

**DIAGNÓSTICO DE LA PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL
DEPARTAMENTO DEL CAUCA Y DE LA TECNOLOGÍA IMPLEMENTABLE PARA SU
EXTRACCIÓN**

PEDRO FELIPE SANDOVAL CERÓN

VÍCTOR MANUEL TORO MUÑOZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

POPAYÁN

2014

**DIAGNÓSTICO DE LA PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL
DEPARTAMENTO DEL CAUCA Y DE LA TECNOLOGÍA IMPLEMENTABLE PARA SU
EXTRACCIÓN**

PEDRO FELIPE SANDOVAL

VÍCTOR MANUEL TORO

**Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de Ingeniero Físico**

Directora

Dra. SONIA GAONA JURADO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

POPAYÁN

2014

CONTENIDO

	Página
Lista de Figuras	I
Lista de Tablas	III
Resumen	IV
Introducción	1
Capítulo I: Las Aguas Subterráneas	3
1.1 Descripción del Movimiento del Agua.	5
1.2. Orígenes del Agua Subterránea	6
1.3. La Geología Relacionada con la Ocurrencia y Movimiento de las Aguas Subterráneas.	7
1.4. Tipos de Acuíferos.	10
Capitulo II Explotación del agua subterránea en el departamento del Cauca, Diagnóstico Preliminar	11
2.1. Hidrogeología en el Departamento del Cauca	11
2.2 Diagnóstico Preliminar.	16
Capitulo III: Estudios Preliminares a la Perforación de Pozos de Aguas Subterráneas	20
3.1 Estudio Preliminar de la Zona.	20
3.2 Métodos Geofísicos para la Determinación de Acuíferos:	20
3.2.1. Resistividad Eléctrica.	21
3.2.2. Refracción Sísmica.	27
3.2.3. Gravimetría.	28
3.3 Métodos Geológicos:	28
3.4 Elección del Sitio de Construcción del Pozo.	30
Capitulo IV: Métodos de Perforación	32
4.1 Métodos de Perforación.	32
4.1.1. Perforación por Rotación	32
4.1.2. Percusión.	36

4.1.3. Roto percusión.	39
4.2 Sello Sanitario	40
4.3. Proceso de Perforación	41
4.4. Limpieza del Pozo y Prueba de Bombeo	42
4.5 Herramientas y Maquinarias	43
Capítulo V: Información Legislativa y Actos Administrativos para la Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas	49
Capítulo VI: Experiencias de Perforación de Pozos en la Región de Estudio	56
6.1 Tecnofar	56
6.2 Ingenio Incauca	62
6.3 Ingenio Rio Paila	63
6.4 Colpozos	64
Conclusiones y Recomendaciones	66
Referencias	68
Anexo 1 Pozos en el Departamento del Cauca	70
Anexo 2 Trabajos Futuros	75

LISTA DE FIGURAS

	Pagina	
Figura 1.1	Ciclo hidrológico.	6
Figura 2.1	Geología del departamento del Cauca (IGAC 2006)	12
Figura 2.2	Hidrogeología en el departamento del Cauca(IGAC 2006)	14
Figura 2.3	Cantidad de pozos en el Departamento del Cauca	18
Figura 2.4.	Caudales promedio de los pozos por municipio	18
Figura 3.1	Material conductor de longitud L y área transversal A	22
Figura 3.2	Alineamiento de los cuatro electrodos (AB – MN)	25
Figura 3.3	Disposición de los electrodos por el método de Wenner y por el método de Schlumberger	25
Figura 3.4	Registro electrico	26
Figura 3.5	Propagación de ondas sísmicas.	27
Figura 3.6	toma de muestras para la columna	29
Figura 3.7	Símbolos y convenciones utilizados en las gráficas de columnas estratigráficas	30
Figura 3.8	Columna litológica	31
Figura 4.1	Torre de perforación	33
Figura 4.2	Perforación por circulación directa	34
Figura 4.3	Perforación por circulación inversa	35
Figura 4.4	Esquema del Sistema de perforación de percusión	37
Figura 4.5	Equipo de percusión	37
Figura 4.6	Esquema del sistema de roto percusión	39
Figura 4.7	Perforación inicial previa al sello sanitario	43

Figura 4.8	Proceso de introducción de la tubería	42
Figura 4.9	Tubería ranurada o filtro	42
Figura 4.10	Brocas tricónicas	44
Figura 4.11	Tubería	45
Figura 4.12	Instalación de una bomba dentro de un pozo de aguas subterráneas	46
Figura 4.13	Corte frontal y lateral de una bomba centrífuga	46
Figura 4.14	Sistema interno de una bomba de pistón	47
Figura 4.15	Bomba tipo turbina vertical	48
Figura 5.1	Formatos prospección y exploración de aguas subterráneas	52
Figura 5.2	Formato la concesión de aguas subterráneas	53
Figura 6.1	Instalaciones de Tecnofar en el parque industrial	56
Figura 6.2	Pozo de perforación en Tecnofar	57
Figura 6.3	Equipo de perforación de la empresa Colpozos.	58
Figura 6.4	Muestras para análisis litológico.	59
Figura 6.5	Brocas tricónicas de 17, 22 y 36 pulgadas	60
Figura 6.6	Equipo Gardner-Denver para perforación por circulación directa	61
Figura 6.7	Corinto (Cauca), ingenio Incauca	62
Figura 6.8	Maquinaria de prospección Corinto Cauca	63
Figura 6.9	Finca La Serafina, Puerto Tejada (Cauca)	64
Figura 6.10	Pozo en La Serafina, Puerto Tejada (Cauca).	64
Figura 6.11	Puerta de acceso a Colpozos S.A.S.	65

Lista de Tablas

	Pagina
Tabla 1.1 Distribución Global del agua	3
Tabla 1.2 Formación geológica vs Tipo de acuífero.	9
Tabla 2.1 Pozos de agua subterránea en el departamento del Cauca, caudal y promedio por municipio	17
Tabla 3.1 Contrates físicos medibles en los diferentes métodos geofísicos.	21
Tabla 5.1 Índice de riesgo del agua para consumo humano	54
Tabla 5.2 Valores máximos de los elementos presentes en el agua para la salud humana	55

RESUMEN

El trabajo de grado que dio como resultado el presente documento fue realizado durante el transcurso del año 2013, alimentado por información tomada desde bibliografía especializada, visitas a la Corporación Autónoma Regional del Cauca y a la empresa Colpozos, visitas de campo hecho en algunas industrias del norte del Cauca y a sesiones periódicas de discusión.

El documento presenta como primer ítem el estudio de las aguas subterráneas, luego un diagnóstico inicial de la zona de estudio, los diferentes estudios preliminares que ayudaran a determinar el sitio para realizar la perforación de un pozo profundo, los diferentes métodos de perforación y las ventajas de unos frente a otros según las condiciones del terreno y a los beneficios técnicos brindados por cada uno de ellos, los requisitos y actos administrativos ante la autoridad competente para obtener el permiso de concesión. El documento contiene también las distintas experiencias de campo obtenidas en visitas realizadas a lugares donde se encontraban en diferentes etapas de perforación y construcción de pozos profundos, experiencias que enriquecieron y aclararon muchos conceptos.

INTRODUCCIÓN

El 28 de julio de 2010, a través de la Resolución 64/292 [1], la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos. La Resolución exhorta a los Estados y organizaciones internacionales a proporcionar recursos financieros, a propiciar la capacitación y la transferencia de tecnología para ayudar a los países, en particular a los países en vías de desarrollo, a proporcionar un suministro de agua potable y saneamiento saludable, limpio, accesible y asequible para todos.

El *agua subterránea* representa una fracción importante de la masa de agua en los continentes, alojándose en los acuíferos bajo la superficie de la tierra. El volumen del agua subterránea es mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o circulante, aunque menor al de los mayores glaciares, las masas más extensas pueden alcanzar millones de km² (como el acuífero Guaraní). El agua del subsuelo es un recurso importante del que se abastece a una tercera parte de la población mundial, pero de difícil gestión por su sensibilidad a la contaminación y a la sobreexplotación [2].

El Departamento del Cauca presenta características que lo posicionan en un lugar de producción y reserva hídrica de connotaciones nacionales y globales, tales como

- ✓ Su posición geográfica.
- ✓ Su orografía.
- ✓ Su exposición a eventos climáticos, influenciados por las circulaciones atmosféricas combinadas entre corrientes frías y cálidas continentales y oceánicas.
- ✓ Sus coberturas vegetales con grandes extensiones de bosques y páramos en áreas productoras y reguladoras del recurso hídrico.

A pesar de lo anterior, el Departamento cada vez sufre veranos más largos e inviernos más crudos, que convierten cualquier actividad agropecuaria en una actividad tambaleante, que entra en crisis cada vez que cambia el clima.

El Cauca dispone de una cobertura del 66% en sistemas de servicio de abastecimiento de agua; sólo Popayán cuenta con un sistema de abastecimiento de agua que se puede considerar aceptable, cubriendo el 94.8% de su población. Otros municipios con altos niveles de cobertura en el servicio de acueducto están ubicados en la región norte, como Puerto Tejada con 96.1%, Padilla con 93%, Villarrica con 80.4%. Algunas cabeceras municipales presentan problemas tanto en continuidad del servicio, como

en la calidad del agua suministrada, teniendo aun altas coberturas como Patía con 84.6%, Timbío con 88.5% y otros con tasas de cobertura realmente preocupantes como Inzá 14%, Piamonte 7%, Argelia 5% y Guapi 17.2%. En general, las tasas de cobertura hídrica del Cauca están por debajo de otras regiones del país [3].

En cuanto al proceso de explotación agropecuaria, donde se hace evidente el agua como un protagonista principal, el Departamento se encuentra en un nivel por debajo de departamentos de características socioeconómicas similares (Huila, Nariño, Putumayo), ya sea por cantidad de área trabajada como por la tecnología utilizada para hacer el proceso lo más eficiente posible.

