,83 mm/año (Isoyetas)

4. PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

En el mes de agosto de 2010 se realizó una campaña de exploración geofísica empleando el método de resistividad eléctrica. Como resultado de esta campaña se adquirieron 114 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) con apertura máxima entre electrodos de corriente de 1400 metros, con los cuales se evaluó el subsuelo del área para identificar las unidades o materiales saturados con agua dulce, secos o con agua salobre.

Los sondeos realizados en el área de estudio utilizaron el arreglo electródico tipo “Schlumberger”, en el cual se incrementa la separación entre los electrodos de corriente AB, mientras que los electrodos de potencial MN permanecen fijos a una distancia preferiblemente inferior a 1/5 de AB; esta distancia se varía cuando la diferencia de potencial entre los electrodos MN es muy baja y no puede diferenciarse del potencial natural del suelo.

4.1 CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS.

Con el objeto de establecer de una forma más clara la relación entre las capas interpretadas con los materiales presentes, su posible grado de saturación con agua y características de esta, se realizó un análisis de los modelos geoeléctricos de los sondeos realizados y se generaron gráficas de distribución de los rangos de resistividad propuestos para cada una de las unidades geológicas que afloran en la zona:

En las gráficas de la Figura 27 se puede evidenciar que en unidades con abundancia de materiales de grano fino a muy fino (lodolitas) como la Formación Uitpa, predominan las capas con resistividad de 1 a 3 Ω .m y en general inferiores a 10 Ω .m mientras que aquellas con predominio de materiales arenosos y calcáreos (formaciones Jimol y Siamaná) tienden a presentar resistividades superiores, generalmente entre 3 a 90 Ω m.

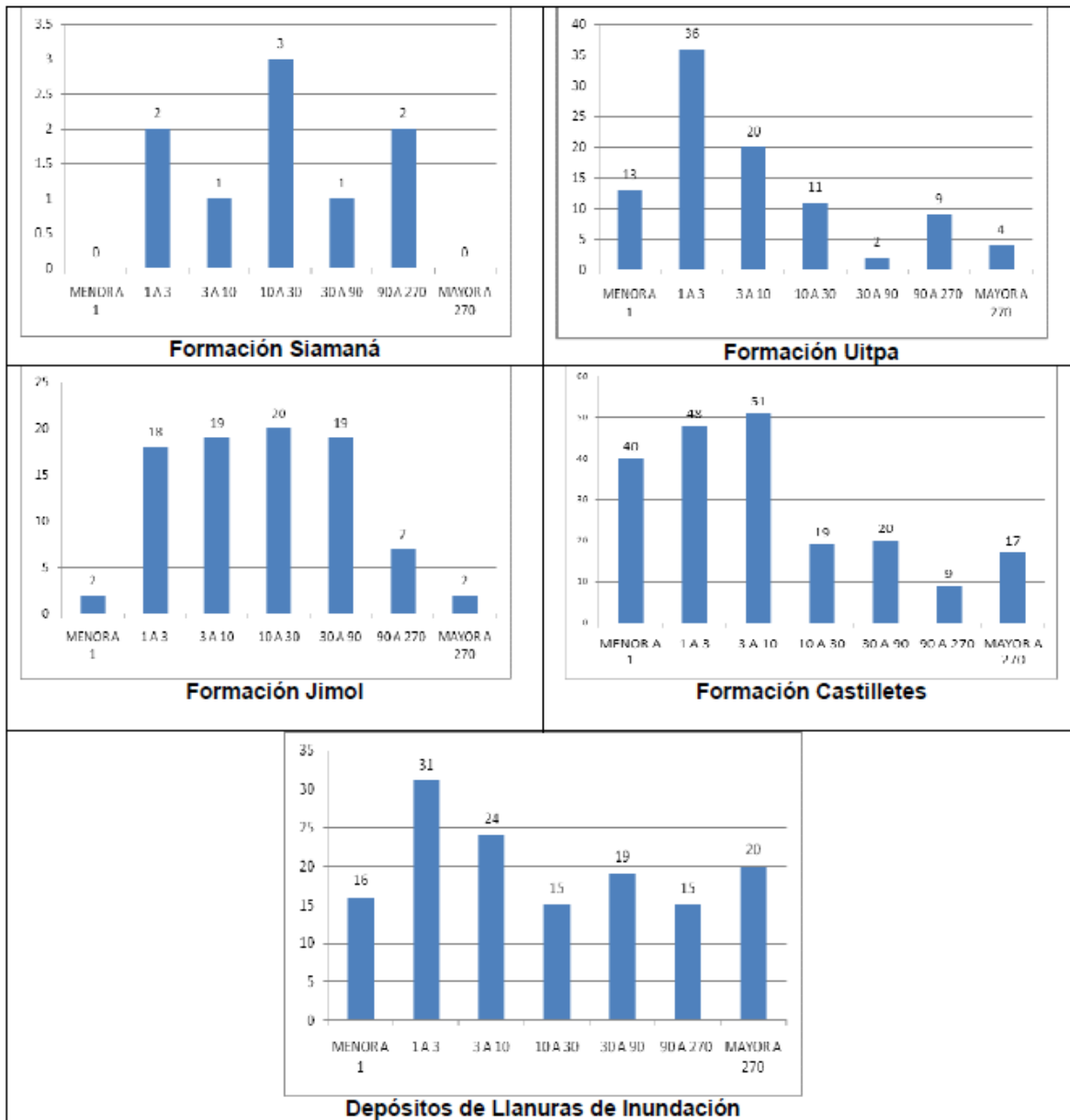
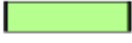


Figura 27. Rangos de frecuencia respecto a la resistividad aparente de las diferentes unidades geológicas

4.2 ASOCIACIÓN DE RESISTIVIDADES CON TIPOS DE ROCA O MATERIAL

De acuerdo a los aspectos descritos anteriormente y tomando como referencia los rangos de resistividad propuestos, se generó una tabla de relación y escala de colores con los diferentes tipos de roca descritos para las unidades geológicas presentes y su posible grado de saturación de agua (Tabla 3).

Tabla 3. Rangos de resistividades asociados a los tipos de rocas existentes

RESISTIVIDAD (Ω .m)	INTERPRETACIÓN	Escala de Color
Menor a 1	Arcillas y limos saturados con agua salobre.	
1 a 3	Limos y arenas muy finas saturadas con agua salobre	
3 a 10	Arenas saturadas con agua salobre	
10 a 30	Arenas saturadas con agua poco salobre. Gravas saturadas con agua salobre.	
30 a 90	Arenas y gravas saturadas con agua poco salobre a dulce. Limos poco saturados.	
90 a 270	Arenas y gravas saturadas con agua dulce a poco salobre. Arcillas y Limos secos.	
Mayor a 270	Rocas fracturadas y materiales con agua dulce a poco salobre.	

4.3 MAPAS DE ISORRESISTIVIDAD

Con el objeto de brindar una idea de la distribución lateral de las resistividades obtenidas a partir de los modelos geoeléctricos, se generaron mapas de isorresistividad a diferentes profundidades (Figura 28).

A los 50 metros de profundidad se puede observar que las resistividades bajas relacionadas con agua salobre a salada (tonos amarillos), presentan una distribución concentrada hacia la parte sur-oriental del área, siguiendo la línea de costa y la zona en donde la elevación es menor, mientras que las áreas con resistividad más alta, relacionadas con agua poco salobre o dulce (azul) se identifican lejos de la línea de costa y/o en zonas topográficamente más elevadas que la llanura central (cerca de Itchipa, extremo oriental).

Hacia los 75 metros de profundidad se observa una reducción en la extensión de la zona de baja resistividad (amarillo) la cual se concentra hacia la línea de costa y con una franja angosta que se proyecta hacia el nor-occidente por la parte central del área más plana. Las zonas con resistividad mayor (azul) se concentran hacia las partes altas (nor-occidente) y de piedemonte (franja desde Siapana hasta Itchipa y franja N-S en Witpa).

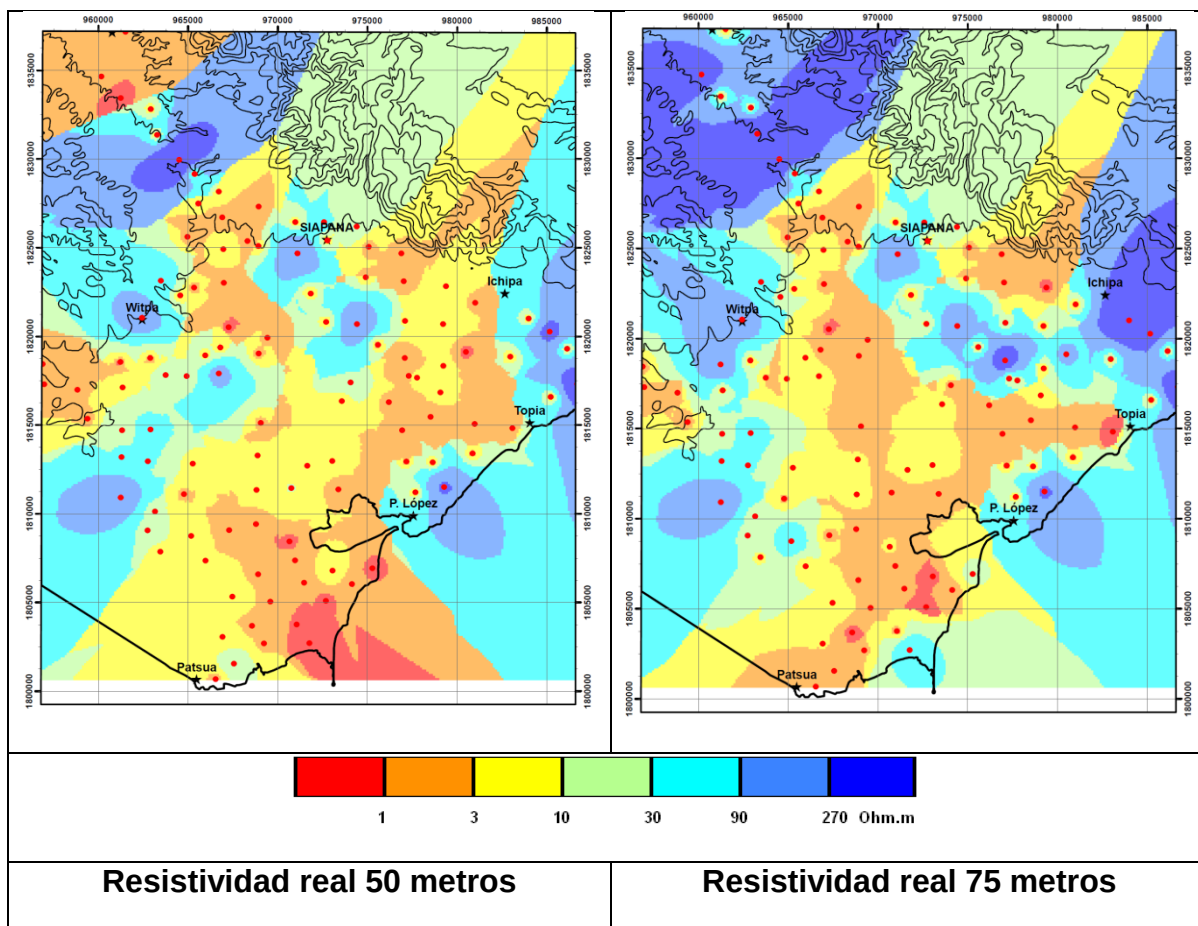
A los 100 metros de profundidad se presentan pocos cambios en la distribución de las resistividades, encontrando como aspecto para resaltar un incremento en la extensión la franja de resistividad alta relacionada con agua salobre a dulce (azul) localizada en el piedemonte de la Serranía de Macuira (NE) entre las localidades de Siapana e Itchipa.

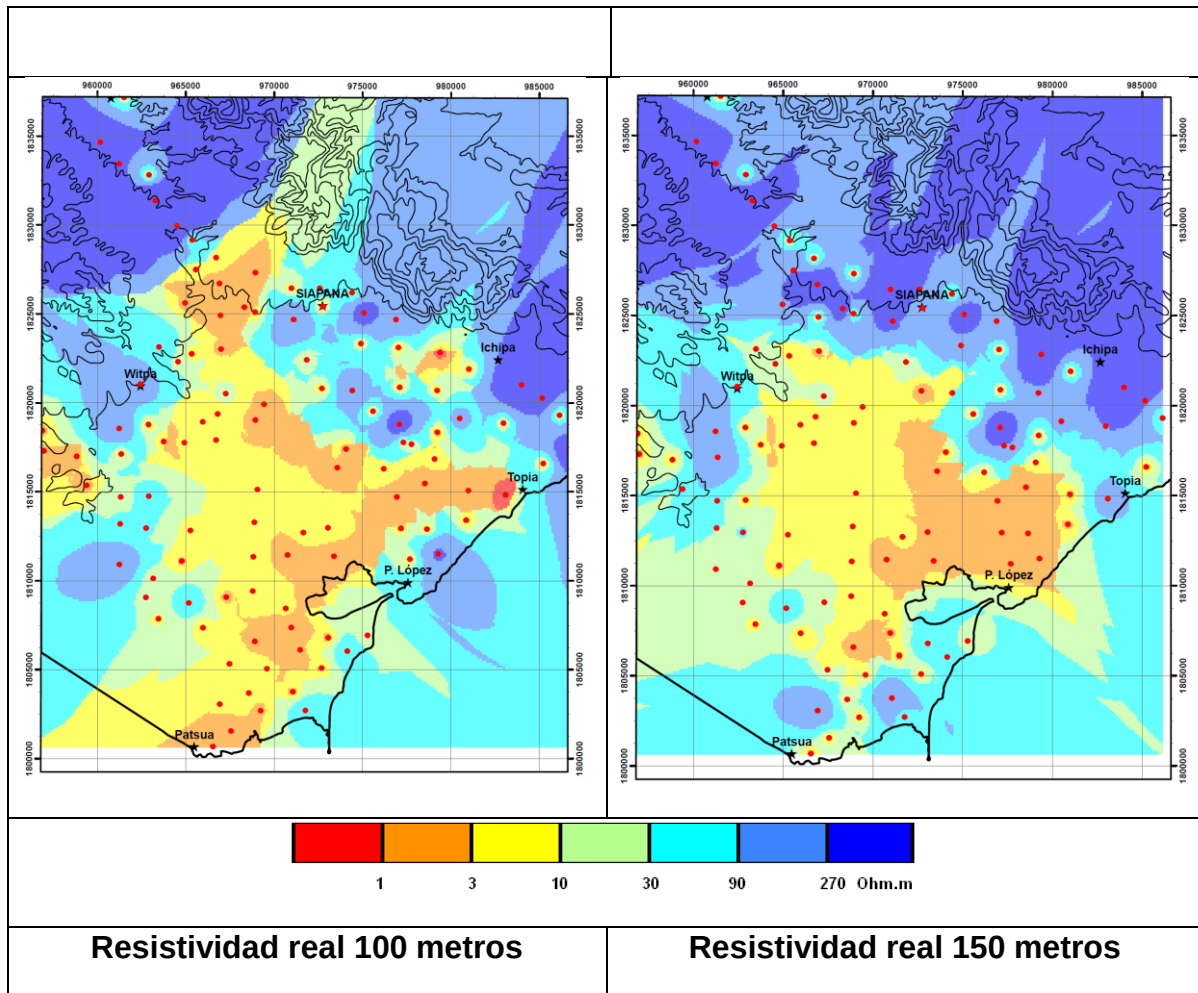
Hacia los 150 metros de profundidad la zona con resistividad baja (amarillo) se reduce ampliamente y queda restringida a la porción central del área hacia la línea

de costa, mientras que las zonas con resistividad mayor (azul) cubren las zonas onduladas y serranías desde la parte central hacia el norte.