Si se tiene en consideración que el 19,3% del territorio Caucano corresponde a pendientes de 25 a 50% y que más del 50% del Cauca ha perdido o transformado su cobertura vegetal [3] y que esta tendencia se mantiene en aumento, los escenarios futuros son preocupantes en cuanto a la fragilidad del sistema hídrico.

Por lo anterior, con el presente documento se pretende contribuir al propósito de la consecución del recurso hídrico, volcando la atención hacia las fuentes subterráneas con pozos que satisfagan las necesidades hídricas de una explotación agropecuaria en el departamento del Cauca.

El objetivo central del documento es presentar un diagnóstico de la prospección de las aguas subterráneas en algunas zonas del Departamento del Cauca, analizando la viabilidad legal y técnica de explotar el recurso para obtener el agua de una forma eficiente y económica. El documento se divide en cinco capítulos de forma estructurada, tal que el capítulo I contiene información general sobre el agua subterránea, los acuíferos, sus características y los parámetros que los hacen viables como fuentes de extracción de agua. En el capítulo II se hace un diagnóstico preliminar de la explotación de agua subterránea en el Cauca. En el capítulo III se reportan los diferentes análisis previos que debe hacerse al terreno con el fin de determinar su capacidad de acumulación y posible extracción de agua. La información referente a la instrumentación requerida y los tipos de métodos de extracción que pueden ser implementados en la región para la construcción de pozos de aguas subterráneas, se consigna en el capítulo IV. Ya el capítulo V presenta una breve revisión de la legislación que regula el uso del agua subterránea y los pasos legales que deben cumplirse previos al proceso de construcción de pozos. Finalmente, en el capítulo VI se describen algunas visitas que se hicieron a zonas donde se construyen pozos.



CAPÍTULO I: Las Aguas Subterráneas

Se denomina *agua subterránea* aquella agua situada por debajo de la superficie del suelo, en sus espacios porosos y en las fracturas de las formaciones rocosas. El agua subterránea es recargada por la superficie

natural y eventualmente fluye hacia ella. La descarga natural a menudo se filtra, y se pueden formar los oasis o los humedales. Las aguas subterráneas son extraídas para usos agrícolas, municipales e industriales mediante la construcción y operación de pozos de extracción.

El área donde se acumula el agua en las grietas se llama *zona saturada*. La parte superior de esta área se le conoce como el *nivel freático*, que puede encontrarse a un metro del suelo o a cientos de metros por debajo de la superficie.

El agua subterránea se acumula en capas de tierra, arena y rocas conocidas como acuíferos. La velocidad a la que el agua se mueve depende del tamaño de los espacios en las capas y de la conexión entre éstos. Los acuíferos consisten típicamente de gravilla, arena, arenilla y piedra caliza. Estos materiales son permeables porque tienen poros grandes que permiten que el agua fluya con mayor rapidez.

El agua subterránea es un componente esencial del ciclo hidrológico, lo que se ve reflejado en la distribución global del agua (ver Tabla 1.1). Como se observa, dentro del porcentaje del total de agua dulce, las aguas subterráneas están en el segundo renglón aportando el 30.06% del total de agua dulce.

Tabla 1.1 Distribución Global del agua [4]

	Volumen (1.000 km³)	% del total de agua	% del total de agua dulce
Agua salada			
Océanos	1.338.000	96,54	
Aguas subterráneas salinas/salobres	12.870	0,93	
Lagos de agua salada	85	0,006	
Aguas continentales			
Glaciares, cubierta de nieve permanente	24.064	1,74	68,7
Agua dulce subterránea	10.530	0,76	30,06
Hielo del suelo, gelisuelo	300	0,022	0,86
Lagos de agua dulce	91	0,007	0,26
Humedad del suelo	16,5	0,001	0,05
Vapor de agua atmosférico	12,9	0,001	0,04
Pantanos, humedales*	11,5	0,001	0,03
Ríos	2,12	0,0002	0,006
Incorporados en la biota. ¹	1,12	0,0001	0,003
Total de agua	1.386.000	100	
Total de agua dulce	35.029		100

El agua es el principal catalizador de las reacciones y recristalización de los materiales existentes. La dinámica y distribución de las aguas subterráneas desempeñan un trabajo geológico clave, ya que la presencia del agua causa degradación de materiales, ejerce acciones mecánicas que destruyen el

¹ Los pantanos, humedales y el agua incorporados en la biota son a menudo una mezcla de agua dulce y salada.

equilibrio de macizos naturales o artificiales, tiene la capacidad de disolver los minerales de una roca y redistribuir las cantidades de masa disueltas.

La ciencia que trata de las aguas terrestres se denomina *hidrología*, su campo comprende la circulación y distribución del agua en el globo, sus propiedades físicas, químicas y sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción humana”. [5]

De acuerdo con lo anterior, la *hidrogeología* o también *geohidrología*, en la actualidad se acepta como hidrología subterránea, definida como “aquella parte de la hidrología que estudia el almacenamiento, la circulación y la distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y sus reacciones a la acción humana”.

Pocas tareas hay tan difíciles en la hidrogeología como elegir con acierto el emplazamiento de los pozos en formaciones ígneas y metamórficas. Los cambios bruscos que pueden presentarse en la litología y en la estructura de estos terrenos dificultan la prospección hidrogeológica. Además las pequeñas fracturas, que son en este tipo de rocas las que proporcionan el caudal en los pozos, no son fácilmente detectables por técnicas geofísicas normales. Las muestras de rocas metamórficas² y plutónicas³ no alteradas presentan siempre una porosidad total inferior al 3%. Las permeabilidades son tan pequeñas que pueden considerarse como nulas desde el punto de vista práctico. Sin embargo a través de fracturas y zonas descompuestas pueden desarrollarse considerables porosidades y permeabilidades, la permeabilidad de campo en este tipo de rocas puede ser del orden de 1000 veces la permeabilidad medida en el laboratorio. Las permeabilidades debidas al fracturamiento de rocas no alteradas oscilan a partir de una cierta profundidad, entre 0.001 m/día y 10 m/día. La meteorización química de las rocas cristalinas produce el llamado saprolito, con porosidades que pueden variar entre 40 - 50 %. Este material funciona como un embalse subterráneo, almacenando el agua infiltrada, y alimentando el caudal que circula por fisuras y fracturas en este tipo de rocas.

En una misma región puede existir diferencias de caudales de un punto a otro, que posiblemente se relacionadas más al grado de alteración y fracturación que a las diferencias de composición mineralógica y

²que se forman a partir de otras rocas mediante un proceso llamado metamorfismo.

³que se forman a partir de un enfriamiento lento, a gran profundidad y en grandes masas del magma. Durante su formación el enfriamiento es muy lento, permitiendo así el crecimiento de grandes cristales de minerales puros y resultando una textura heterogénea, granulosa. En términos cuantitativos, las rocas plutónicas son las más importantes. Dominan abrumadoramente la composición de la Tierra, estando constituido por ellas la totalidad del manto terrestre y la mayor parte del volumen de la corteza. El resto de las rocas forma sólo un recubrimiento en la corteza superficial -rocas ígneas volcánicas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas.

textura. Los mayores caudales corresponden a rocas carbonatadas, donde la circulación del agua tiende a ensanchar las fracturas por disolución de los cristales de calcita y dolomita.

Un mismo tipo de roca puede proporcionar caudales diferentes aún en la misma unidad geológica. Se obtienen por lo general mayores caudales en climas húmedos que en climas secos por razones obvias de recarga. Se ha comprobado que la topografía en las regiones de rocas metamórficas y plutónicas es un factor importante por considerar en los trabajos de prospección. La ausencia de aguas subterráneas en las pendientes escarpadas o cerca de ellas se explica por el hecho de que en estas zonas la erosión ha barrido gran parte de la superficie de alteración, quitándole así parte de sus niveles porosos y permeables.

En general la calidad del agua subterránea suele ser excelente. Se encuentran excepciones en el caso de regiones áridas donde puede haber concentración de sales, por efecto de la evaporación, y en lugares donde el agua salada ha emigrado hacia el interior de las fracturas.

La contaminación biológica del agua subterránea constituye un problema en zonas donde el suelo que recubre las formaciones acuíferas tiene poco espesor o está ausente. A pesar de que las fracturas pueden tener frecuentemente espesores menores de 1 mm, los organismos patógenos se desplazan en estos acuíferos con una facilidad mayor que en los acuíferos aluviales normales.

Las rocas volcánicas que se cristalizan en la superficie producen altas porosidades asociadas con flujos de lava y piroclastos. Las cenizas volcánicas tiene porosidades altas, lo que las convierte en zonas importantes para la recarga de los acuíferos.

1.1. Descripción del Movimiento del Agua.

El agua que se encuentra en la atmósfera en forma de vapor se condensa en nubes, las cuales originan las precipitaciones (P) en forma de nieve, lluvia o granizo. Una parte de dichas precipitaciones se evapora nuevamente antes de llegar a la superficie del suelo y la otra cae al suelo por la acción de la gravedad. De esta última, una parte es interceptada por la vegetación o por otras superficies y luego se evapora. La otra parte entra en contacto directo con el suelo o con cuerpos de agua (ríos, lagos y mares). Aquella que cae al suelo puede alimentar la red hidrográfica directamente (lo que se conoce como escorrentía superficial), almacenarse en algunas partes de la superficie (almacenamiento superficial) o penetrar en el suelo y subsuelo (infiltración) alimentando así las reservas de las capas acuíferas. En la figura 1.1 se presenta una esquematización del ciclo hidrológico.

Las fuentes principales de energía que mueven el ciclo del agua a través de sus diferentes fases son la *energía calorífica* proveniente del sol y la *energía gravitacional*. La energía solar evapora parte del agua que está en las superficies. De igual manera una parte del agua que está en la zona no-saturada del suelo se evapora directamente o se absorbe por las plantas, las cuales a su vez la devuelven a la atmósfera en forma de vapor mediante el mecanismo de transpiración. Estos fenómenos son generalmente designados con el término de *evapotranspiración*.



Figura 1.1. Ciclo hidrológico mostrando las fases: Precipitación (P), Evapotranspiración (ET), Escorrentía Superficial (ESD), Infiltración (I).

El agua que se ha infiltrado en las zonas más profundas de la corteza terrestre, y que alimenta las capas acuíferas, puede alcanzar más profundidad o pasar a alimentar el flujo de los ríos o mares a causa de la percolación (paso lento de fluidos a través de los materiales porosos), donde se inicia nuevamente el ciclo.

Puede verse cómo el ciclo del agua tiene lugar en tres medios diferentes: la atmósfera, la superficie del suelo y el subsuelo. Estos tres niveles definen a su vez tres campos de estudio: la *hidrometeorología* o estudio de las aguas atmosféricas, la *hidrología de superficie* y la *hidrología subterránea* (hidrogeología), todos ellos fuertemente relacionados.

1.2. Orígenes del Agua Subterránea

Además del ciclo del agua ya descrito, las aguas subterráneas pueden tener otros orígenes. No siempre los límites geográficos de la cuenca hidrográfica son los límites de los acuíferos y hay que tener en cuenta los posibles aportes o pérdidas hacia las capas profundas. Sin embargo, para estas capas el ciclo hidrológico es mucho más largo que para las capas acuíferas superficiales y no está ligado por lo tanto al

ritmo climático. Ese ciclo hidrológico es de orden geológico (de algunos milenios a centenas de miles de años).

Las aguas subterráneas originadas en el ciclo del agua se denominan aguas vadasas o meteóricas, las otras se denominan de acuerdo a su origen:

- "Precipitaciones ocultas" son aguas que provienen de la condensación del vapor de agua atmosférica en los poros del suelo.
- Aguas juveniles, que son aquellas de origen profundo, como es el caso de un magma granítico que al enfriarse expulsa un pequeño volumen de agua. Estas aguas provienen del interior de la Tierra y nunca han estado en contacto con la superficie.
- Aguas fósiles, que son aguas vadasas atrapadas en el terreno y que permanecen en él durante miles de años, es el caso de las aguas en el Sahara que se estima entraron al acuífero hace 300.000 ó 400.000 años.
- Aguas geotermales, que son aguas vadasas que siguen un camino complicado, calentándose en las zonas profundas y volviendo a subir a la superficie.
- Aguas marinas, que son las aguas del mar que han invadido recientemente los sedimentos costeros.

1.3. La Geología Relacionada con la Ocurrencia y Movimiento de las Aguas Subterráneas.

Se denomina acuífero a aquellas formaciones geológicas que almacenan y liberan agua, con la particularidad del carácter móvil (circulación) y renovable de las aguas que llegan y saturan el medio permeable, y de donde son extraídas. Los acuíferos pueden presentarse en cuatro distintas formaciones geológicas:

- ✓ Depósitos de gravas y arenas no consolidadas, intercalados frecuentemente con estratos de limos⁴ y arcillas, con pocas unidades de carbonatos.
- ✓ Formaciones consolidadas y semiconsolidadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidades primarias (intergranulares) y secundarias (fracturas y diaclasas).
- ✓ Formaciones carbonatadas que tienen fisuras y fracturas, que pueden ensancharse por disolución. Tienen porosidades y permeabilidades primarias muy pequeñas.
- ✓ Rocas ígneas y metamórficas con fisuras y fracturas que permiten el almacenamiento y circulación del agua.

⁴Material suelto con una granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla.

Los acuíferos son sistemas que poseen un cierto funcionamiento, que dependen de ciertas características fundamentales o parámetros, que permiten definir su funcionamiento frente a unas determinadas acciones exteriores. Estos parámetros son: *la porosidad, la permeabilidad y la transmisividad*.

➤ **Porosidad:** La porosidad de un terreno se define como la relación (%) entre el volumen de huecos y el volumen total del terreno que los contiene, su expresión matemática es de la forma:

$$P = \frac{V_h}{V_T} \times 100 \quad (1)$$

La porosidad depende de un gran número de factores, entre los que cabe destacar: La naturaleza del terreno, la uniformidad granulométrica de sus componentes, la disposición y forma de las partículas, el grado de cementación o compactación, los efectos de la fisuración, disolución y meteorización.

Los huecos o intersticios del terreno se clasifican en dos grandes grupos: *Primarios*, originados al mismo tiempo que se formaron las rocas que los contienen. *Secundarios*, producidos posteriormente por fracturación o por disolución. Por lo tanto hay dos tipos de porosidades: porosidad primaria u originaria y porosidad adquirida o secundaria.

La porosidad total depende de los siguientes factores principales:

- La forma de los granos, que determina la forma y dimensiones de los poros, por ejemplo un suelo con granos circulares tiene menor porosidad que uno con granos irregulares.
- La ubicación de los granos, por ejemplo, para el caso de granos esféricos existen varios tipos de arreglos posibles, los cuales afectan de forma directa la porosidad.
- La granulometría. Mientras más uniforme la granulometría, mayor es la porosidad, esto debido a que en los suelos con granulometría heterogénea los granos pequeños tienden a llenar los vacíos que quedan entre los granos de mayor tamaño.
- El grado de compactación, ya que con mayor compactación se puede reducir el volumen de poros y la interconexión entre ellos.

La forma de los granos se puede determinar en el laboratorio con la ayuda de microscopía y la granulometría por medio del análisis granulométrico, pero la ubicación de los granos es difícil de determinar ya que al extraer una muestra es perturbada.

La porosidad de las rocas no compactadas varía entre un 5 y un 40%, siendo el más común el 15%. Una porosidad mayor a 20% se puede considerar grande, entre el 5% y el 20% es mediana, y menor a 5 % es pequeña.

➤ **Permeabilidad:** Es la capacidad de un terreno de permitir la circulación del agua cuando pasa por dicho terreno. La permeabilidad es el factor más importante de las rocas en relación con la explotación de las aguas subterráneas. Depende del tamaño de los huecos interconectados (poros, fracturas, etc.), la granulometría de las partículas rocosas, la naturaleza y rugosidad de la superficie de estas partículas y la dirección dentro del terreno (anisotropía). Puesto que el agua subterránea es contenida y conducida por los huecos que presenta el terreno, la forma y las características de ellos influirán de un modo fundamental en el comportamiento de la permeabilidad: los materiales granulares bien clasificados (gravas y arenas) tienen una elevada porosidad y permeabilidad, en cambio, en las arcillas y los limos, el agua se adosa a los diminutos poros por atracción iónica y queda retenida, es decir, son rocas muy porosas pero resultan impermeables. En la tabla 1.2 se resume la información relacionando el tipo de formación geológica con el tipo de acuífero.

Tabla 1.2 Formación geológica vs Tipo de acuífero.

Clasificación Geológica	Gravas Limpias	Gravas y arenas gruesas	Arenas Finas	Limos	Arcillas
Clasificación Hidrogeológica	Buen Acuífero	Buen Acuífero	Acuífero Pobre	Acuitardo ⁵	Impermeable

➤ **Transmisividad:** La transmisividad se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho la unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado de agua, bajo un gradiente hidráulico unidad y a una temperatura fija determinada [6]. Si E es el espesor saturado de la formación permeable, la transmisividad es igual al producto de la permeabilidad por dicho espesor:

$$T = P (E) \quad (2)$$

⁵Es una formación geológica semipermeable, que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, sin embargo bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la transmisividad tiene más importancia que la permeabilidad, porque así como (P) es una característica constante del terreno que deja pasar el agua, (lo que no implica que la contenga), (T) depende de la altura o espesor del manto acuífero saturado.

1.4. Tipos de Acuíferos.

La porosidad es el parámetro que determina la capacidad de almacenamiento y la habilidad del agua para circular bajo la acción de la gravedad.

De acuerdo con lo anterior se pueden definir los siguientes conceptos:

- **Acuíferos:** Son formaciones geológicas que almacenan agua y permiten el movimiento de esta bajo la acción de la fuerza de gravedad, pudiendo ser explotada con relativa facilidad.
- **Acuicludos:** Estas formaciones albergan agua pero no la transmiten con facilidad.
- **Acuitardos:** Almacenan agua pero la transmiten de forma lenta en comparación con los acuíferos. Cuando dos acuíferos se encuentran separados por un acuitardo, puede haber paso de agua de un acuífero a otro, ya que los acuitardos pueden transmitir grandes cantidades de agua a pesar de la baja velocidad de flujo.
- **Acuífugos:** Son formaciones impermeables que no almacenan ni transmiten agua.

Según las condiciones de presión hidrostática a las que está sometida el agua de un acuífero, su posición estratigráfica se pueden clasificar en diferentes grupos: *Acuíferos libres* o *no confinados*, que presentan una superficie libre en contacto directo con la atmósfera, también denominada superficie freática o tabla de agua. *Acuíferos cautivos*, *confinados* o *artesianos*, en estos el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica, son formaciones permeables limitadas por capas impermeables y son las formaciones de interés en la explotación de aguas subterráneas. *Acuíferos semi-confinados*, que se encuentran saturados de agua, y están limitados por el techo, por la base o por ambos por una formación semipermeable, lo que permite que haya flujo entre acuíferos (con acuitardos entre ellos) dependiendo de la diferencia de los niveles piezométricos que los separa [7].