Hacia los 200 y 250 metros de profundidad se encuentra una tendencia hacia la reducción de las áreas de baja resistividad (amarillo) las cuales se concentran en una franja orientada NW-SE y que abarca la parte central del área de estudio a la altura de Puerto López. En lo referente a las zonas con resistividades relacionadas con agua poco salobre o dulce, se concentran hacia el NE del área, en el piedemonte de la serranía de Macuira, extendiéndose hacia el occidente por la parte alta hasta Witpa y desde allí un poco al sur, enmarcando la zona central de baja resistividad.

En el comportamiento general de la resistividad interpretada a diferentes profundidades se observa una tendencia clara en la que las franjas de resistividad mayor (tonos azules) se localizan cerca de la superficie en las áreas montañosas y de piedemonte, lo que puede indicar granulometría gruesa y fracturados, como una saturación media con agua posiblemente poco salobre a dulce.





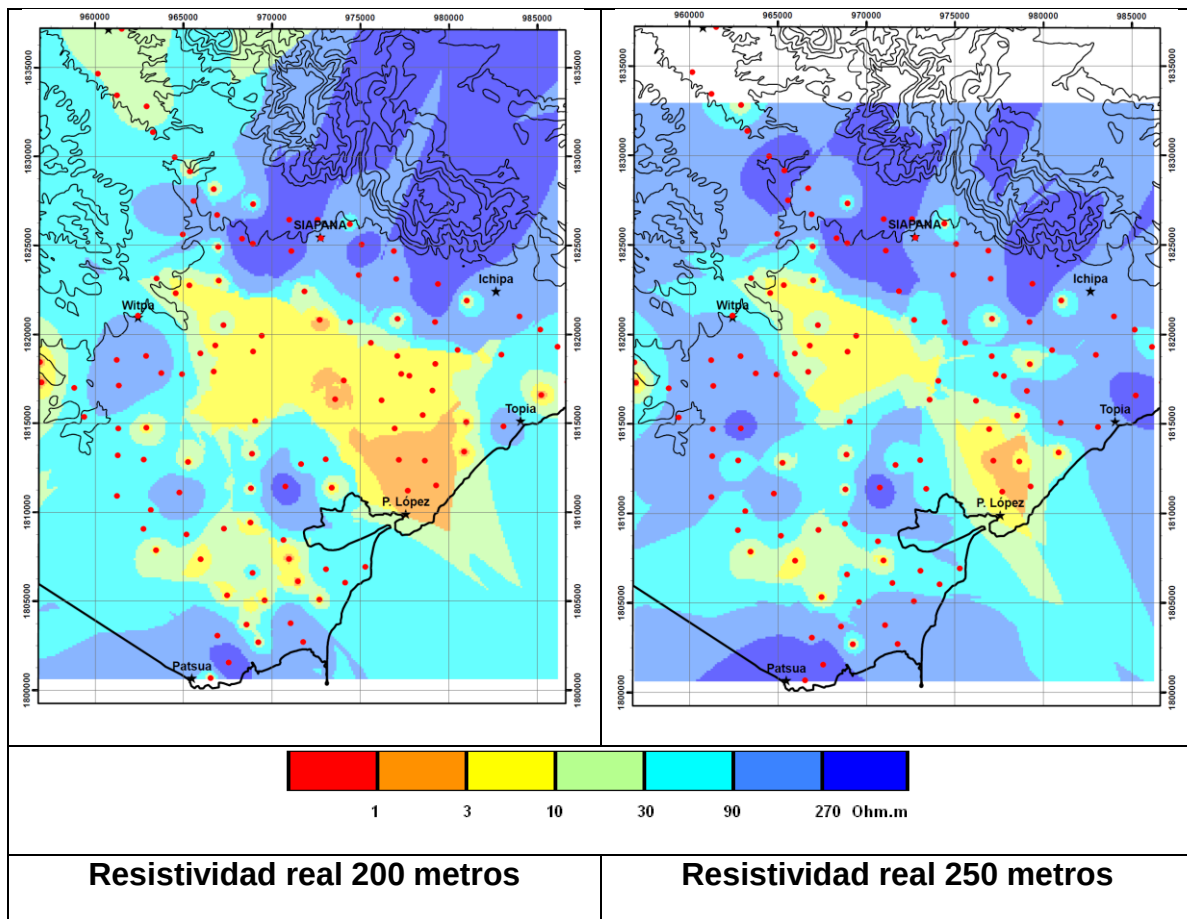


Figura 28. Resistividad real a diferentes profundidades.

4.4 PERFILES GEOELÉCTRICOS

Utilizando la información de los modelos geoeléctricos interpretados a partir de algunos de los SEV's, y tomando como referencia los rangos de resistividad propuestos y la geología del área, se construyeron perfiles geoeléctricos orientados en direcciones SW-NE (1, 2 y 3) con los cuales se busca visualizar la continuidad lateral de las diferentes capas interpretadas (Figura 29).

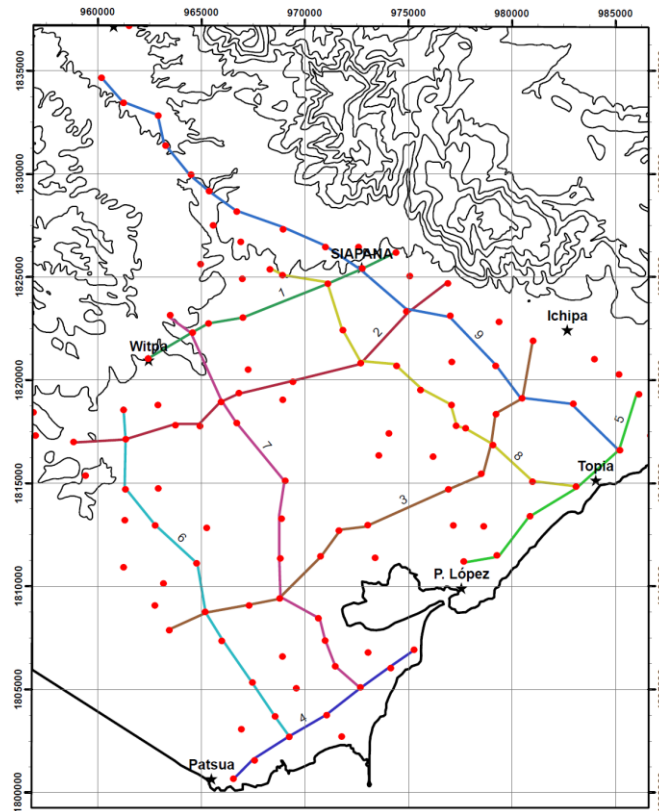


Figura 29. Localización de perfiles geoelectricos

4.4.1 Perfil 1.

Realizado en dirección SW-NE entre las localidades de Witpa (izquierda) y Siapana (derecha), tiene una longitud de 13.1 Kilómetros e incluye los sondeos 36, 37, 34, 33, 21, 22 y 15 (Figura 30).

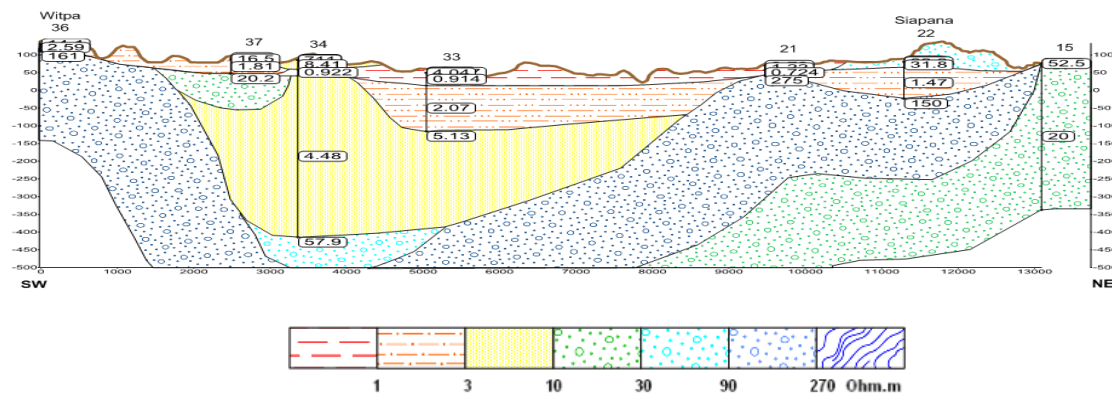


Figura 30. Perfil geoelectrico 1

En este perfil (Figura 30) se observa, hacia la localidad de Witpa (izquierda, SEV 36), la presencia de una capa con resistividad relacionada a rocas y materiales saturados con agua dulce a poco salobre (azul), la misma que puede ser identificada hacia el NE en la localidad de Siapana (derecha, SEV's 21 y 22); esta configuración, de acuerdo con la geología y estructuras descritas en el área, muestra un pliegue sinclinal suave en el que una misma unidad, posiblemente la Formación Siamaná, aflora o se encuentra cerca de la superficie en las áreas montañosas favoreciendo una posible recarga con agua dulce que, al interactuar con las unidades supra e infrayacentes puede ganar algo de salinidad, como es el caso del manantial en Witpa y los pozos profundos de Siapana.

Sobre esta unidad se identifican materiales más finos (Formación Uitpa) saturados con agua salobre a salada que, hacia el centro de la estructura (SEV 34), pueden alcanzar espesores de más de cuatrocientos metros, incrementando la complejidad para la captación de agua menos salobre.

4.4.2 Perfil 2

Realizado en dirección SW-NE, tiene una extensión de 20.5 Kilómetros e incluye los sondeos 57, 58, 59, 60, 51, 50, 105, 39, 29 y 24.

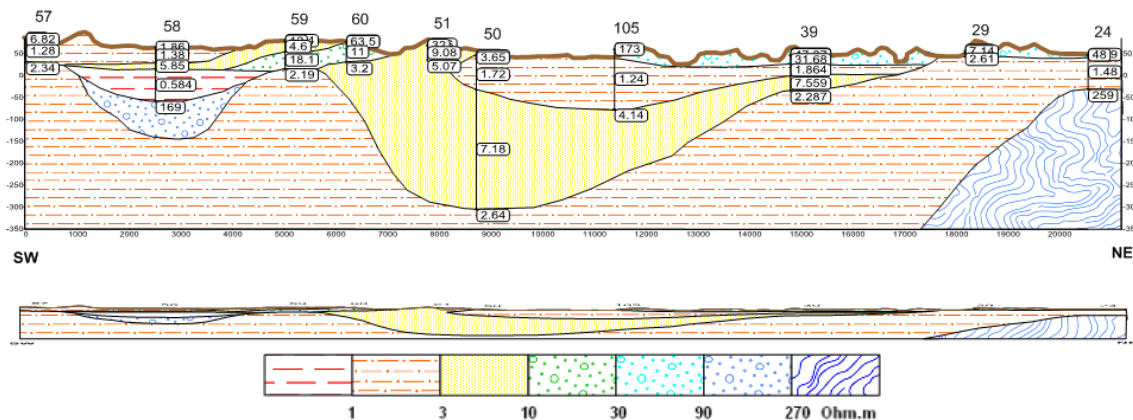


Figura 31. Perfil geoelectrico 2

En este perfil 2 (Figura 31), aunque se mantiene la evidencia de una estructura sinclinal con un repliegue hacia el SEV 59, no se identifica la presencia de una capa continua con potencial de contener agua poco salobre, posiblemente por erosión o profundización de la unidad con conexión y posibilidades de recarga con agua dulce encontrada en el Perfil 1, realizado más hacia el norte y cerca de la zona montañosa, o por una mayor influencia marina sobre la misma unidad que produce un efecto de salinización.

Se encuentran dos zonas con posibilidad de contener agua dulce a poco salobre: una capa o lente en el SEV 58 (izquierda) a partir de los 125 metros de

profundidad y espesor no determinado, y otra en el SEV 24 (derecha), a partir de los 78 metros de profundidad y que puede ser relacionada con materiales saturados con agua dulce a poco salobre o rocas fracturadas del basamento metamórfico (Neis de Macuira).

4.4.3 Perfil 3

Realizado en dirección SW-NE a la altura de la localidad de Itchipa, tiene una longitud de 24.7 Kilómetros e incluye los sondeos 101, 93, 94, 95, 86, 83, 84, 118, 119, 117, 69, 44 y 26.

En el Perfil 3 (Figura 32) se encuentra mejor definida una posible estructura anticlinal (izquierda, SEV 86) y la estructura sinclinal que se identifica desde el perfil 1, en cuyo núcleo se interpretan resistividades asociadas a materiales finos saturados con agua salada a salobre (SEV 84, 118, 119, 117 y 69) y espesor máximo cercano a los 200 metros. Bajo estos se interpretan capas con resistividades asociadas a materiales finos a gruesos saturados con agua salobre y profundidad no determinada superior a los 300 metros.

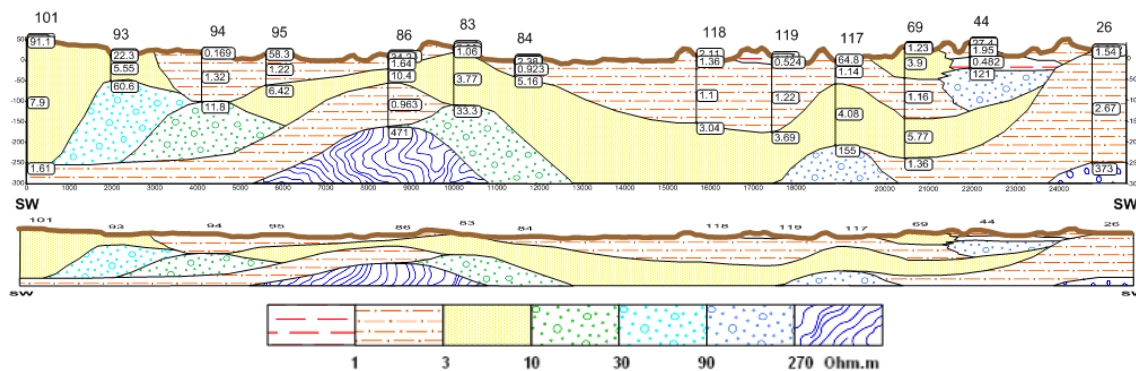


Figura 32. Perfil geoelectrico 3

Bajo los SEV's 86 (centro), 117 y 26 (derecha) se interpreta una capa o lente a cerca de 200 metros de profundidad la cual tiene una resistividad asociada a materiales gruesos o rocas fracturadas saturados con agua dulce, que pueden corresponder a un paleoalto en el basamento metamórfico o una formación arenosa (Siamaná?) saturada con agua dulce a poco salobre.

5. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Durante el desarrollo del estudio se realizó un inventario de puntos de agua correspondiente a manantiales, aljibes y pozos presentes en la zona con el fin de investigar la presencia e interrelación del agua subterránea en el área. Adicionalmente se tomaron algunos puntos de agua superficial para determinar la relación existente entre el agua subterránea y el agua superficial (Anexo 4).