CAPÍTULO II: Explotación del agua subterránea en el departamento del Cauca, Diagnóstico Preliminar

El Departamento del Cauca esta localizado en el suroccidente de Colombia entre la Costa del Pacífico, el Alto Valle del Magdalena y el Piedemonte Amazónico. Sus fronteras abarcan la llanura del Pacífico, la depresión de los ríos Cauca y Patía, una sección del piedemonte amazónico llamado Bota Caucana y el Macizo Colombiano, origen de las cordilleras central y occidental y de los ríos Cauca, Patía, Magdalena y Caqueta.

La configuración geomorfológica del territorio le determina características físicas⁶ y bióticas⁷ asociadas a los diferentes pisos térmicos que van desde los 0 msnm hasta los 5655 msnm (en el parque nacional nevado del Huila). Lo anterior da como resultado una gran diversidad de flora y fauna e importante riqueza hídrica.

Dada la complejidad geológica y ambiental del departamento del Cauca, en especial en la región Andina, es muy poco lo que se conoce de los recursos hidrogeológicos, sobre todo de las reservas existentes y de la disponibilidad de aguas subterráneas. En este capítulo se describe la geología y la hidrogeología del Departamento del Cauca. De acuerdo con lo expuesto en el capítulo I, la descripción del tipo de terreno permite concluir sobre su porosidad, permeabilidad y transmisividad, características fundamentales en la definición de un buen acuífero, por lo tanto, el reconocimiento del mapa geológico se convierte en la herramienta para un primer diagnóstico del departamento como potencial fuente de aguas subterráneas.

2.1. Hidrogeología en el Departamento del Cauca

La geología es la ciencia que estudia la Tierra en cuanto a su origen, estructura, composición química, mineral y las rocas que la conforman; estudia además las estructuras de la corteza terrestre y su evolución a través del tiempo. De acuerdo con su origen, las rocas se clasifican en tres grandes grupos

- Rocas Igneas.
- Rocas sedimentarias.
- Rocas metamórficas.

El relieve actual del departamento del Cauca es el resultado de la combinación de eventos orogénicos⁸ y procesos tectónicos que produjeron el levantamiento de la cordillera de los Andes como resultado del choque entre las placas de Nazca y Suramericana.

⁶ Características físicas: corresponden al relieve, las aguas terrestres, el clima, la vegetación, la fauna y el suelo

⁷ Características bióticas: Se refieren a la flora, la fauna, los humanos de un lugar y sus interacciones.

⁸ Orogenia se refiere a las fuerzas y los acontecimientos que conducen a una gran deformación estructural de la litósfera de la Tierra debido al acoplamiento de las placas tectónicas, principal mecanismo por el que se forman las montañas.

La evolución geológica ha conformado en el departamento seis unidades geológicas y de relieve que lo seccionan, dándole características particulares a cada sección, así: la llanura del Pacífico e Isla Gorgona, la Cordillera Occidental, la depresión Intercordillerana Cauca- Patía, la Cordillera Central, la Cordilera Centro-Oriental o Macizo Colombiano y la Unidad amazónica. Debido a la diferencia entre secciones, la presencia y distribución de agua subterránea en cualquier región está determinada por las características geológicas. Sus límites, características físicas y geométricas se hallan determinados por la estructura geológica y la estratigrafía, como se evidencia en la figura 2.1.

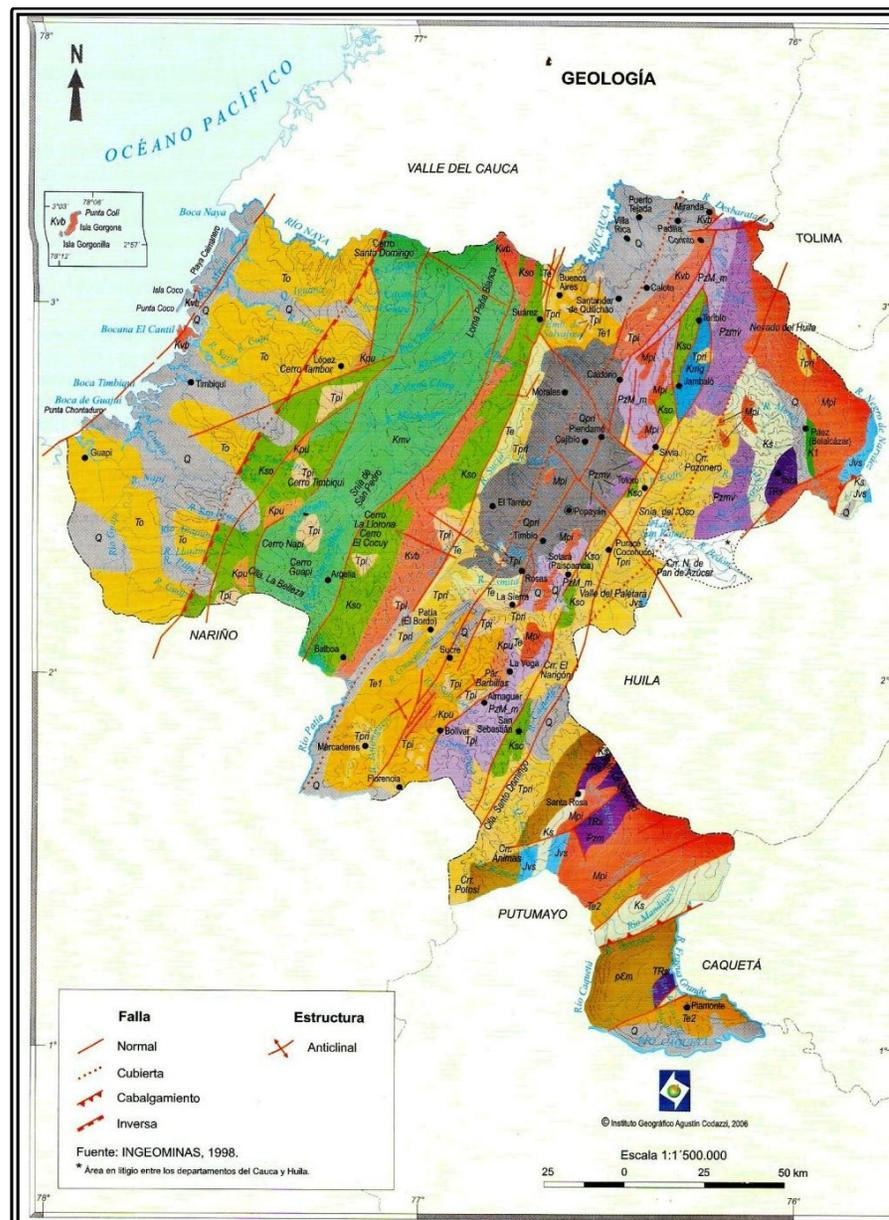


Figura 2.1. Geología del departamento del Cauca (IGAC 2006) [8].

Con base en las características litológicas de las diferentes formaciones geológicas, se pueden determinar la porosidad y la permeabilidad de las rocas, y las diferentes áreas de interés hidrogeológicas, como se observa en la figura 2.2.

La Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) [9] ha dividido el territorio nacional en 16 provincias hidrogeológicas, cuatro de las cuales atraviesan el Departamento del Cauca, ellas son:

- ✓ Provincia costera vertiente Pacífica o Tumaco
- ✓ Provincia Caguán-Putumayo
- ✓ Valle Alto del Magdalena
- ✓ Provincia Andina Cauca-Patía

En la figura 2.2 se puede observar las diferentes características hidrogeológicas que tiene el departamento. Lugares en los cuales puede haber o no un “almacenamiento” de agua. Siguiendo la información extraída de los mapas geológico (fig 2.1) e hidrogeológico (fig 2.2), se puede concluir la siguiente información

- La unidad del Pacífico y la provincia costera vertiente Pacífica o Tumaco comprendida entre el Piedemonte Occidental de la cordillera Occidental y el océano Pacífico. Esta provincia no tiene estudios hidrogeológicos, sin embargo por las características geológicas y los regímenes de lluvias, es previsible que hayan acuíferos libres y confinados ligados a sedimentos aluviales de los cauces bajos de los ríos Naya, San Juan de Micay y Guapi. Los depósitos aluviales y costeros del resto del litoral tienen acuíferos locales, algunos con agua salobre y de buena calidad química, con permeabilidades de moderada a baja. Se debe tener en cuenta que para la construcción de los pozos de aguas subterráneas se debe cumplir con dos condiciones, contar con agua limpia en la construcción del pozo (para no contaminarlo) y cuando ya está construido, contar con energía eléctrica para su funcionamiento, lo que es deficiente en dicho sector, debido a sus difíciles condiciones de acceso por ser zona selvática, siempreviva, baja población, razón por la cual las conexiones de la red eléctrica son pocas (casos urbanos) y de baja capacidad de potencia además de presencia de grupos armados al margen de la ley.

- La unidad geológica Amazonas y la provincia Caguán-Putumayo. Se extiende entre el piedemonte de la cordillera Centro-Oriental y el río Caquetá, conformada por diferentes niveles de depósitos aluviales, compuesto principalmente por rocas ígneas, metamórficas, sedimentarias, gravas, arenas y arcillas. De esta área no hay estudios hidrogeológicos, de parte de las autoridades nacionales y departamentales apenas se inicia un reconocimiento de estas zonas sumado a la falta de gremios agrícolas y pecuarios que

podrían de alguna forma acelerar este proceso también es una zona con difícil acceso y presencia de grupos armados; sin embargo por sus características geológicas y de alta precipitación es presumible que se encuentren acuíferos de tipo libre y confinado, ligados a rocas sedimentarias poco cementadas de ambiente continental con permeabilidades moderadas a bajas. Se considera que el agua es de regular calidad dado los altos contenidos de hierro en las rocas presentes en la región como las rocas calizas ferruginosas, que pueden causar diversos problemas de salud en su continuo consumo.



Figura 2.2 Hidrogeología en el departamento del Cauca (IGAC 2006) [8].