En la zona de estudio se identificaron 51 puntos de agua, representados por 12 manantiales, 31 aljibes, 4 pozos y 4 puntos de agua superficial (ver tablas 4 y 5).

Los datos fueron capturados en el formato de INGEOMINAS “*Inventario de Puntos de Agua Subterránea*”. Para cada punto se tomaron y diligenciaron en el formato principalmente la siguiente información: nombre del sitio, posición planimétrica y altimétrica (X, Y, y Z) usando geoposicionador satelital (GPS), toma de niveles estáticos utilizando sonda eléctrica, características de la captación y unidad geológica captada, toma de parámetros fisicoquímicos in situ que incluyen temperatura, pH y conductividad eléctrica del agua y caudal de extracción en los sitios que fue posible.

Tabla 4. Estadística de los parámetros fisicoquímicos in-situ tomados en época de baja precipitación en el área de estudio.

Época de Baja Precipitación		Pozos		Aljibes	Manantiales	Agua Superficial
pH	valor más alto	7.69		7.92	8.36	7.82
	valor más bajo	7.5		6.67	6.85	7.27
	promedio	7.6		7.2	7.4	7.62
Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	valor más alto	3060		11960	16940	1134
	valor más bajo	1553		995	1086	829
	promedio	2232		4750	4296	942
T °C	valor más alto	35		35.1	35.5	31.4
	valor más bajo	31.2		28.2	27.4	29.8
	promedio	33.1		30.6	30.5	29.6

Tabla 5. Estadística de los parámetros fisicoquímicos in-situ tomados en época de alta precipitación en el área de estudio

Época de Baja Precipitación		Pozos	Aljibes	Manantiales	Agua Superficial
pH	valor más alto		7.76	7.99	8.36
	valor más bajo	7.64	6.59	6.79	7.39
	promedio		7.23	7.28	7.88
Conductividad μs/cm	valor más alto		10001	10830	696
	valor más bajo	1611	917	1000	586
	promedio		4295	3388	641
T°C	valor más alto		32.6	33.9	30
	valor más bajo	34.4	26.4	26.5	28.1
	promedio		29.2	29.8	29.1



Figura 33. Aljibe cercano al cambio de pendiente topográfica, fuente de abastecimiento en el corregimiento de Siapana (imagen tomada en la primera comisión de inventario de puntos de agua, Polujalii- 2011).



Figura 34. Corriente superficial correspondiente a un arroyo desde la parte alta de la Serranía de La Macuira (imagen tomada en la primera comisión de inventario de puntos de agua, arroyo Kaneweruu- 2011).



Figura 35. Manantial en rocas bioesparíticas de la Formación Siamaná, con alto grado de disolución (imagen tomada en la primera comisión de inventario de puntos de agua, Ojo de Agua de Witpa- 2011).



Figura 36. Pozo profundo ubicado en el corregimiento de Siapana (imagen tomada en la primera comisión de inventario de puntos de agua, Corregimiento de Siapana - 2011)

Tabla 6. Información del Inventario de puntos de agua por unidad geológica

UNIDAD GEOLÓGICA	TIPO_PUNTO	CAPTACIÓN
Neis de Macuira (Pznm)	Aljibe	10
	Manantial	3
	Total	13
Granodiorita de Siapana (Jgs)	Agua Superficial	4
	Aljibe	5
	Manantial	3
	Total	12
Formación Siamaná (Es)	Manantiales	4
	Total	4
Formación Uitpa (Eu)	Aljibe	3
	Manantial	2
	Total	5
UNIDAD GEOLÓGICA	TIPO_PUNTO	CAPTACIÓN
Formación Castilletes (Nc)	Aljibe	3
	Total	3
Depósitos de Cauce Aluvial (Qca)	Aljibe	5
	Total	5
Depósitos Eólicos (Qe)	Aljibe	3
	Pozo	4
	Total	7
Complejo Estructural de Alas (K?cea)	Aljibe	1
	Total	1
Formación Cuisa (Jsc)	Aljibe	1
	Total	1
Total de puntos de agua inventariados dentro del área de estudio		51

Tabla 7. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el inventario de puntos de agua en época de baja precipitación relacionado con la unidad geológica sobre la que aflora la captación

UNIDAD GEOLÓGICA	T (°C)	Conductividad Eléctrica (us/cm)	pH
------------------	-----------	---------------------------------------	----

UNIDAD GEOLÓGICA	T (°C)	Conductividad Eléctrica (us/cm)	pH
Neis de Macuira (Pznm)	30.7	5289.8	7.19
Complejo Estructural de Alas (K?cea)	30.8	10280	7.18
Granodiorita de Siapana (Jgs)	30.3	1157.5	7.14
Formación Siamaná (Es)	29.2	6270	7.73
Formación Uitpa (Eu)	31.2	7538.3	7.46
Formación Castilletes (Nc)	29.0	3628	7.45
Depósitos de Cauce Aluvial (Qca)	29.0	3598.5	7.28
Depósitos Eólicos (Qe)	31.2	2995.4	7.38
Promedio general	29.8	3945.4	7.34

Tabla 8. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el inventario de puntos de agua en época de alta precipitación relacionado con la unidad geológica sobre la que aflora la captación

UNIDAD GEOLÓGICA	T (°C)	Conductividad Eléctrica (us/cm)	pH
Neis de Macuira (Pznm)	28.7	5590.1	7.18
Complejo Estructural de Alas (K?cea)	30.8	9530	7.18
Granodiorita de Siapana (Jgs)	29.0	1317.2	7.48
UNIDAD GEOLÓGICA	T (°C)	Conductividad Eléctrica (us/cm)	pH
Formación Siamaná (Es)	30.0	2619.8	7.48
Formación Uitpa (Eu)	30.8	8540.0	7.2
Formación Castilletes (Nc)	28.9	3040.0	7.76
Depósitos de Cauce Aluvial (Qca)	28.7	2822.0	7.35
Depósitos Eólicos (Qe)	31.3	3870.3	7.17
Promedio general	29.8	4666.2	7.35

6. PRUEBA DE BOMBEO Y EVALUACIÓN HIDRÁULICA

6.1 FLUJO ESTABLE

Para explicar la ecuación de flujo estable, William Kearton representa mediante un rectángulo, un dispositivo (tobera, turbina o álabe) a través del cual fluye vapor o gas constantemente; es aquí donde comienza la teoría de flujo por medio de un conducto vertical y su interpretación hidráulica:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0$$

Ecuación de Laplace

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

6.1.1 Flujo radial no equilibrado en acuíferos confinados (transient regime)

Las ecuaciones que se relacionan a continuación y que caracterizan el comportamiento de los acuíferos confinados son utilizables para tiempos mayores de 40 - 50 minutos.

$$Ss = \rho g(\alpha + n\beta)$$

Cambio de masa por agua producida

$$Ss(\partial h / \partial t)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{Ss}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$T = K \cdot b$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

En coordenadas polares se tiene:

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Teniendo en cuenta la teoría de flujo anterior se define la solución de Theis en 1935 así:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad W(u) = \int \frac{e^{-u}}{u} du \quad \text{Función de pozo}$$

$$W(u) = -0.577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

De acuerdo a la teoría de Theis, Jacob desarrollo el siguiente método así:

Para un tiempo largo

$$u \leq 0.01 \quad \text{Entonces}$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt})$$

$$s = \frac{2.30Q}{4Tt} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right)$$

$$s \text{ vs } \log t \rightarrow \text{recta} \rightarrow \text{para } s=0 \quad t=t_0$$

$$S = \frac{2.25t_0}{r^2} \quad T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s}$$

Δ_s es la diferencia de caída de datos por ciclo logarítmico de t.

Q es el caudal constante extraído del pozo

t es el tiempo transcurrido a partir del inicio del bombeo

r es el radio de influencia del pozo.

T es la Transmisividad

S es el coeficiente de almacenamiento

Durante la prueba de bombeo a caudal constante se ha realizado la toma de niveles dinámicos durante 1440 minutos, los días 23 y 24 de noviembre de 2011, con los intervalos de los abatimientos en escala logarítmica de tiempo y aforos volumétricos (descarga) del orden promedio de 5.71 l/seg, de igual forma se realizó la recuperación de niveles residuales durante 1440 minutos, con su respectivo pozo de observación. La información de campo se observa (figuras 37 y 38 fotos) (anexos 5 y 10)

Tabla 9. Pozos para prueba de bombeo a caudal constante

Condición	POZO	Nivel estático	Distancia a Bombeo (m)
Bombeo	6- II-C-5	2.78	
Observación	6-II-C-35	7.13	447



Figura 37. Ejecución de prueba de bombeo pozo profundo (6-II-C- 5) en el corregimiento de Siapana municipio de Uribia.



Figura 38. Pozos de observación (6-II-C-35) prueba de bombeo en el corregimiento de Siapana, municipio de Uribe

6.2 INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS

La evaluación de los parámetros hidráulicos se realizó por los métodos de Cooper & Jacob y Theis, mediante el software especializado AQUIFERTEST (Anexo 5). A continuación se presentan los parámetros evaluados:

5.3.1 Nivel estático (NE): El nivel estático del pozo 6-II-C-35 es de 7.13 metros y el del pozo 6-II-C-5 es de 2.78 metros

6.3 TRANSMISIVIDAD (T)

El cálculo de la Transmisividad se obtuvo del pozo 6- II- C 5 del ensayo de bombeo y recuperación de niveles; los valores de Transmisividad se observan en la Tabla 10.

Tabla 10. Transmisividad prueba de bombeo pozo 6- II- C 5.

POZO	Transmisividad Cooper & Jacob (m ² /día)	Transmisividad Theis (m ² /día)		Transmisividad Recuperación (m ² /día)
6- II- C 5	43.5	43.9		46.5

A continuación se presentan las curvas obtenidas en cada uno de los pozos para el cálculo de la Transmisividad y el Coeficiente de Almacenamiento (Figuras 39 a 41):

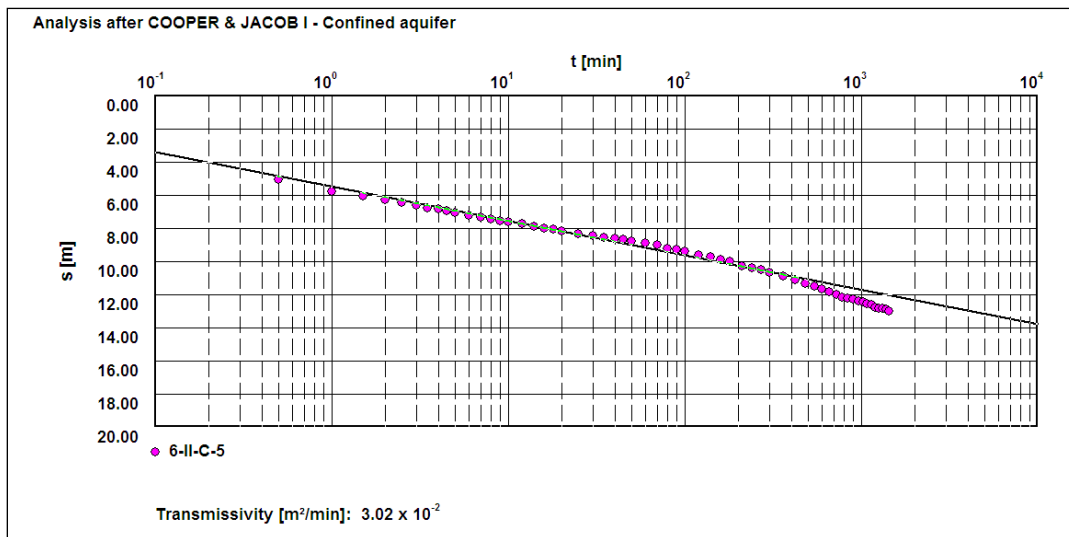


Figura 39. Bombeo a caudal constante Cooper & Jacob pozo 6- II- C 5.

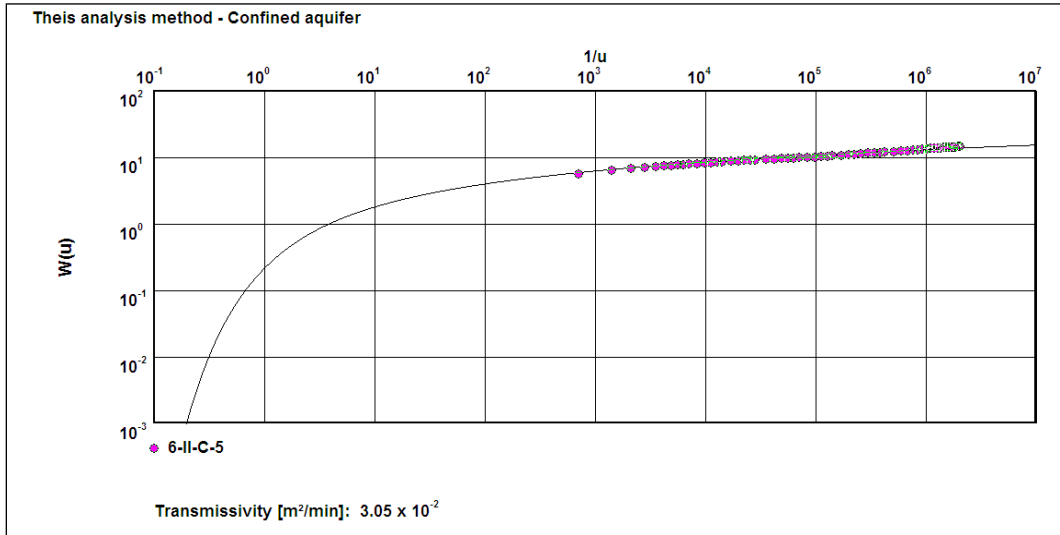


Figura 40. Bombeo a caudal constante Theis pozo 6- II- C 5.

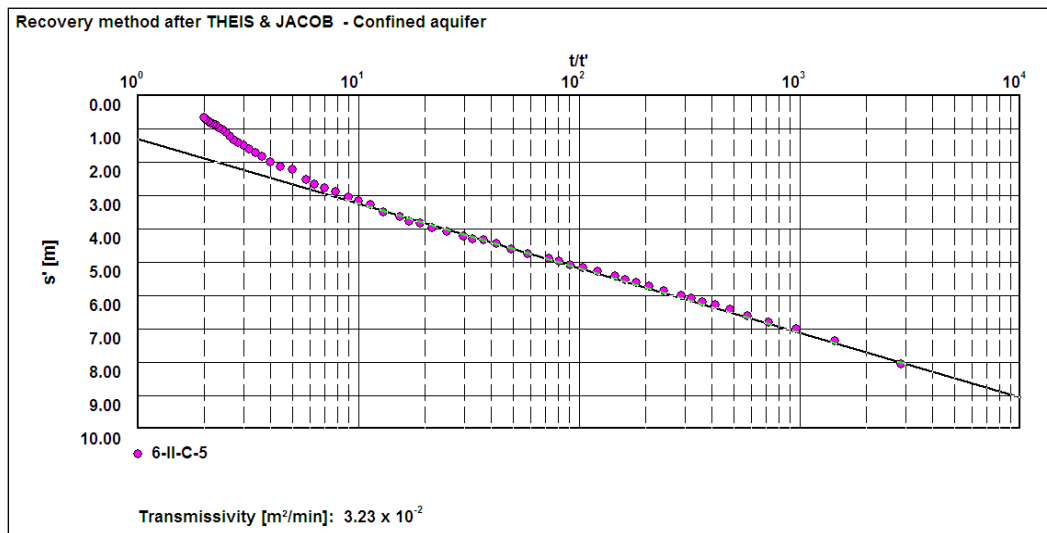


Figura 41. Recuperación de niveles residuales pozo 6- II- C 5.