- Parte del Valle alto del Magdalena que geológicamente coincide en parte con el macizo colombiano. Se puede observar que por sus características geológicas se compone de rocas de diferentes orígenes, entre ellas rocas metamórficas, sedimentarias volcánicas, sedimentarias cementadas y fracturadas, se pueden encontrar acuíferos locales con una buena calidad química[8]. Esta zona no presenta estudios hidrogeológicos reportados por las entidades oficiales encargados de estos estudios.

- Depresión Intercordillerana Cauca-Patía y provincia Andina Cauca-Patía, entre los piedemontes de la cordillera Central y Occidental. Formada por una área plana en el sector norte que corresponde en parte al valle geográfico del río Cauca, con una altura promedio de 1000 msnm, con una planicie aluvial ligeramente ondulada, constituida por depósitos de origen fluvial no consolidado; hacia el centro esta conformada por el altiplano de Popayán a 1750 msnm y en el sector sur constituida por la cuenca del río Patía con alturas inferiores a los 500 msnm.

Su litología es predominantemente ígneo-metamórfica y representa diferentes etapas de la orogenia andina. En la provincia Andina Cauca-Patía se destaca el valle tectónico del Cauca, constituido por las subcuencas del Patía y del río Cauca. Este rasgo tectono-estratigráfico configura la provincia hidrogeológica del Cauca-Patía. Está principalmente constituida por sedimentos no consolidados y/o rocas sedimentarias poco consolidadas, con acuíferos locales de extensión variable, contenidos en rocas sedimentarias con granulometrías finas a media y con permeabilidad de alta a moderada. Las cuencas de los valles Cauca y Patía hacen parte de esta provincia. Además se encuentran acuíferos de tipo libre y confinado compuestos por un relleno aluvial de material grueso; rocas con porosidad primaria y secundaria con acuíferos locales de extensión variable contenidos en rocas volcánicas piroclásticas y en rocas sedimentarias cementadas y fracturadas con permeabilidad moderada a baja, y aguas tanto de buena como de regular calidad química; rocas y sedimentos constituidos por rocas metamórficas, plutonitas metamórficas y rocas piroclásticas. Estas unidades de rocas-sedimentos son impermeables y por consiguiente no son de interés hidrogeológico[10]. Si se tiene en cuenta las secciones (norte, centro, sur) en las cuales se divide esta zona (provincia Andina Cauca-Patía) se tiene lo siguiente:

El centro, que corresponde al altiplano de Popayán, se encuentra formado por capas de rocas volcánicas, ígneas y metamórficas que pueden alojar agua entre sus fracturas, sin embargo pueden no transmitirse con facilidad, razón por la cual no se registra hasta el momento en la zona un pozo al que se le haya legalizado su proceso de construcción y posterior explotación. Además el valle del altiplano de Popayán es un valle sedimentario bastante joven que ha entregado la mayoría de material al cauce de ríos que circulan

hacia zonas mas bajas, como el caso del valle del rio Cauca, el cual sí presenta características mas deseables para alojar acuíferos de buenas características.

El sur, en la cuenca del rio Patía se encuentran rocas que son predominantemente sedimentarias y volcano-sedimentarias, con aguas de buena calidad química, permeabilidad moderada a baja, en algunas partes acuíferos locales de extensión variable. En esta zona se encuentran siete pozos profundos en el municipio del Patía, utilizados en el sector agrícola con unos caudales entre los 3.72 L/s a 20 L/s

El norte o valle del río Cauca. Está constituido por una superficie plana o casi plana, formada por un relleno aluvial, por rocas principalmente volcánicas, afectadas por fallas de gran magnitud que reflejan su origen tectónico. En el borde de la cordillera Occidental afloran lavas y diabasas de la formación volcánica, combinadas con algunas formaciones de origen continental y marino. En el borde de la cordillera Central afloran lavas basálticas y formaciones sedimentarias. En el valle del río Cauca se identifican tres unidades de interés hidrogeológico (Unidad A, Unidad B y Unidad C) con recargas que se atribuyen a la precipitación (que en la zona alcanza un promedio de 1.500 mm), a la escorrentía superficial y a pérdidas por irrigación.

En esta sección de la depresión intercodillera y de la provincia Cauca Patía se encuentra la mayoría de pozos que posee el departamento del Cauca en los municipios de Caloto, Corinto Guachené, Miranda, Padilla, Puerto Tejada, Santander de Quilichao y Villarica, donde hay 201 pozos utilizados por el sector agrícola, agroindustrial e industrial, a su vez esta zona del departamento presenta algún tipo de tecnificación e industria, en lo referido a monocultivos como el de la caña de azúcar y caña panelera, la industria de alimentos, el papel, y los plásticos. En esos sitios se asentaron empresas por efectos de la Ley Paez. La proporción de mano de obra oriunda del norte del Cauca que labora en estas empresas está en el rango de los 65% a 70% [1]

- Zonas correspondientes a la cordillera Occidental y a la Cordillera Oriental. Estas regiones están compuestas por rocas volcánicas, ígneas y metamórficas. Se puede encontrar pequeñas zonas con acuíferos de permeabilidad moderada a baja y calidades de agua de buena a regular. Por las características de las rocas se pueden formar barreras impermeables que pueden corresponder principalmente a macizos de rocas cristalinas (ígneas, volcánicas), a altos estructurales o a sistemas de fallas que afectan la continuidad de las unidades regionales.

2.2 Diagnóstico Preliminar.

Teniendo en cuenta los datos de los mapas geológico e hidrogeológico, se puede apreciar que las zonas que pueden alojar gran cantidad de agua subterráneas son la zona norte, sobre el valle del río Cauca, y hacia el sur en el valle del río Patía o unidad geológica depresión intercordillerana Cauca-Patía, zonas que alojan los acuíferos con mejor cantidad de agua para explotación mediante pozos profundos.

Según datos de la CRC (Anexo 1) se puede verificar que las zonas anteriormente mencionadas son las únicas donde se han construido pozos para explotación de aguas subterráneas; la mayor parte de estos pozos se encuentran ubicados en el valle geográfico del río Cauca donde hay 201 pozos que son utilizados por diferentes sectores tales como industria (10 pozos), agroindustria (4 pozos) y uso agrícola (169 pozos). En el valle del río Patía hay 7 pozos en el municipio de Patía destinados al uso agrícola. En la tabla 2.1 se pueden observar los municipios donde se han construido pozos profundos para la obtención de agua subterránea, evidenciándose que todos los pozos perforados en el Cauca están sobre la provincia Andina Cauca-Patía, con una mayor presencia en el norte sobre el valle geográfico del río Cauca con 194 pozos, lo que representa el 96.52% de los pozos existentes en el departamento. Los restantes 7 pozos, que equivalen al 3.48%, se ubican sobre el valle del Patía (Figura 2.3). En la columna 3 de la tabla se relaciona la cantidad de agua que puede ser extraída de los pozos por municipio, mostrando el caudal total de todos los pozos ubicados en cada uno de los municipios; como se observa, Puerto Tejada y Miranda presentan mayor explotación del recurso y mayor perforación de pozos. En la columna 4 se hace un promedio del caudal de todos los pozos de cada municipio y la cantidad de pozos existentes en él, siendo que los mejores promedios se encuentran en Corinto y Puerto Tejada como se observa en la figura 2.4.

Tabla 2.1. Pozos de agua subterránea en el departamento del Cauca, caudal y promedio por municipio

MUNICIPIO	Cantidad de Pozos	Total (L/s)	Promedio (L/s)
Corinto	3	353,31	117,77
Villa Rica	9	507,00	56,33
Caloto	15	1136,24	81,16
Guachené	17	24,00	1,41
Padilla	21	1633,76	77,80
Santander de Quilichao	30	1234,60	41,15
Miranda	42	3457,23	82,31
Puerto Tejada	57	5497,30	96,44
Patía	7	92,74	13,25
TOTAL	201	13936,18	63,07

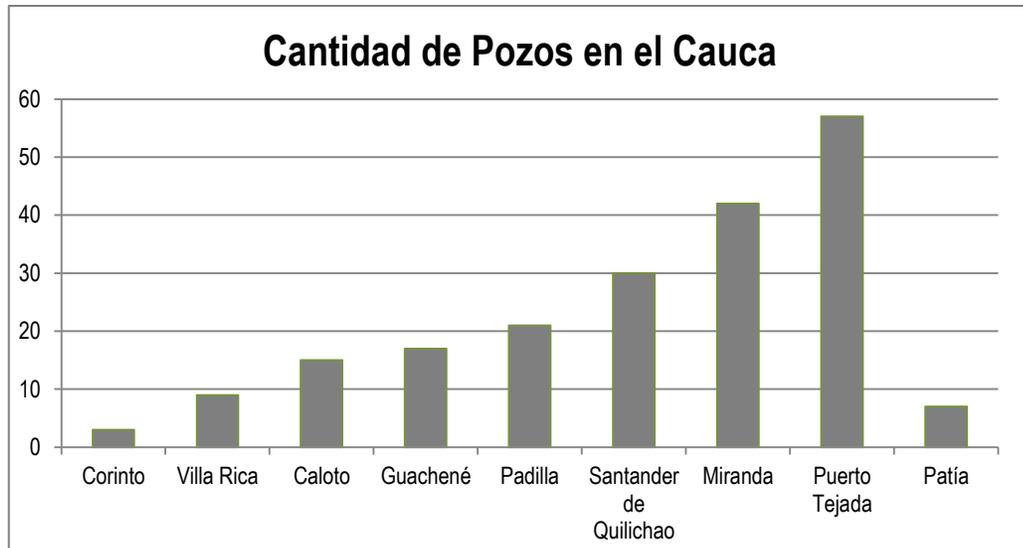


Figura 2.3 Cantidad de pozos en el Departamento del Cauca

Del anexo 1, los pozos registrados los que entregan mayor y menor flujo son los siguientes:

- Pozo en el municipio de Caloto, con un caudal de 220.82L/s, destinado a uso industrial.
- Pozo en el municipio de Puerto Tejada, con un caudal de 0.2L/s destinado a uso agrícola

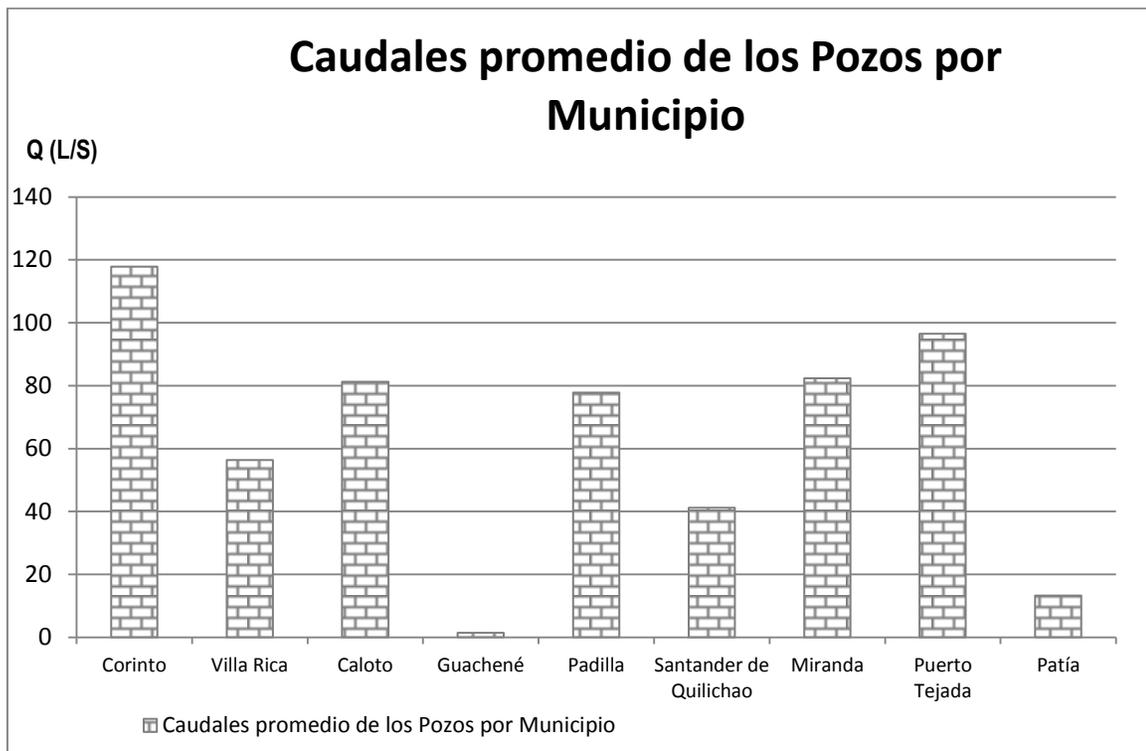


Figura 2.4. caudales promedio de los pozos por municipio

En regiones tales como la meseta de Popayán, las condiciones de la geología y de la hidrogeología permiten suponer que hay pequeños acuíferos con una poca recarga, lo que indica que los pozos en esta zona pueden llegar a tener un caudal bajo; la costa pacífica supone buenos acuíferos, pero las condiciones de la zona (accesibilidad, densidad de población, conflictos de violencia) mantienen la zona aislada lo que dificulta un desarrollo hídrico basado en la explotación de aguas subterráneas, un caso similar se da en el Macizo Colombiano; finalmente en la zona de la bota caucana se encuentra una región que presenta buenos acuíferos y con posibilidad de encontrar buena calidad de agua, pero el difícil acceso a la zona sumado a la presencia de actores armados, imposibilitan su explotación.



CAPITULO III: Estudios Preliminares a la Perforación de Pozos de Aguas Subterráneas.

Al ser el agua subterránea un recurso “invisible”, es necesario para su localización métodos de exploración dirigidos no solo a encontrar agua, sino también a obtener estimativos confiables sobre la cantidad y

calidad del recurso. Todo tipo de información geológica recogida durante la etapa de perforación de un pozo es necesaria tanto para su diseño como para la implementación de programas de manejo óptimo del agua subterránea. En el caso de un área donde ya exista este tipo de información, la fase de exploración consistirá en acoplar la información derivada de pozos cercanos, al sitio de interés.

3.1 Estudio Preliminar de la Zona.

Al iniciar la prospección se debe consultar la cartografía geológica de la zona que indica la naturaleza litológica de los diferentes afloramientos rocosos, así como sus características estratigráficas y estructurales. La interpretación del mapa geológico se basa fundamentalmente en la identificación de las formaciones rocosas permeables y de las impermeables, sus límites, las principales unidades hidrogeológicas, fracturas principales, zonas de recarga y descarga hidrológica, entre otros; con ayuda de un geólogo se pueden hacer los perfiles y cortes geológicos, los cuales son útiles para adquirir una visión adecuada de la posible geometría de los acuíferos, su espesor y situación del nivel piezométrico. Otra herramienta de gran utilidad son las fotografías aéreas que constituyen un excelente instrumento para la cartografía geológica, porque pone de relieve aspectos difíciles de ver sobre el propio terreno: grandes fracturas, zonas de drenaje, la red fluvial.

De acuerdo con lo anterior, los objetivos de una fase de exploración son: determinar la hidrogeología de la zona, estudiar la recarga en el área, detectar posibles problemas de calidad del agua y planear el trabajo de campo necesario. Para desarrollar estas etapas se requiere del mapa geológico de la zona, de los inventarios de pozos, de la ubicación de los puntos de agua (pozos, aljibes, el nivel freático, el sistema de flujo de agua, reconocimiento de unidades acuíferas, posibles zonas de recarga y descarga) y de balances hídricos preliminares.

3.2 Métodos geofísicos para la determinación de acuíferos:

La aplicación de la prospección geofísica ayuda a conocer la distribución de los materiales en el subsuelo así como su naturaleza, analizando la variación de las propiedades físicas de las rocas con la profundidad. Los métodos de prospección geofísica que se aplican en hidrogeología sirven de apoyo a los estudios geológicos para determinar la existencia y distribución aproximada del agua en los terrenos permeables. Los métodos geofísicos se pueden dividir en *métodos activos* y *métodos pasivos*; los métodos activos son aquellos donde se estimula de alguna forma al suelo y se mide la respuesta y el tiempo en obtener dicho resultado, es por ello que el tiempo es una variable en las ecuaciones de campo. A su vez, los métodos pasivos son aquellos que miden el efecto de una perturbación natural (como la fuerza de gravedad) o

artificial (medida de la resistividad eléctrica); para los métodos pasivos el tiempo de respuesta no es una variable.

Para aplicar los métodos geofísicos es necesario que se presenten dos condiciones:

- Que existan contrastes significativos, detectables y medibles(anomalías)
- Que los contrastes se puedan correlacionar con la constitución geológica del suelo. [11]

Los métodos geofísicos se usan para estimar la extensión y litología de rocas no consolidadas, la profundidad del nivel freático, la localización de fallas, la profundidad de las capas geológicas, la localización de acuíferos salobres y el espesor y la extensión de zonas acuíferas. La tabla 2.1 relaciona el método geofísico con el principio físico que lo rige.

Tabla 3.1 Contrates físicos medibles en los diferentes métodos geofísicos.

Métodos geofísicos	Contraste Físico	Principio
Resistividad eléctrica	Resistividad (arcilla vs arena)	<i>Ley de Ohm</i> $V=IR$
Refracción sísmica	Velocidad de ondas sísmicas (depósitos secos vs depósitos saturados)	<i>Ley de Snell</i> $\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r}$
Gravimetría	Densidad (relleno vs basamento)	<i>Ley de gravitación</i> $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

Se debe tener en cuenta las limitaciones de los métodos geofísicos debidas tanto a la presencia de ruido como a la falta de un contraste medible en algunos casos y a que no presentan una única solución. Esto hace que para un estudio en particular sea conveniente la utilización de múltiples métodos, pues uno sólo puede no dar resultados contundentes. A continuación se estudiarán los métodos geofísicos citados.

3.2.1 Resistividad eléctrica.

En prospección de aguas subterráneas se está interesado en distinguir las capas permeables (como las arenas) de las capas poco permeables o impermeables (arcillas y rocas ígneas); también se desea conocer la salinidad del agua subterránea, esto se puede determinar por el método de la resistividad eléctrica, siendo por esta razón el más utilizado en prospección de aguas subterráneas. Su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. El método consiste en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación, mediante otro par de electrodos, de la diferencia de potencial. La magnitud

de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada, basadas en la ley de Ohm dada por la ecuación (3.1)

$$V = IR \quad (3.1)$$

Ya que la resistencia eléctrica no solamente depende del material, sino también de su geometría, al aumentar la longitud y disminuir el área transversal la resistencia aumenta. Sin embargo se cuenta con una propiedad independiente de los factores geométricos que describe la “capacidad” del material para transmitir la corriente eléctrica. Esta propiedad es llamada *resistividad* y se denota por ρ y está dada por la ecuación (3.2) la situación se esquematiza en la figura 3.1.

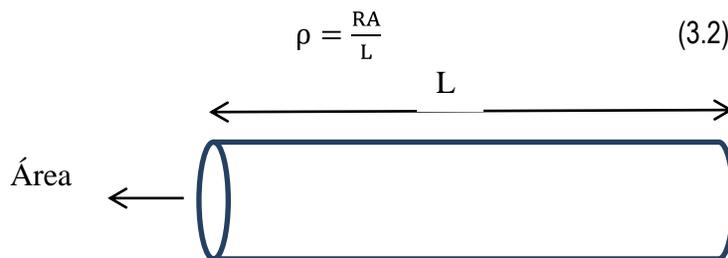


Figura 3.1 Material conductor de longitud L y área transversal A.