6.4 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S):

El Coeficiente de Almacenamiento se obtuvo mediante el pozo de observación a una distancia de 447 metros y es del orden de 7.02×10^{-4} (figura 42) lo cual indica que se trata de un acuífero de condiciones cautivas o confinadas.

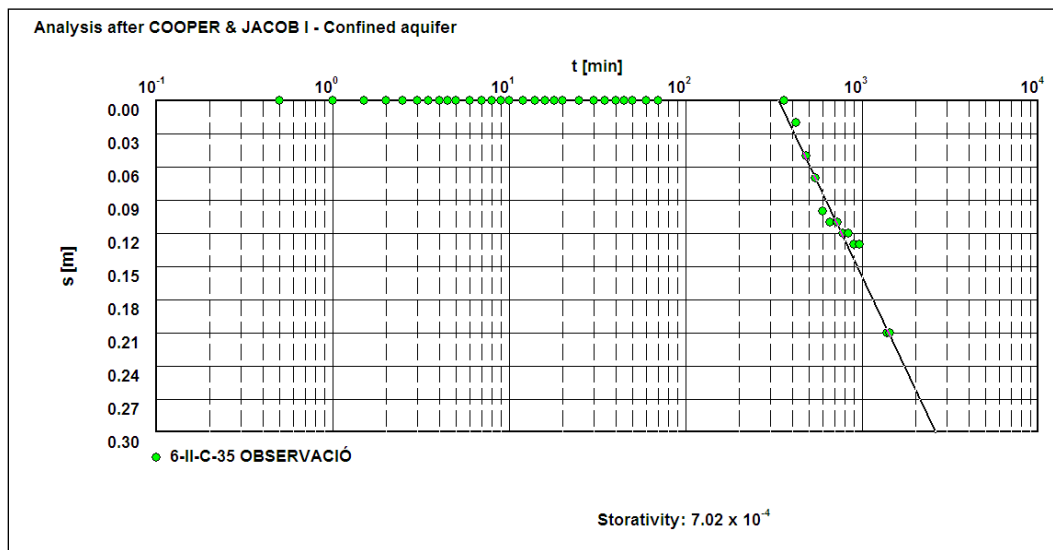


Figura 42. Observación durante bombeo pozo 6- II- C 35.

6.5 CAPACIDAD ESPECÍFICA DEL POZO (CE):

Abatimiento (s): 12.98 m.

$$C_e = Q/s$$

$$C_e = 5.71 \text{ l/seg}/12.98 \text{ m}$$

$$C_e = 0.44 \text{ l/seg/m}$$

Lo cual indica que por cada 0.44 l/seg que se extraigan del acuífero se tendrá un descenso de un metro.

Con los parámetros hidráulicos calculados anteriormente se tiene un acuífero en condiciones de confinamiento con una productividad relativamente baja.

7. HIDROGEOQUÍMICA

Las condiciones hidroquímicas y su distribución aportan información acerca del origen y distribución del agua subterránea, permiten identificar los procesos físico-químicos que afectan al agua, e igualmente muestran su degradación; dicha información es de suma importancia para establecer la evolución de los acuíferos. Además, de esta manera se pueden detectar afecciones en la salud y establecer las medidas correctoras en cuanto a contaminación, salinización, pérdida de calidad y de esta manera gestionar el recurso (Anexo 6).

De los 51 puntos de agua inventariados, se escogieron 45 puntos entre pozos, aljibes, manantiales y aguas de los arroyos a los cuales se les realizó análisis físico químico completo.

La selección de los puntos de agua para hidroquímica se realizó teniendo en cuenta valores de conductividad eléctrica, pH, así como también el uso del agua y la distribución areal, con el fin de tener una representatividad de los tipos de agua subterránea del área de estudio.

La campaña para la toma de muestras de agua para hidroquímica, se realizó en el mes de julio de 2011 (Figura 43), las cuales fueron analizadas en el Laboratorio de Aguas y Gases del INGEOMINAS, de acuerdo con el protocolo llevado a cabo por el Instituto (Anexo 7).



Figura 43. Toma de muestra de agua en aljibe

A continuación se presentan los rangos de distribución frecuencia de los principales iones presentes en el área de estudio (Figura 44);

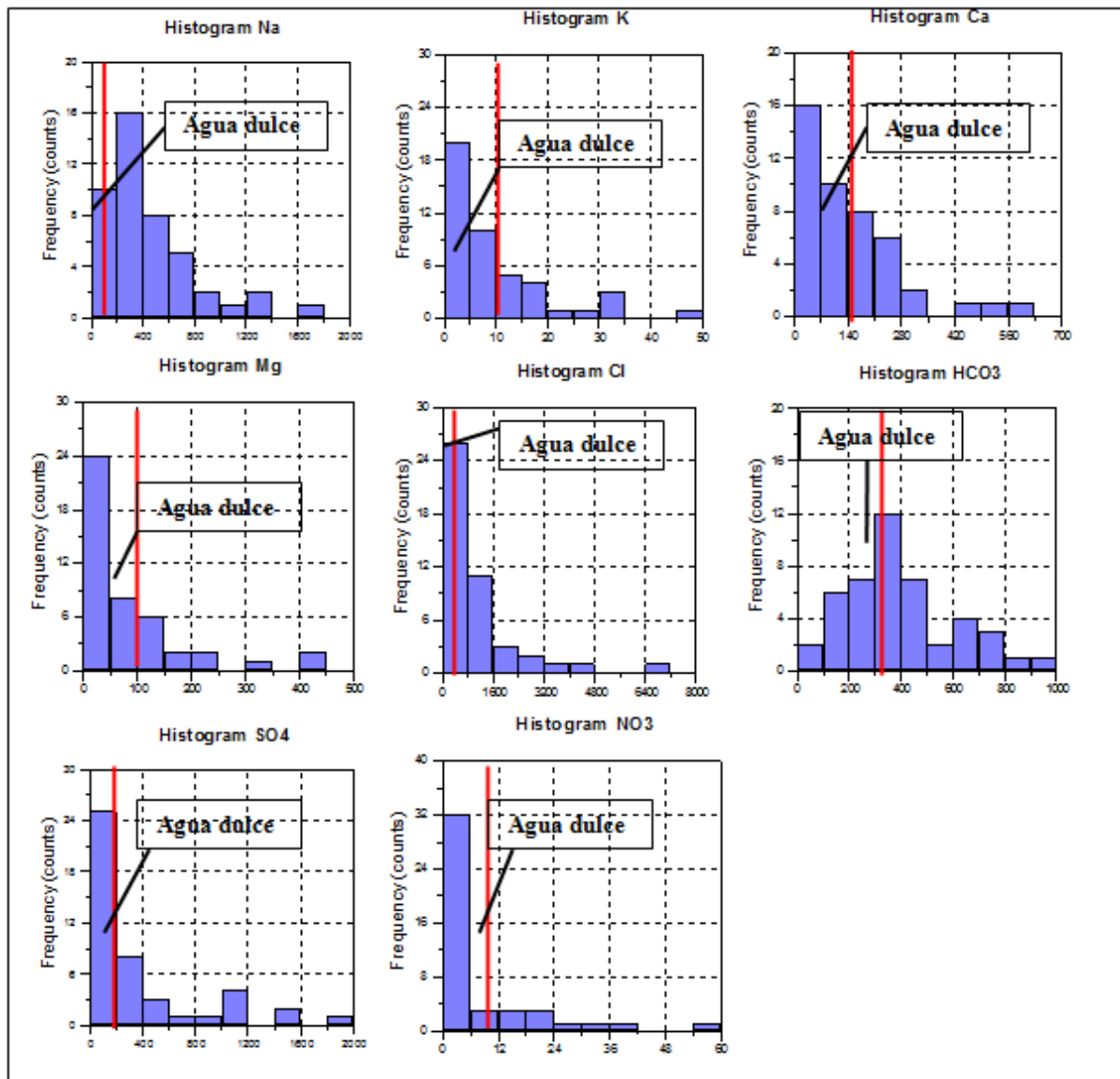


Figura 44. Histogramas con rangos de frecuencia de concentraciones de los iones presentes en la Alta Guajira y valor máximo presente en agua subterránea dulce.

Los valores que se presentan hacia la izquierda de la gráfica representan los rangos normales de agua subterránea dulce, aunque no es raro encontrar ciertas concentraciones mayores debido al origen y recorrido del agua subterránea por las condiciones topográficas, geográficas, climatológicas y geológicas principalmente.

7.1 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

La interpretación geoquímica del agua subterránea se realizó mediante los diagramas de Piper y a continuación se presenta la clasificación de los puntos muestreados (Tabla 11):

Tabla 11. Clasificación geoquímica de los puntos de agua

Sample ID	Water Type	Location	Geology	X coordinate	Y coordinate
6-II-C-10	Na-Mg-	Kanevueru	Agua Superficial	976645	1825007
6-I-B-10	Na-Ca-Mg-	Apastash (Kasparrala)	Agua Superficial	969965	1833700
6-I-B-2	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Arroyo Wantalu	Agua Superficial	967986	1831820
6-I-B-5	Na-Ca-Cl		Agua Superficial	973226	1826311
6-I-D-6	Ca-Na-Cl-SO ₄	Alas	Complejo Estructural de Alas	958178	1822279
6-I-B-7	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Polulepo	Depósito de Canal Aluvial	964637	1831812
6-I-D-9	Cl-HCO ₃	Irruru	Depósito de Canal Aluvial	967611	1829230
6-I-D-17	Na-Ca-Cl	Irruru	Depósito de Canal Aluvial	967559	1829010
6-I-D-11	Na-Mg-Cl	Cocomana	Depósito de Canal Aluvial	967668	1828772
6-II-C-13	Na-Mg-Ca-Cl-HCO ₃	Siapana	Depósitos Eólicos	973626	1826311
6-II-C-1	Na-Cl-HCO ₃	Siapana	Depósitos Eólicos	972930	1825975
6-II-C-5	Na-Mg-Ca-Cl-HCO ₃	Siapana	Depósitos Eólicos	972782	1825222
6-II-C-8	Na-Ca-Cl-HCO ₃		Depósitos Eólicos	972533	1826606
6-II-C-11	Na-Mg-Ca-Cl	Buenavista	Depósitos Eólicos	976645	1825007
10B-I-B-1	Na-Mg-Cl	Cementerio Flor de La Guajira	Formación Castilletes	965835	1799270
6-IV-A-3	Cl-SO ₄	Puerto López	Formación Castilletes	978353	1812075
6-IV-A-2	Na-Mg-Ca-Cl	Yotojoro	Formación Castilletes	973636	1812230
6-III-D-1	Na-Mg-Ca-Cl-HCO ₃	Yoil-Chorro	Formación Cuisa	956876	1803910
6-I-D-1	Na-Cl	Witpa	Formación Siamana	962548	1821273
6-I-D-3	Na-Cl-HCO ₃	Witpa	Formación Siamana	961894	1820799
6-I-D-4	Na-Cl-HCO ₃	Aulechith	Formación Siamana	961667	1820373
6-I-D-2	Na-Cl	Witpa	Formación Siamana	962294	1820848
6-I-D-5	Na-Mg-Ca-Cl	Alas	Formación Uitpa	959734	1820827
6-I-D-18	Ca-Mg-Na-Cl-SO ₄	Jimol-Arroyo Youlepaa	Formación Uitpa	955146	1822641
6-I-D-10	Ca-Na-Cl	Paliguanou	Formación Uitpa	969572	1824170
6-III-B-2	Cl-SO ₄	Choichirimana	Formación Uitpa	959166	1818667
6-III-B-1	Cl-SO ₄	Choichirimana	Formación Uitpa	958901	1818952
6-II-C-3	Na-Ca-Mg-Cl-HCO ₃	Kashinas	Granodiorita de Siapana	971644	1827521
6-II-C-4	Na-Ca-Cl-HCO ₃	Polujalii	Granodiorita de Siapana	971279	1827762
6-I-B-4	Na-Ca-Cl	Tajalu-1 de Agosto	Granodiorita de Siapana	967726	1833238
6-II-C-2	Na-Ca-Mg-Cl-HCO ₃	Iruapaa	Granodiorita de Siapana	972355	1827309
6-I-B-3	Na-Mg-Ca-	Uchima	Granodiorita de Siapana	966828	1832980
6-II-C-7	Na-Mg-	Shirimiri	Granodiorita de Siapana	976116	1826028
6-II-C-9	Na-Cl-HCO ₃	Chamaiceru	Granodiorita de Siapana	973219	1827222
6-I-B-11	Na-Cl	Arroyo Wajalima	Granodiorita de Siapana	969170	1830933
6-II-C-12	Na-Ca-Cl	Ibornei	Neis de Macuira	978839	1824516
6-I-D-12	Na-Cl-SO ₄		Neis de Macuira	960073	1829682
6-I-B-9	Na-Cl-HCO ₃ -SO ₄	Atojoro	Neis de Macuira	960811	1830443
6-I-B-6	Ca-Na-Cl-HCO ₃	Nescua	Neis de Macuira	964714	1836043
6-I-D-8	Na-Cl-HCO ₃ -SO ₄	Gauchoaipa-Arroyo Jul	Neis de Macuira	959988	1823629
6-I-B-1	Na-Cl-HCO ₃	Epeyili	Neis de Macuira	967239	1832142
6-I-C-1	Na-Mg-Cl	Jimol	Neis de Macuira	954968	1824836
6-I-D-7	Na-Cl-HCO ₃	Alas	Neis de Macuira	958191	1822780
6-I-D-15	Na-Cl-SO ₄	Alepus	Neis de Macuira	958193	1828895
6-I-D-16	Na-Cl-SO ₄	Alepus	Neis de Macuira	958809	1829005

En la Figura 45 el agua del grupo A clasifica como sulfatadas cálcicas debido a la disolución de las rocas calcáreas y presencia de yeso en la Formación Uitpa principalmente. Las aguas del grupo B se clasifican como aguas de tipo cloruradas sódicas debido a las condiciones climatológicas evaporíticas típicas de zonas semiáridas, además en este grupo de rocas se presenta un tiempo de tránsito rápido a través de las fracturas de la Granodiorita de Siapana y el Neis de Macuira hasta llegar a la Formación Siamaná hasta cierta profundidad.