Los materiales en el subsuelo conducen la corriente eléctrica en forma iónica y electrónica; en el primer caso la conducción es a través de los fluidos contenidos en los poros de la roca, y en el segundo caso la conductividad se realiza por medio de los minerales metálicos presentes en el terreno. Normalmente se considera que la conducción eléctrica en el subsuelo es de manera iónica, por esta razón la resistividad depende de las condiciones físicas y químicas de las rocas encontradas en el subsuelo, como por ejemplo el grado de saturación, fracturamiento, porosidad, entre otras.

La resistividad de los metales a temperatura normal varía entre 10^{-8} y $10^{-7} \Omega m$. Son pocos y muy escasos los componentes de la corteza terrestre que posean conductividad metálica, entre ellos se cuentan los metales nativos (oro, plata, cobre, estaño). Los minerales semiconductores son muchos y de gran importancia práctica. Su resistividad depende de su contenido en impurezas, a veces en grado extremo, además su conductividad aumenta con la temperatura, por ello no se espera que la resistividad de una especie mineralógica determinada pueda dar como resultado un dato único, sino que puede variar dentro de límites amplios.

En general los telurios y los arseniuros son conductores muy buenos. Los sulfuros suelen entrar también entre los conductores buenos, con excepciones como la blenda y el cinabrio. Los óxidos, y los compuestos

de antimonio suelen ser malos conductores, con la excepción de la magnetita. Ahora bien, estos minerales no suelen aparecer en la naturaleza de forma individual, sino en asociaciones, y junto con una ganga frecuentemente aislante (cuarzo, calcita, etc.), por lo que la resistividad conjunta del filón puede variar mucho de unos casos a otros [12].

En los cuerpos dieléctricos o aislantes los electrones están fuertemente ligados. La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo. A temperaturas normales las resistividades son muy altas, generalmente superiores a $10^7 \Omega\text{m}$. Son minerales dieléctricos el azufre, la blenda, la calcita, el cinabrio, el cuarzo, las micas y el petróleo entre otros. Entre estos minerales, además, figuran los más importantes constituyentes de las rocas, las cuales se comportarían como aislantes si no fuera por la presencia de electrolitos.

El agua pura es muy poco conductora a causa de su muy reducida disociación. La resistividad del agua destilada es de unos $10^5 \Omega\text{m}$ por lo que puede considerarse como aislante. Sin embargo las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan conductividad apreciable, pues siempre tienen disuelta alguna sal, generalmente NaCl. Así, la resistividad de las aguas de lagos y arroyos de alta montaña varían entre $10^3 \Omega\text{m}$ y $3 \times 10^3 \Omega\text{m}$, las aguas subterráneas tienen resistividades de 1 a $20 \Omega\text{m}$, y las aguas marinas tienen una resistividad de unos $0,2 \Omega\text{m}$.

Si la resistividad de las rocas dependiera únicamente de los minerales constituyentes, se considerarían como aislantes. Sólo en el caso de que la roca tuviera minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora, es decir, sólo lo serían las menas metálicas. Afortunadamente, todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, dando como resultado que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos de resistividad muy variable según los casos. En resumen, la resistividad de las rocas puede variar en margen amplísimo en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros.

La resistividad de las rocas también depende de la temperatura a la que se encuentre ya que es un parámetro que influye notablemente en la resistividad de los fluidos que hay en los poros. En concreto, un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad. Por último, la resistividad de algunos minerales, y como consecuencia de las rocas que estos forman, varía según la dirección de medida que se toma, es decir, presentan anisotropía. La formación de estratos puede producir anisotropía, tal es el caso de las rocas sedimentarias. El que el suelo sea una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales

orgánicos e inorgánicos hace que la resistividad del suelo, aparte de depender de su composición intrínseca, dependa de otros factores externos como la temperatura, la humedad, presión, etc. que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo. De entre todos los factores, la humedad es el más importante, además es el que se puede alterar más fácilmente (lluvia o riego). Diferentes grados de humedad para un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevar a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo.

Otra limitación del método resistivo es su alta sensibilidad a pequeñas variaciones de la conductividad cerca de la superficie debido por ejemplo al contenido de humedad. Hablando en términos electrónicos, el nivel de ruido es alto. Una topografía accidentada puede tener un efecto similar, ya que el flujo de corriente se concentra en los valles y se dispersa en las colinas. Como resultado se distorsionan las superficies equipotenciales produciendo falsas anomalías.

Si se instala en el terreno el dispositivo mostrado por la figura 3.2, donde la corriente eléctrica se introduce en el suelo por medio de electrodos de corriente y se mide la diferencia de potencial entre otros dos electrodos, con las ecuaciones (3.1) y (3.2) se tiene que:

$$\rho = \frac{AV}{LI} \quad (3.3)$$

O, escrito de otra forma

$$\rho = K \frac{V}{I} \quad (3.4)$$

Donde K (A/L) depende de las distancias entre los electrodos o dispositivo electródico. La disposición de los electrodos se hace de dos formas, mediante el dispositivo Wenner y el dispositivo Schlumberger. Ambos dispositivos son rectilíneos, con cuatro electrodos alineados con un centro común, a una misma profundidad de penetración. Las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos.

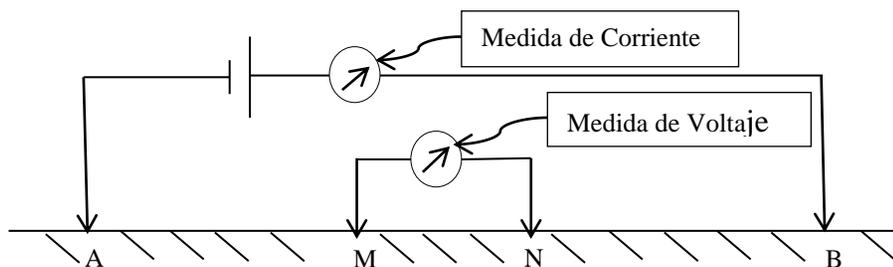


Figura 3.2. Alineamiento de los cuatro electrodos (AB – MN).

Sin embargo existen dos diferencias esenciales entre estos dispositivos: en el dispositivo Schlumberger, la distancia entre los electrodos de potencial MN es pequeña, siempre MN es la quinta parte de AB. En el dispositivo Wenner siempre MN es la tercera parte de AB.

Al efectuar un sondeo eléctrico vertical con el dispositivo Schlumberger, los electrodos de potencial se cambian de lugar sólo algunas veces, mientras que en el Wenner se cambian los electrodos M y N después de cada lectura. La figura 3.3 muestra la disposición de los electrodos para este tipo de arreglos.

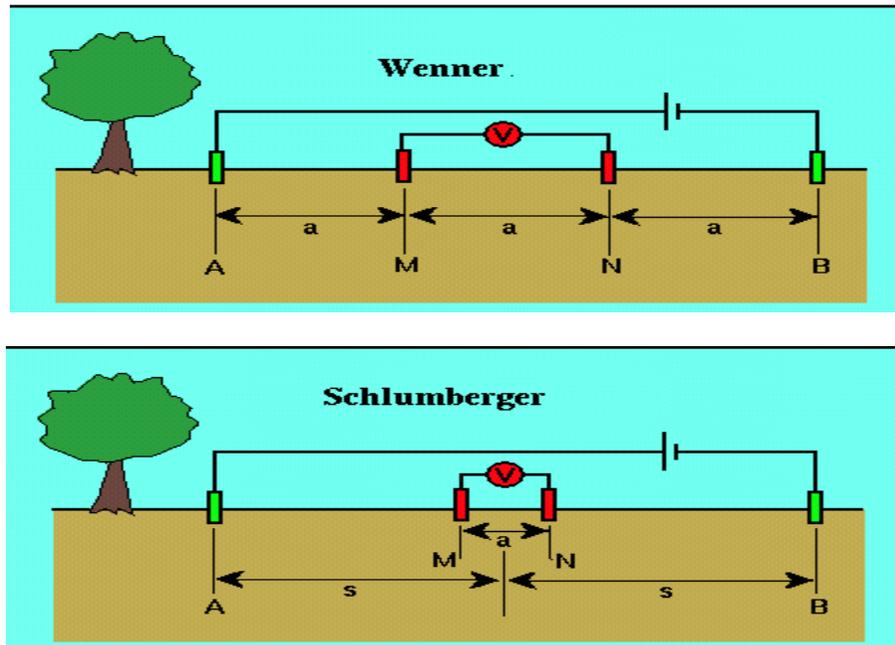


Figura 3.3. Disposición de los electrodos por el método de Wenner y por el método de Schlumberger.

Con los valores de voltaje, intensidad de corriente y el factor geométrico (K), se calcula la resistividad aparente. El equipo usado para obtener los datos consta de un generador de corriente directa o de baja frecuencia (transmisor), cables y unos electrodos de metal. El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos en A y B mientras que la medida del voltaje se toma entre dos electrodos en M y N. El receptor es ligero y tiene una pantalla en la cual se pueden ver las mediciones de los voltajes. El transmisor genera corriente continua y manda las lecturas de corriente a una pantalla. La interpretación se hace con base en las variaciones de la resistividad con la profundidad, empleando cualquiera de los arreglos anteriormente mencionados (Schlumberger o Wenner). En la figura 3.4 se presenta un registro eléctrico típico que muestra la profundidad con respecto a la resistividad donde se puede observar si es resistividad normal corta NC, quiere decir que tiene una separación entre los electrodos de 16 in, si es resistividad normal larga NL, distancia de separación de 64 in. y la de punto único.