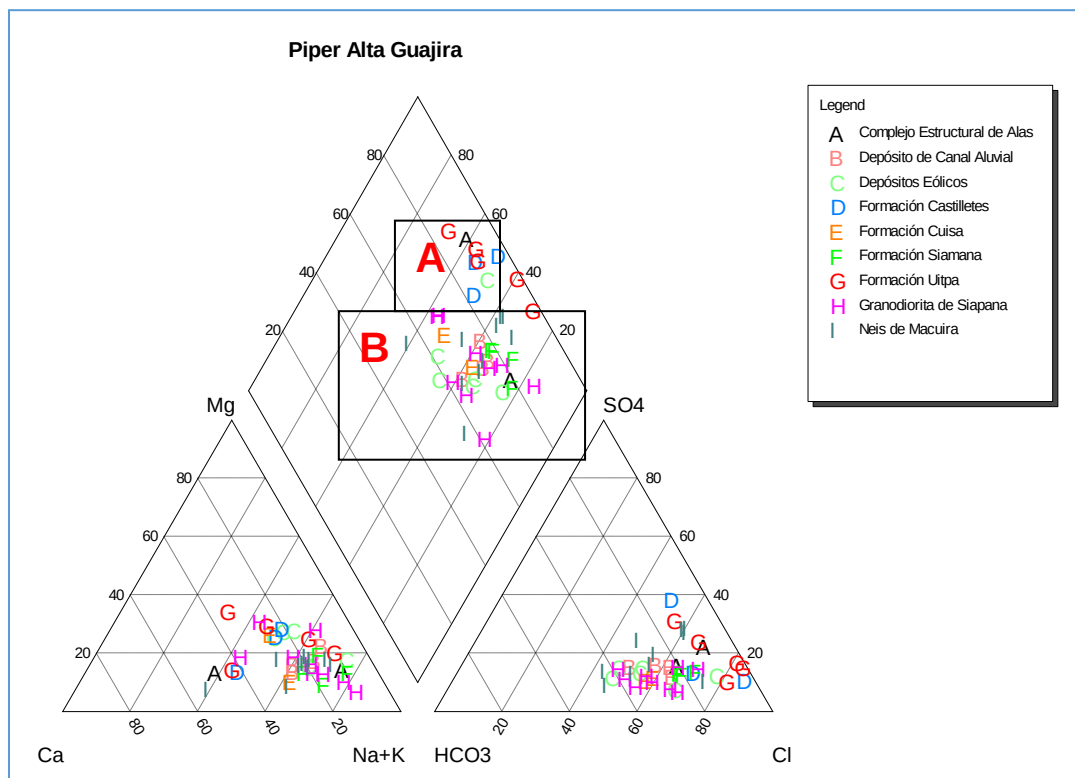


Figura 45. Diagrama de Piper Alta Guajira.

En el diagrama de Schoeller se observa la misma tendencia de las curvas debido a que el agua subterránea del área de la Alta Guajira presenta las mismas condiciones de evaporación que ha sufrido el agua lluvia y materiales de tipo calcáreo de origen principalmente marino (Figura 46).

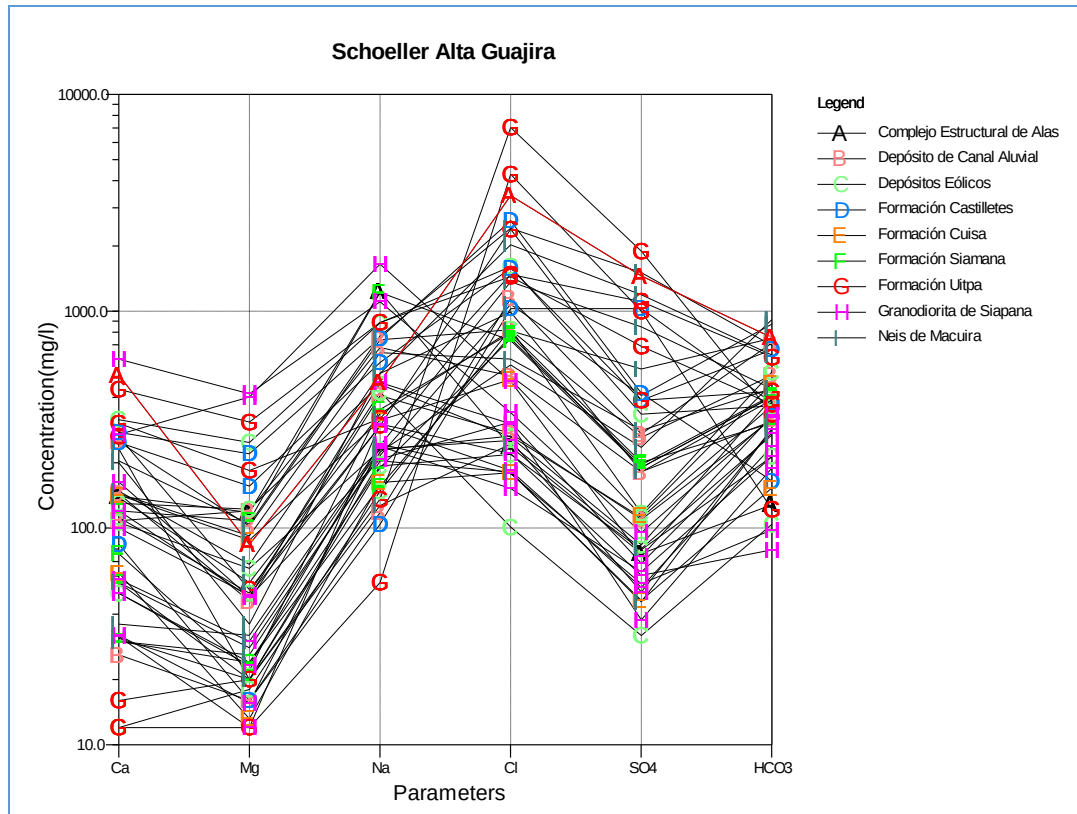


Figura 46. Diagrama de Schoeller Alta Guajira

7.1.1 pH

El agua subterránea en la zona de estudio tiene valores de pH entre 6.3 y 8.1, siendo dominante un comportamiento mayor a 7 en el área de estudio, atribuido a la disolución de los materiales calcáreos. Se observan las mayores concentraciones en la zona de descarga en la falla de Macuira en inmediaciones de Siapana (Figura 47).

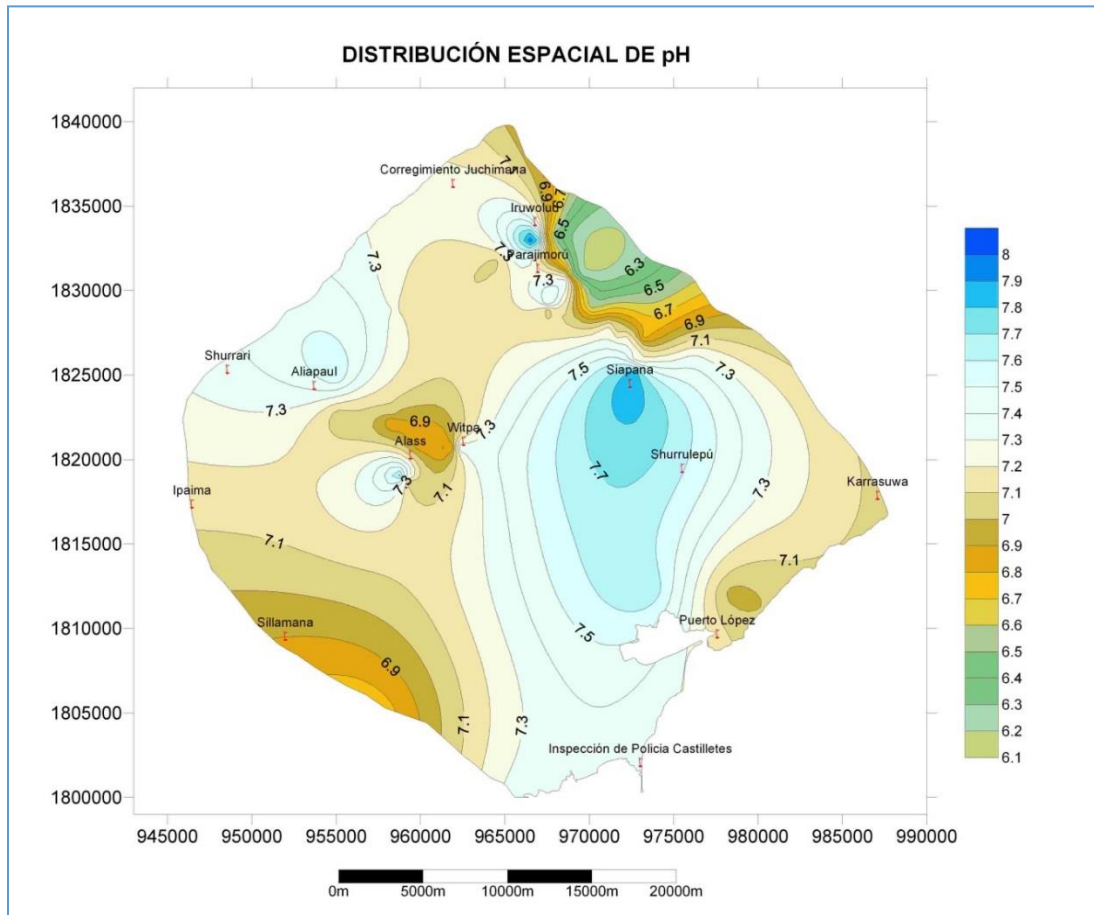


Figura 47. Distribución Espacial de pH

7.1.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica está entre 932 y 19630 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los mayores valores se presentan en el sector de Alas en los manantiales y aljibes de la Formación Uitpa los cuales se ven incrementados debido a la presencia de alto contenido de sulfatos por las capas yeso. Las menores concentraciones se presentan al noroccidente en el cerro de Macuira. Las concentraciones superiores de la conductividad eléctrica coinciden con los altos contenidos en el agua de cloruros y sulfatos debido a la génesis de la roca y condiciones de evaporación de las mismas (Figuras 48 a 50).

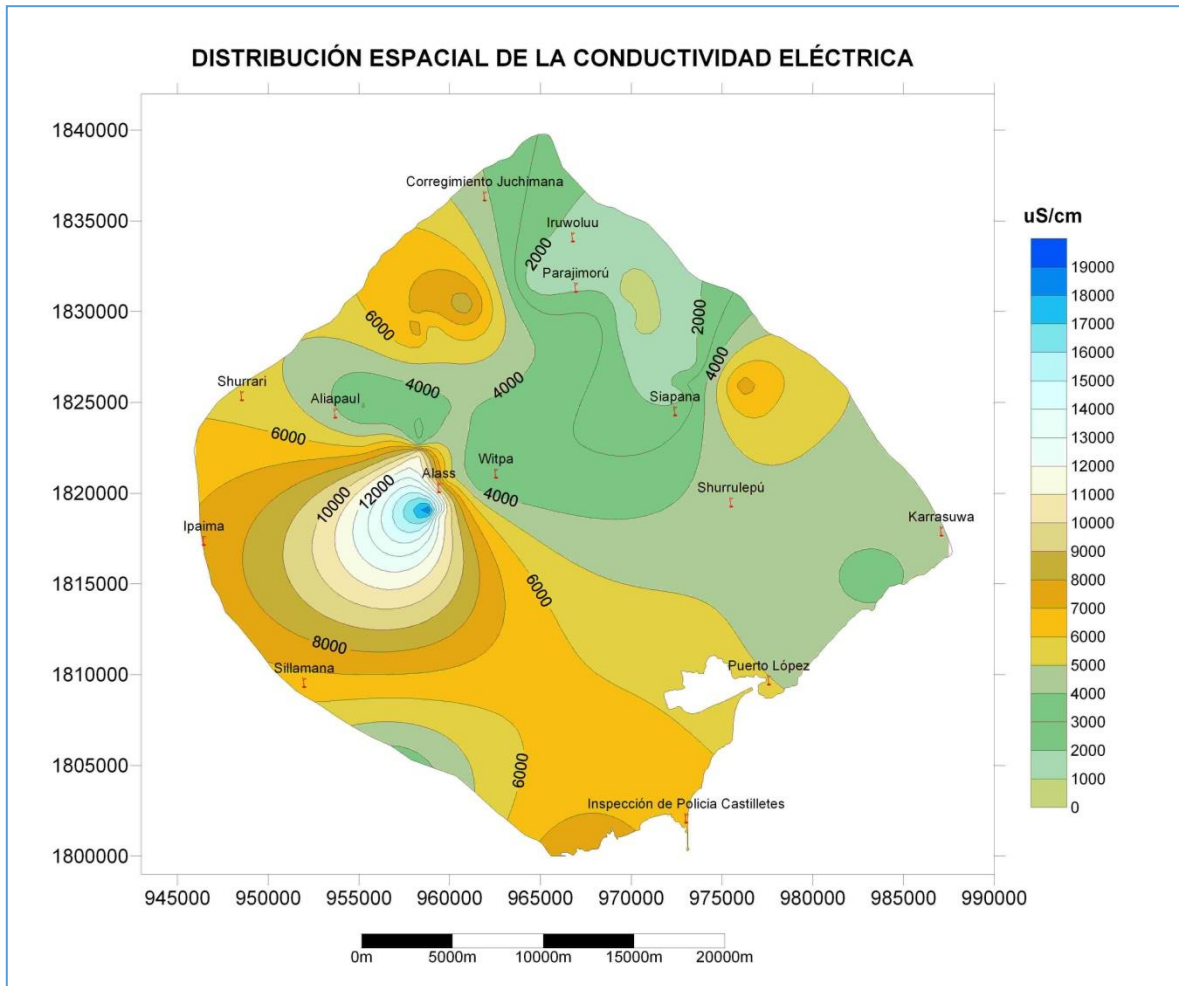


Figura 48. Distribución espacial de la Conductividad Eléctrica.

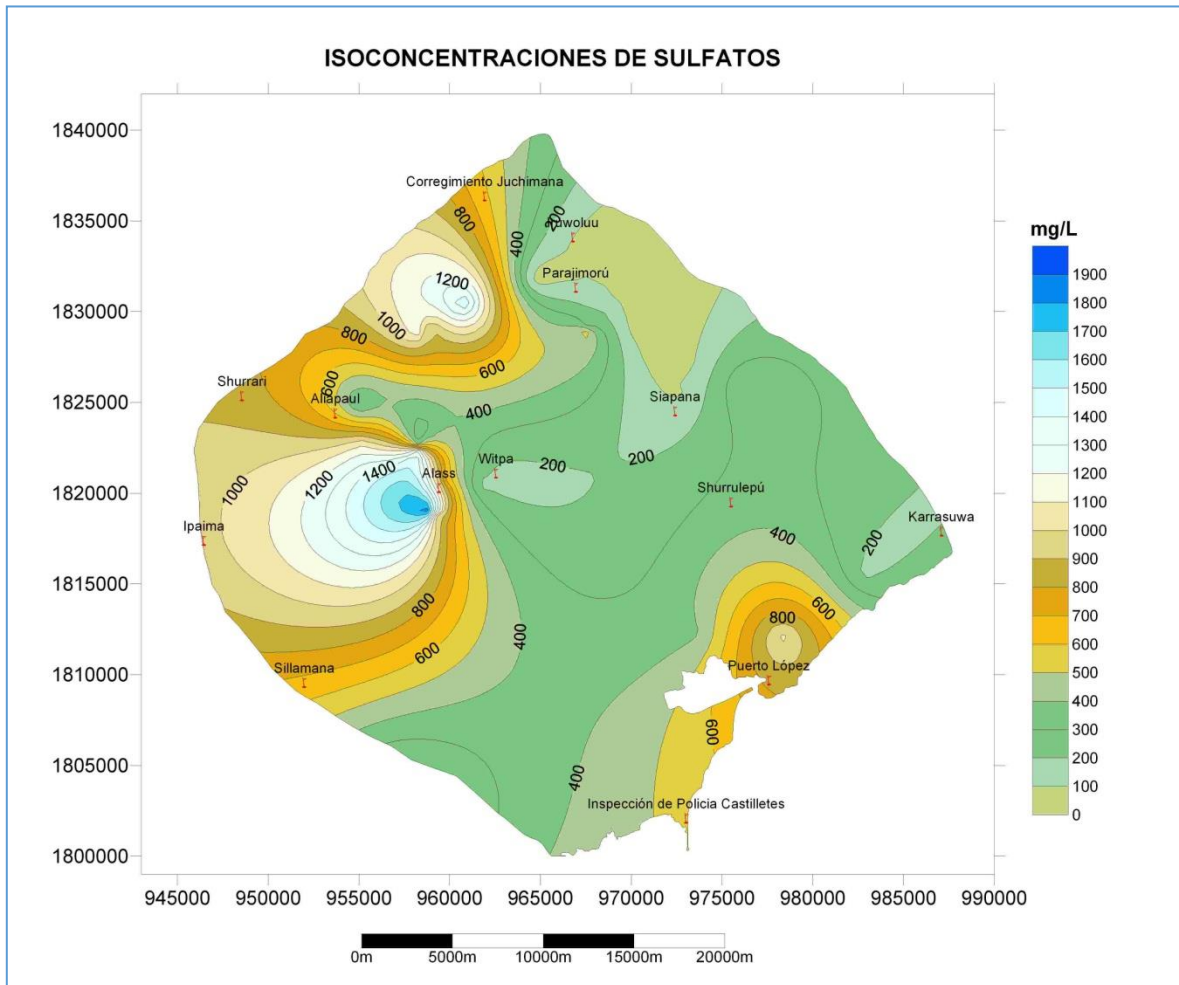


Figura 49. Distribución espacial de sulfatos.

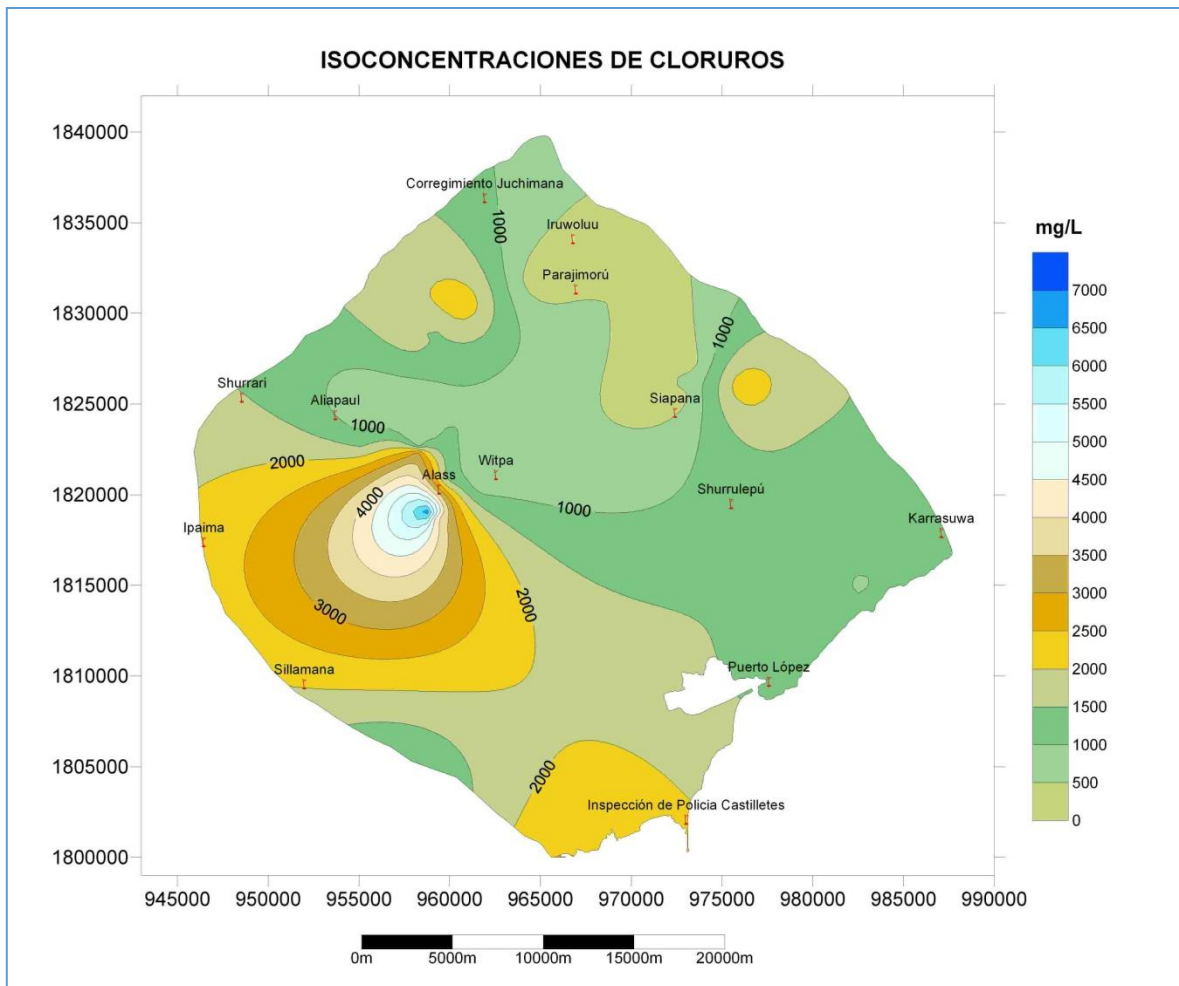


Figura 50 Distribución Espacial de Cloruros.

7.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

En la Figura 51 se observa el diagrama de cajas en el cual se evidencia el comportamiento de los iones en todas las unidades geológicas evaluadas. Considerando que el agua lluvia tiene entre 10 y 25 mg/l de ion cloruro, debido a la influencia marina, en el área de estudio se presentan las mayores concentraciones de cloruros debido a que las sales que contiene el agua lluvia procedente del mar

y favorecidas por el viento penetran al continente y son recargadas rápidamente para ser parte de niveles freáticos en gran parte del área de estudio.

De acuerdo con Matveev y Bashmakova (1964) la composición del agua lluvia es muy variable, dominando el Cl^{-1} , Na^{+1} , y K en zonas costeras y hacia el interior de los continentes pasa a dominar el SO_4 siempre y cuando no se tenga influencia de capas de yeso como sucede en el área de la Alta Guajira que se ve un aumento de este ion que está presente en la Formación Uitpa.

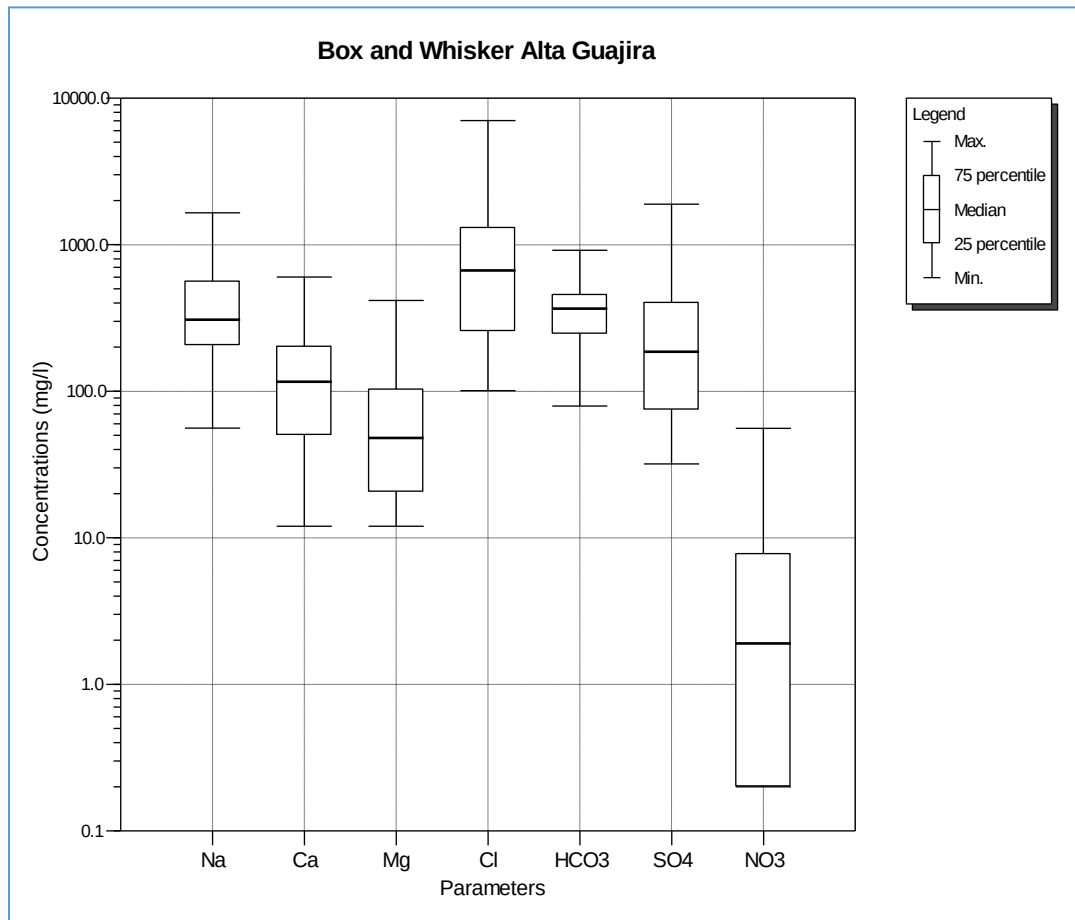


Figura 51. Diagrama de cajas de las unidades geológicas de la Alta Guajira.

En el diagrama Cl^{-1} Vs conductividad eléctrica (Figura 52) se observa una clara correspondencia entre los cloruros y la conductividad eléctrica a medida que aumentan los cloruros aumenta la CE, es decir es una relación directa. Las mayores concentraciones se encuentran en la Formación Uitpa y los menores valores se observan en la Granodiorita de Siapana esto debido a su composición litológica.

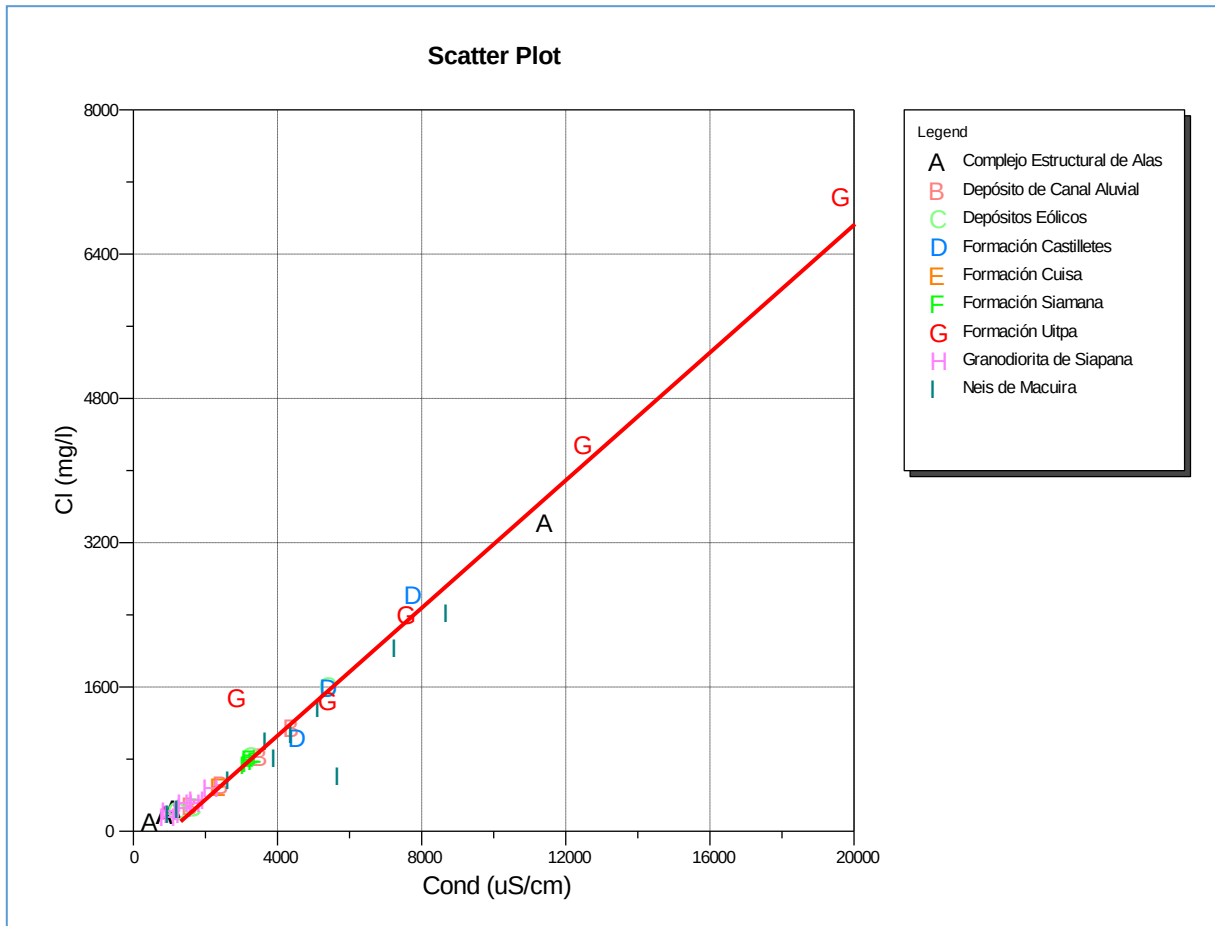


Figura 52. Diagrama Cl Vs conductividad eléctrica.

En las Figuras 52, 53 y 54 se observa que las concentraciones de cloruros, sulfatos y conductividad eléctrica en los aljibes y pozos disminuyen al aumentar la temperatura, en los manantiales a medida que aumenta estas concentraciones aumenta la temperatura y en las fuentes superficiales las concentraciones se mantienen algo constantes con respecto a la temperatura.

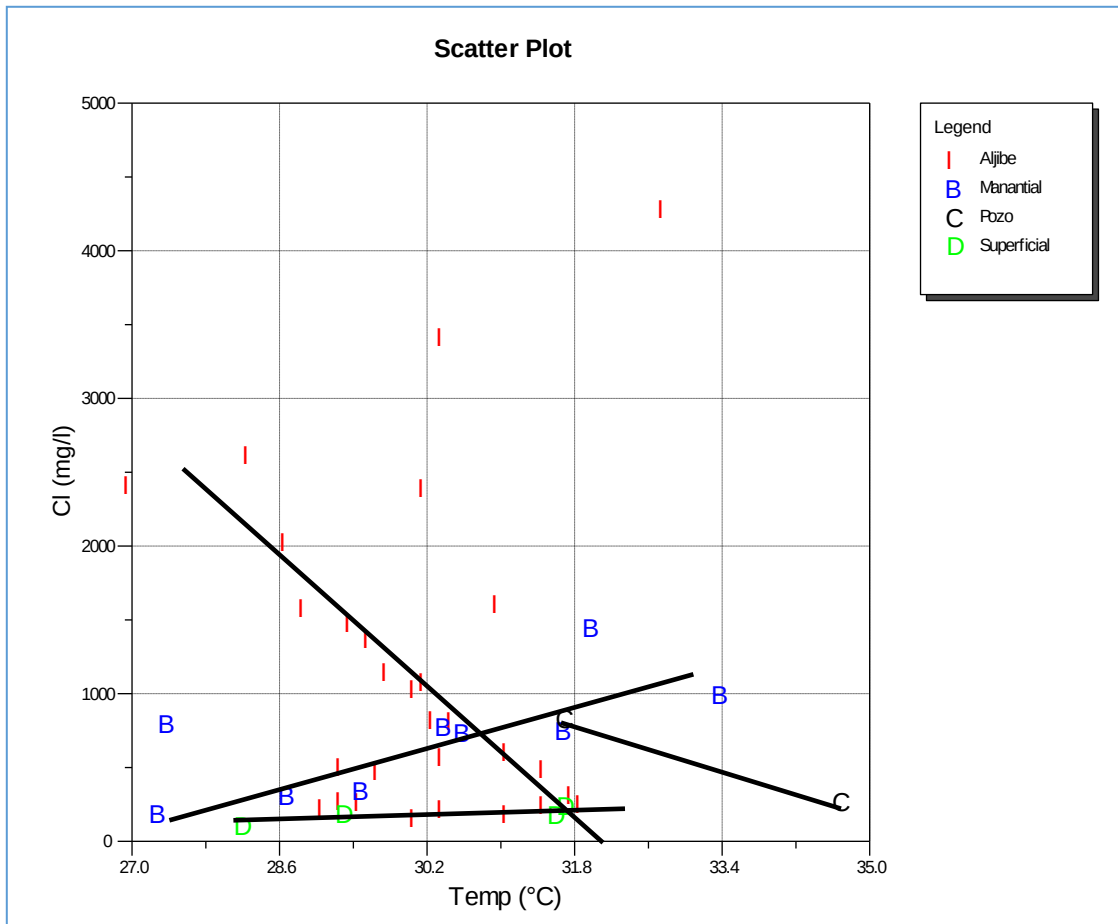


Figura 53. Diagrama Cl Vs Temperatura.

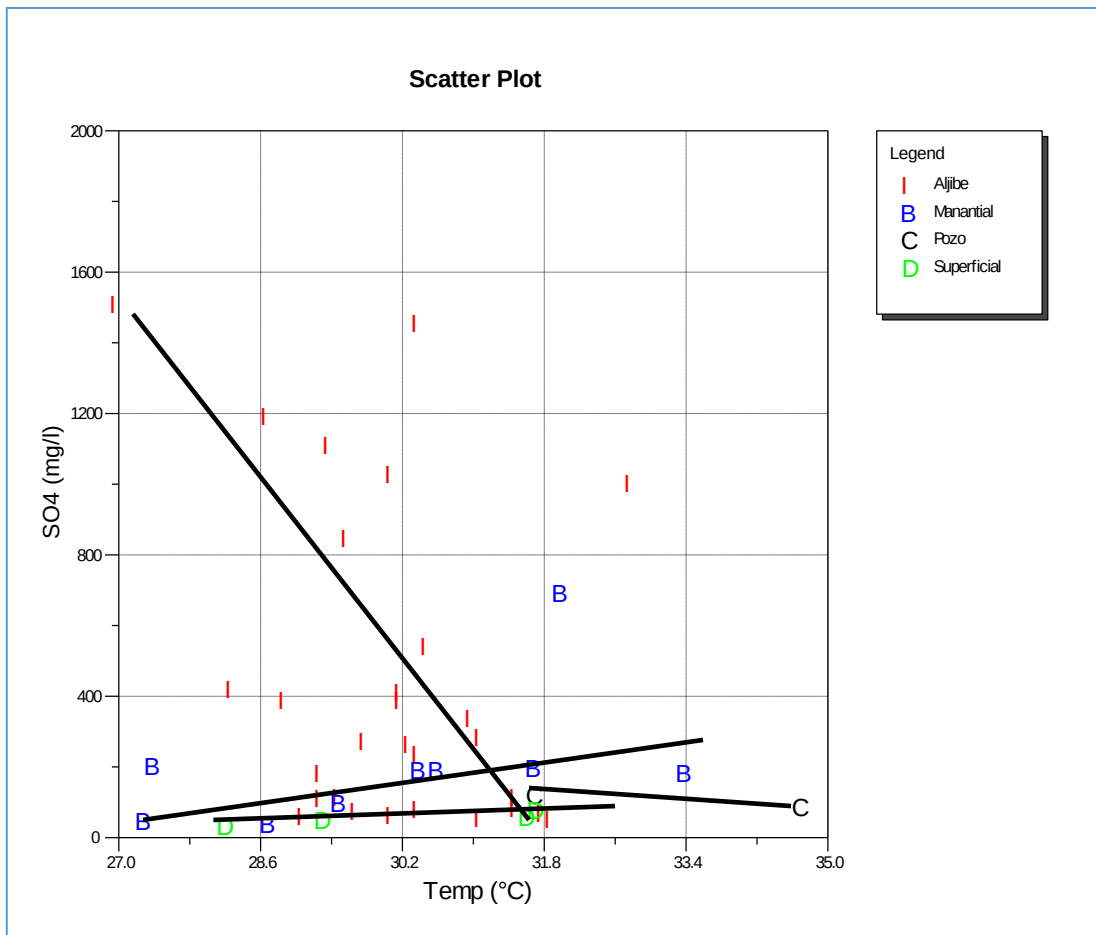


Figura 54. Diagrama SO4 Vs Temperatura.

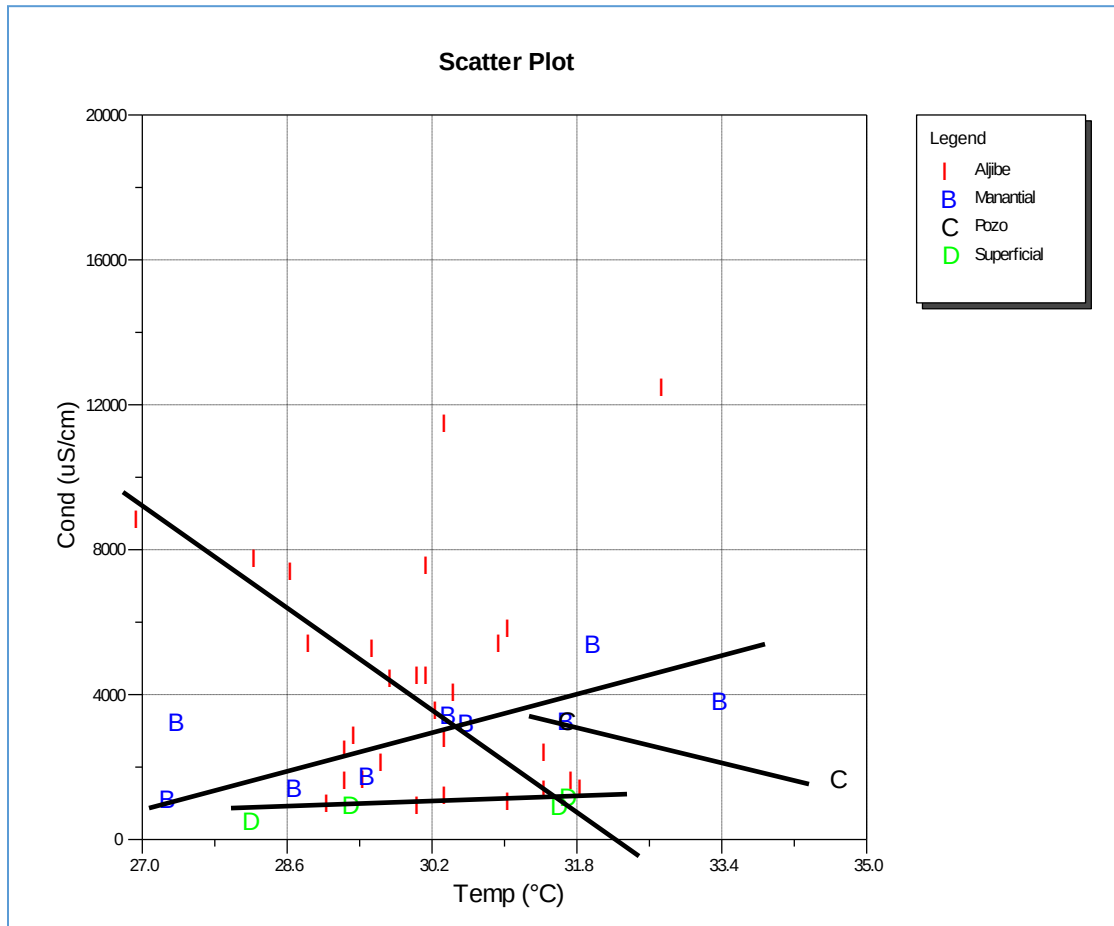


Figura 55. Diagrama Conductividad eléctrica Vs Temperatura.

En el mapa hidrogeoquímico se tienen las siguientes consideraciones:

Depósito de cauce aluvial presenta bajas concentraciones en sus iones mayoritarios con algún incremento en los cloruros y el sodio por las condiciones de evaporación.

Depósitos Eólicos presentan las más bajas concentraciones en sus iones mayoritarios debido a su poco tiempo de tránsito y recarga y evaporación demasiado rápida.

La Formación Castilletes presenta concentraciones mayores en los iones cloruros y sodio principalmente debido a las condiciones de aridez del área de estudio.

La Formación Siamaná presenta un leve incremento de los cloruros y sodio pero no tan elevados como otras unidades geológicas.

La Formación Uitpa presenta las mayores concentraciones de cloruros y sulfatos debido a la presencia de evaporitas en sus capas.

El complejo Estructural de Alas presenta mayores concentraciones de cloruros y sulfatos debido al comportamiento climatológico de evaporación típico en zonas áridas y el calcio debido a la presencia de mármol.

La Granodiorita de Siapana presenta baja concentraciones en sus iones mayoritarios.

El Neis de Macuira presenta bajas concentraciones en sus iones mayoritarios con algún incremento en los cloruros y el sodio por las condiciones de evaporación.

Algunas de las muestras presentan incrementos de las concentraciones principalmente por la presencia de animales tales como chivos y sapos dentro de las captaciones especialmente en aljibes y manantiales.

8. HIDROGEOLOGÍA

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la provincia hidrogeológica Costera - Vertiente Atlántica (UNESCO, 1996) la cual comprende la región litoral del mar Caribe desde la frontera con Panamá al SW hasta la península de La Guajira al N, teniendo como límite W la Serranía de Perijá y como límite meridional las estribaciones del sistema cordillerano andino. Tiene un área cercana a los 126.925 Km².

La provincia Costera- Vertiente Atlántica está constituida en mayor proporción por rocas sedimentarias de edad Terciaria de ambiente marino y por rocas ígneas y metamórficas que hacen parte del núcleo de la Sierra Nevada de Santa Marta y de los altos topográficos en la península de La Guajira.

Los sectores potencialmente permeables de ésta provincia se encuentra en sedimentos cuaternarios de origen continental y transicional y en rocas terciarias de ambiente marino.

8.1 RASGOS Y CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LA UNIDADES GEOLÓGICAS

Para estudiar el comportamiento del agua en las formaciones geológicas se definen los factores geológicos básicos relacionados con el estudio de las aguas subterráneas, los cuales controlan los procesos de infiltración, movimiento y almacenamiento del agua. Estos factores corresponden a los aspectos litoestratigráficos como textura y composición de las rocas, controles estructurales, geomorfología, mineralogía de arcillas y petrografía.

Se analizaron los parámetros de interés como porosidad condiciones de fracturamiento y procesos de carstificación, los cuales se determinan de forma semi-cuantitativa en varios tipos de roca. Los valores de porosidad están afectados por la distribución de los tamaños de grano a lo largo de las secuencias estratigráficas, la meteorización, la presencia de arcillas, disolución de las rocas calcáreas y el tipo de fracturamiento en los diferentes tipos de litología.

8.2 CLASIFICACION HIDROGEOLOGICA DE LAS UNIDADES GEOLOGICAS

La zona de estudio se encuentra conformada principalmente por rocas sedimentarias y depósitos recientes, los cuales constituyen el ambiente físico

donde ocurren los procesos hidrogeológicos. En menor proporción rocas ígneas y metamórficas con condiciones de medio a bajo interés hidrogeológico. Esta clasificación depende de las características texturales, composicionales y estructurales de las rocas y sedimentos, las cuales permiten determinar en forma general, el comportamiento de la roca o sedimento según la porosidad y posibilidad de flujo. Se ha realizado la clasificación de las rocas y sedimentos desde el punto de vista geológico en las siguientes unidades (Anexo 8):

8.2.1 Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular

Sistemas acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente aluvial y eólico, generalmente de tipo libre. Acuíferos de baja productividad.

8.2.1.1 Depósito de Cauce Aluvial (Qca)

Depósitos semi-consolidados y no consolidados constituidos por gravas, arenas y arcillas en proporciones muy variables de acuerdo con la distancia a la fuente de transporte. Productividad baja

8.2.1.2 Depósitos Eólicos (Qe)

Depósitos espesos de arenas, poco o nada consolidados con tamaño de grano arena fina a muy fina, muy bien seleccionadas y con granos subredondeados. Acuífero de baja productividad

8.2.2 Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas y/o carstificadas

Sistemas acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por rocas sedimentarias del Terciario y metamórficas, consolidadas. Acuíferos generalmente de tipo libre a confinado. Acuíferos de baja productividad, con transmisividades del orden de $45 \text{ m}^2/\text{día}$

8.2.2.1 Neis de Macuira (Pznm)

Rocas de alto grado de metamorfismo con estructura néisica y tamaño de grano medio a grueso. Predominan los neises e intercalaciones de esquistos y anfibolitas. Los neises están caracterizados por alternancia de bandas oscuras y claras y por una fuerte orientación mineral. En el área de estudio presenta la mayor cantidad de puntos de agua subterránea debido al intenso fracturamiento (Falla de Macuira).

8.2.2.2 Complejo Estructural de Alas (K?cea)

Constituido por bloques de esquistos, mármoles, metarenitas, milonitas y brechas de falla originadas a partir del metamorfismo de una secuencia sedimentaria, asociados con bloques de rocas metamórficas en facies anfibolita y con estructura

néisica típica del Neis de Macuira y bloques de rocas sedimentarias tipo litoarenitas, esparitas y bioesparitas. Acuífero de muy baja productividad.

8.2.2.3 Formación Siamaná (Es)

Areniscas calcáreas de grano fino y matriz limosa a la base. Hacia el techo, capas medias a gruesas de bioesparitas arenosas con desarrollo de cavernas. Localmente las calizas arrecifales pueden representar el 70% de la formación. Espesor regional entre 100 y 302 m. Acuífero de productividad media - baja a baja con transmisividades del orden de 45 m²/día.

8.2.2.4 Formación Jimol (Nj)

Hacia la base, capas medias a gruesas de areniscas calcáreas, gradando en su parte media a bioesparitas impuras. Al tope predominan las areniscas en capas medias a muy gruesas de grano medio a fino intercaladas con limolitas. Espesor regional entre 614 m y 940 m. Acuífero de baja productividad.

8.2.3 Sedimentos y rocas con limitados recursos de aguas subterráneas

Complejo de sedimentos y rocas sedimentarias del Terciario, ígneas del Jurásico y rocas metamórficas. Acuíferos con muy baja productividad

8.2.3.1 Granodiorita de Siapana (Jgs)

Roca granular masiva con tamaño de grano medio, compuesta por abundante cuarzo, oligoclasa, ortosa, microclina y biotita como minerales esenciales; moscovita, circón, apatito, poca epidota y óxidos de hierro como accesorios. Delgados diques leucocráticos de rocas porfíricas y afaníticas de cuarzo-feldespato; al igual que diques aplíticos con zonas marcadas por finos granates rojos. En algunos sectores la unidad presenta un grado de saprolitización bajo a medio.

8.2.3.2 Formación Paraúnkrein (Ksp)

Metalodolitas que varían a metarenitas de grano muy fino. En menor proporción se encuentran niveles lenticulares de metaconglomerados y metarenitas, así como capas cizalladas de micritas y biomicritas.

8.2.3.3 Formación Uitpa (Eu)

A la base, areniscas de grano muy fino dispuestas en capas medias a gruesas; esporádicas intercalaciones de capas delgadas a medias de niveles calcáreos. En la parte media alterna con láminas gruesas hasta capas muy gruesas limolitas calcáreas y bancos de lodolitas. Hacia el techo, esporádicas intercalaciones de capas delgadas de bioesparitas. Espesor regional entre 200 m y 342 m.

8.2.3.4 Formación Castilletes (Nc)

En la base predominan las bioesparitas y areniscas calcáreas dispuestas en capas medias a gruesas; al tope son comunes las lodolitas. Usualmente no fracturadas, muy compactas y cementación resistente a la erosión. Espesor regional entre 70 y 900 m.

8.2.3.5 Depósitos de Llanura de Inundación (Qli)

Depósitos inconsolidados a semi-consolidados de tamaño de grano arena fina - arcilla. Son matriz soportados, con relación matriz: armazón variable (generalmente 90 10%). La matriz del depósito es arcilla

8.2.3.6 Depósitos de Llanura Intermareal (Qli)

Depósitos inconsolidados compuestos por lodos cohesivos de color café oscuro, producto de la acumulación de materiales finos por acción mareal. Estos depósitos comprenden una gran extensión areal, formando topografías planas, las cuales están limitadas por las colinas suaves y redondeadas de las formaciones adyacentes.

8.2.3.7 Depósitos Evaporíticos Recientes (Qes)

Nombre informal empleado para denominar los depósitos marinos restringidos o cerrados que están cercanos a la costa actual asociados con la evaporación de aguas ricas en sales. Se diferencian de los depósitos de llanura mareal en que estos se desarrollan como consecuencia de los ciclos mareales diarios, mientras que los evaporíticos no obedecen a dichos ciclos.

9. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Sobre la base de las características del medio físico y su dinámica, se plantea el modelo hidrogeológico conceptual, formulado para el acuífero principal del área de estudio, mediante la integración y correlación de la información hidrológica, geológica, geofísica, hidrogeoquímica e hidrogeológica (Figura 56) (Anexo 9)

El sistema hidrogeológico está constituido las siguientes condiciones de borde:

- Las arcillolitas de las formaciones Uitpa y Jimol constituye el límite del sistema en sentido vertical. Hidrogeológicamente, estas capas tienen un comportamiento de muy baja permeabilidad desde el sentido práctico.
- La Formación Siamaná, presenta características confinantes y semi-confinantes, que determina la relación dinámica entre sus capas.
- La relación directa del sistema con el arco meteórico del ciclo hidrológico, determina que en su comportamiento dinámico influye en los movimientos del agua en sentido vertical y flujo horizontal regional (recarga y descarga).
- Las entradas y salidas del sistema y las variaciones dentro del mismo están determinadas por la afluencia y efluencia subterránea; recarga y descarga natural por infiltración y evapotranspiración.

9.1 ACUÍFERO

La Formación Siamaná en sus miembros arenosos se comporta como un acuífero de porosidad primaria localmente, pero en general se trata de un acuífero de porosidad secundaria con una productividad baja y transmisividades del orden de 45 m²/día

9.2 INFILTRACIÓN Y RECARGA

El agua lluvia que se precipita sobre la cuenca cumple su ciclo hidrológico de acuerdo con las siguientes características generales:

Gran parte del agua lluvia retorna a la atmósfera por evapotranspiración.

Otra parte de la precipitación que es relativamente baja, fluye en forma de escorrentía superficial.

Una parte se infiltra en el acuífero de porosidad secundaria del Neis de Macuira y localmente la Granodiorita de Siapana, debido al gran fracturamiento que es producido principalmente por las fallas de Macuira y Cuisa y fluye controlada por el movimiento regional del agua subterránea a través de la Formación Siamaná. Gran parte de ella se percola en profundidad.

9.3 FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

El flujo del agua subterránea tiene una posible dirección de movimiento de los cerros de Macuira hacia la costa favorecido por el gradiente topográfico.

9.4 DESCARGA DE LOS ACUÍFEROS

La descarga de los acuíferos está representada por algunos manantiales de contacto y fracturamiento de las unidades geológicas; y parte de la descarga (mínima) se realiza por medio de dos pozos profundos que extraen caudales muy pequeños.

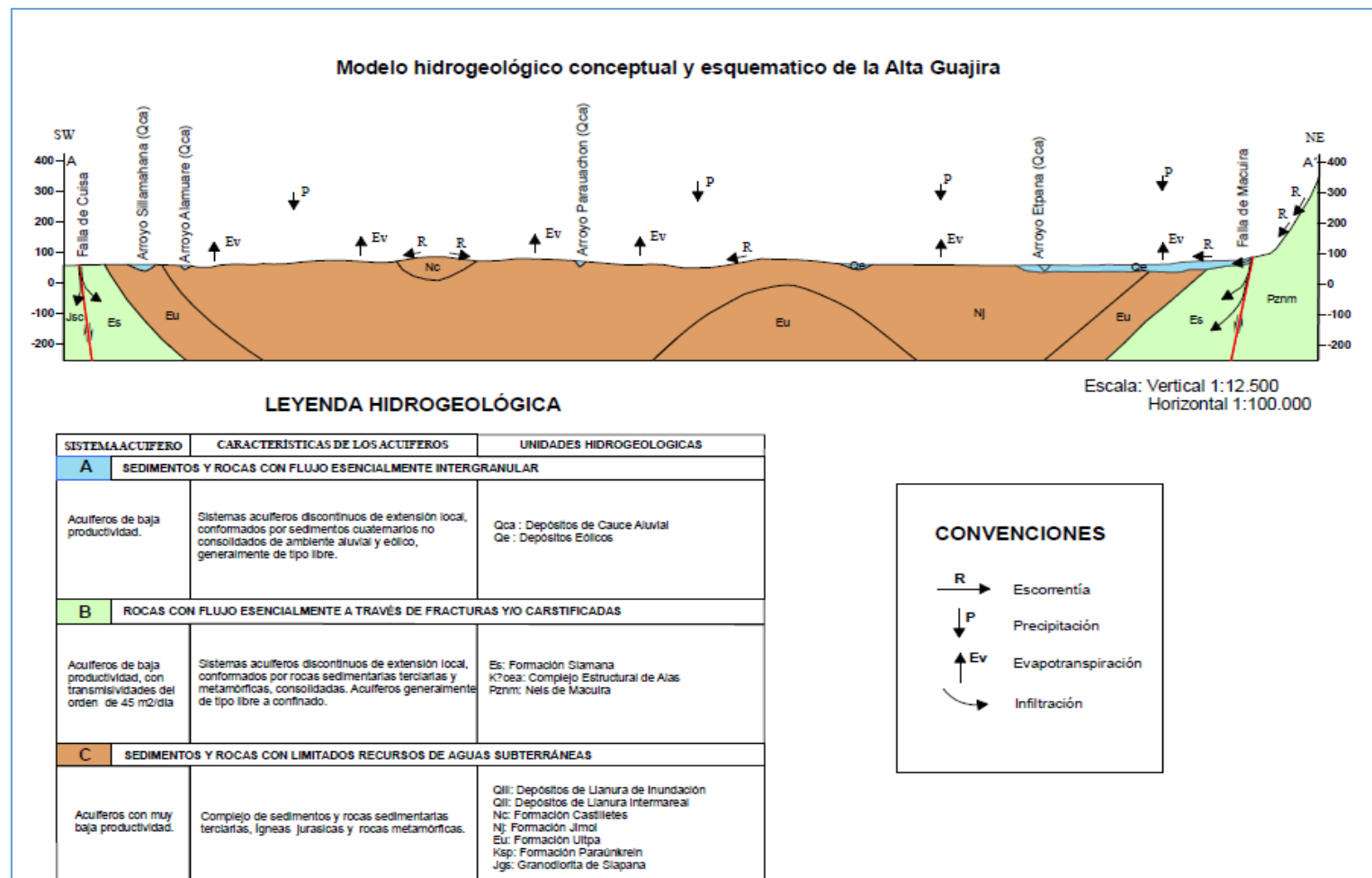


Figura 56. Modelo hidrogeológico conceptual esquemático de la Alta Guajira.

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las condiciones climatológicas del área de estudio presentan una precipitación del orden de 333 mm/año, con un comportamiento monomodal, una temperatura promedio de 28.1° C y una evapotranspiración real del orden de 342 mm/año.

En la zona de estudio se identificaron 51 puntos de agua, representados por 12 manantiales, 31 aljibes, 4 pozos y 4 puntos de agua superficial.

En el análisis de la hidráulica de pozos del acuífero Siamaná se presenta una transmisividad del orden de 45 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de $7.02 \cdot 10^{-4}$, lo que indica condiciones de confinamiento de las capas acuíferas de la Formación Siamaná.

Dentro de las condiciones hidráulicas del pozo Siapana 6- II-C-5 se presenta un abatimiento del orden de 12.98 metros y una capacidad específica de 0.44 l/seg/m.

Según la evaluación geoeléctrica el comportamiento general de la resistividad interpretada a diferentes profundidades se observa una tendencia clara en la que las franjas de resistividad mayor se localizan cerca de la superficie en las áreas montañosas y de piedemonte, lo que puede indicar granulometría gruesa y fracturados, como una saturación media con agua posiblemente poco salobre a dulce.

El agua subterránea en la zona de estudio tiene valores de pH entre 6.3 y 8.1, siendo dominante un comportamiento mayor a 7 en el área de estudio, atribuido a la disolución de los materiales calcáreos. Se observan las mayores concentraciones en la zona de descarga en la Falla de Macuira en inmediaciones de Siapana

La conductividad eléctrica está entre 932 y 19630 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los mayores valores se presentan en el sector de Alas en los manantiales y aljibes de la Formación Uitpa los cuales se ven incrementados debido a la presencia de alto contenido de sulfatos por las capas yeso. Las menores concentraciones se presentan al noroccidente en el cerro de Macuira. Las concentraciones superiores de la conductividad eléctrica coinciden con los altos contenidos en el agua de

cloruros y sulfatos debido a la génesis de la roca y condiciones de evaporación de las mismas.

Con la evaluación de los diagramas de *Piper* se puede concluir que las muestras de agua tomadas en el área de estudio, se clasifican como sulfatadas cálcicas debido a la disolución de las rocas calcáreas y presencia de yeso en la formación Uitpa principalmente y aguas de tipo cloruradas sódicas debido a las condiciones climatológicas evaporíticas típicas de zonas semiáridas, además se identificó un tiempo de tránsito rápido a través de las fracturas de la Granodiorita de Siapana y el Neis de Macuira hasta llegar a la Formación Siamaná.

Se presenta una infiltración en el acuífero de porosidad secundaria del Neis de Macuira y localmente la Granodiorita de Siapana, debido al gran fracturamiento que es producido principalmente por las fallas de Macuira y Cuisa y fluye controlada por el movimiento regional del agua subterránea a través de la Formación Siamaná. Gran parte de ella se percola en profundidad.

Se recomienda obtener la información de los diseños, columnas y perfiles de los pozos para desarrollar con mayor exactitud el componente hidráulico de la Formación Siamaná; de no ser así se recomienda realizar video para conocer por lo menos el estado mecánico y ubicación de filtros de los pozos del Corregimiento de Siapana.

Se recomienda realizar análisis de isótopos estables para corroborar el origen y movimiento de agua subterránea y su interrelación con el agua superficial y de lluvia.

Si se plantea la posibilidad de abastecimiento se recomienda realizar galerías en el piedemonte a lo largo de la falla de Macuira y efectuar las respectivas conducciones por gravedad a los sistemas de almacenamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bürgl. (1960). Geología de la Península de La Guajira. Bol Geol., Serv. Geol. Nal., vol. 6 (1958), nº 1-3, pp. 129-168, 5 fig., 20 fotos, 1 lám. (Pl. VIII), Bogotá.
- Cardona *et al.* (2006). Tectonic correlations of pre-Mesozoic crust from the northern termination of the Colombian Andes, Caribbean region. Journal of South American Earth Sciences 21, 337-354.
- CÓRDOBA & CORTÉS, 1979. Los Suelos de la alta y media Guajira: sus características y aptitud de uso. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá.
- CORPOGUAJIRA. 1992. Corporación Autónoma Regional de La Guajira – Departamento Nacional de Planeación. Ingeniería y Proyectos Regionales Consultores INPRO Ltda. Plan Operativo de Control Ambiental Minero en el Departamento de La Guajira. Informe Final. Santa Fe de Bogotá.
- De PORTA, J. 1974. Léxique Stratigraphique International. Amérique Latine, Colombie (deuxième partie), Tertiaire et Quaternaire. Centr. Nat. Rech. Sci., 5(4b):1-643. París. INGEOMINAS-UNAL, 2009 Convenio
- INGEOMINAS-UNAL, 2009. Proyecto de Investigación: Cartografía e Historia Geológica de la Alta Guajira, implicaciones en la búsqueda de recursos minerales; Acuerdo Específico 030/2006. IDEAM
- IRVING, E. M. 1971. La evolución estructural de Los Andes más septentrionales de Colombia. Ingeominas, Bol. Geol., 19(2):1-90. Bogotá. Jacob Kearton William
- LOCKWOOD, J. P. 1965. Geology of the Serranía de Jarara Area. Guajira Peninsula, Colombia. Tesis PhD, Princeton Univ. 237 p. New Jersey.

- MacDONALD, W. D. 1964. Geology of the Serrania de Macuira Area, Guajira Peninsula, Colombia. Tesis PhD., Princeton Univ., 167 p. New Jersey.
- Matveev y Bashmakova. (1991). Asociación geológica Argentina. Revista Tomo XLVI. Buenos Aires.
- MOSQUERA, F.; *et al.* 1976. Exploración de acuíferos de la Alta y Media Guajira. Capítulo I, Geología. Ingeominas, Informe 1668. Bogotá.
- RADELLI, L. 1962. Las dos granitizaciones de la Península de La Guajira (Norte de Colombia). U. Nal., Geol. Col., (1):5-19. Bogotá. Ramírez (2007)
- Rodríguez & Londoño. (2002). Memorias del mapa geológico del Departamento de La Guajira, Geología, recursos minerales y amenazas potenciales. INGEOMINAS.
- ROLLINS, J. F. 1965. Stratigraphy and structure of the Guajira Peninsula, northwestern Venezuela and northeastern Colombia. Univ. Nebraska Studies, New Ser., 30:1- 1102. Lincoln.
- STUTZER, O. 1934. Contribución a la geología de la península de La Goajira (1927). Serv. Geol. Nal., CEGOC, (2):211-243. Bogotá.
- THOMAS, D. 1972. The Tertiary geology and systematic paleontology (Phylum Mollusca) of the Guajira Peninsula, Colombia, South America. Tesis PhD, State Univ. New York at Binhamton. 147 p. New York. Theis en 1935
- UNESCO, 1996. Mapa hidrogeológico de América del Sur. Unesco.