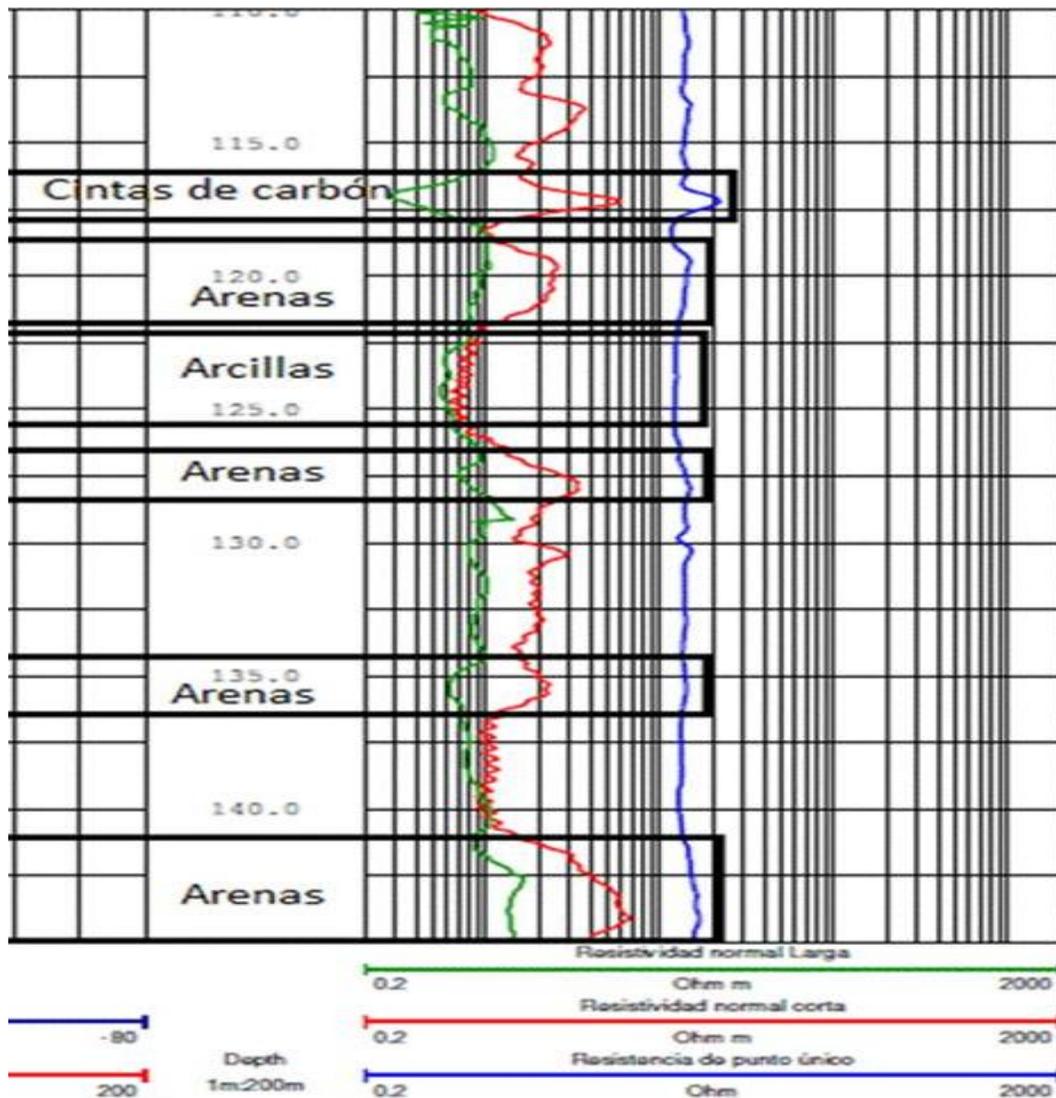


Figura 3.4. Registro electrico utilizando el metodo de Wenner-Schlumberger [13]

3.2.2 Refracción sísmica.

El método de refracción sísmica está basado en contrastes en la velocidad de propagación de ondas elásticas a través de las distintas rocas del subsuelo. Hay variaciones en velocidad entre sedimentos secos y saturados y entre rocas no consolidadas y consolidadas. La base del método es la ley de Snell dada por la ecuación (3.5).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} \quad (3.5)$$

Con V_1 y V_2 siendo las velocidades de onda incidente y refractada, respectivamente y θ_i , θ_r los ángulos que las ondas hacen con la superficie del suelo. Las velocidades se miden con el “geófono”, mediante el registro de tiempos de primeras llegadas de ondas. Estos tiempos se grafican contra la distancia como se muestra en la figura 3.5

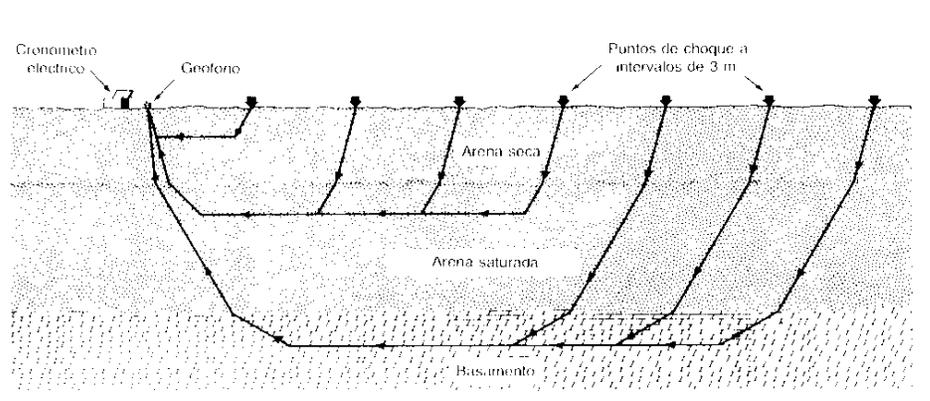


Figura 3.5. Propagación de ondas sísmicas.

La figura 2.6 muestra las trayectorias probables para el tiempo mínimo de recorrido, en la condición geológica supuesta. El impulso que llega primero desde el punto de impacto más cercano es el que pasa a través de la capa superior. La ruta más rápida para los impulsos provenientes de los puntos de impacto dos, tres y cuatro, es hacia abajo por el estrato superior, enseguida por el lado superior de la arena acuífera y luego hacia la superficie. Para analizar los resultados de un ensayo sísmico se llevan a una gráfica los tiempos de llegada de la primera onda de choque de cada uno de los puntos mencionados y sus respectivas distancias.

La refracción sísmica se puede aplicar para:

- Determinación del nivel freático en depósitos aluviales gruesos.
- Estimar la geometría de paleocauces y estructuras geológicas.
- Detección de fallas asociadas a características cársticas.
- Encontrar zonas de baja velocidad en las rocas, aptas para fundiciones de grandes estructuras, como presas.
- Estimar la porosidad con base en las velocidades de propagación de las ondas.

3.2.3 Gravimetría.

La aceleración de la gravedad varía levemente de un lugar a otro debido a las diferencias existentes entre la superficie y el centro de la Tierra y a las densidades diferentes de las rocas que componen la corteza

terrestre. Una técnica gravimétrica interesante es el estudio de las "anomalías gravimétricas", ya que aporta datos sobre el interior de la Tierra. El método estudia las anomalías de la gravedad en la superficie terrestre a fin de deducir zonas muy compactas e impermeables, con anomalías positivas, y zonas porosas o fracturadas permeables con anomalías negativas⁹ por defecto de masa. En geofísica el valor absoluto de la gravedad no tiene importancia, en su lugar, lo que importa son las variaciones relativas de este parámetro entre un punto determinado y otro tomado como referencia. Sin embargo en hidrogeología este método es muy poco empleado ya que la interpretación de los resultados es difícil y consume gran cantidad de tiempo, además de que se obtiene sólo información con un nivel bajo de precisión. Es útil para determinar la existencia de fallas importantes o de grandes cavidades kársticas saturadas de agua.

3.3 Métodos geológicos:

Como primer paso la persona que quiere hacer un pozo debe ser ayudado por un hidrogeólogo o un geólogo. Se debe consultar la cartografía geológica de la zona donde se indica la naturaleza litológica de los diferentes afloramientos rocosos, así como sus características estratigráficas y estructurales. La interpretación del mapa geológico se basará fundamentalmente en la identificación de las formaciones rocosas permeables e impermeables, sus límites, las principales unidades hidrogeológicas, fracturas principales, zonas de recarga y descarga hidrológica, etc. Después de tener en cuenta los datos anteriores se identifica si hay pozos en la zona o no.

Si en la zona no hay pozos se debe realizar una perforación inicial para obtener metro a metro información acerca de las características litológicas del terreno y confirmar y consolidar la información obtenido de los otros estudios para determinar la viabilidad de la extracción de agua y posterior perforación del pozo.

Si en el sitio hay presencia de pozos se inicia la perforación del pozo como tal, iniciando la toma de muestras metro a metro para obtener la información litológica del terreno. Con los datos de la información litológica y los sondeos de los métodos geofísicos, se hace una interpolación entre uno y otro dato para determinar en qué sitios están los acuíferos y formaciones rocosas, información que permite a su vez determinar la ubicación de los filtros y la bomba de succión. En la figura 3.6 se presenta las muestras de terreno tomadas en la perforación realizada por Colpозos en el ingenio Incauca (figura 3.6a) y en Tecnofar (3.6b).

⁹Una anomalía de la gravedad es la diferencia entre los valores calculados teóricamente y los reales medidos con el gravímetro en un punto, después de haber aplicado las correcciones necesarias. Las anomalías pueden ser positivas, cuando el valor medido supera al valor teórico calculado en presencia de un cuerpo de alta densidad, aumenta el valor de atracción; y negativas cuando el valor medido es inferior al valor teórico calculado en presencia de un cuerpo de baja densidad, disminuye el valor de atracción.



(a)



(b)

Figura 3.6 toma de muestras para la columna litológica tomadas por Colpozos (a) en ingenio Incauca, (b) en Tecnofar.

Las columnas estratigráficas o litológicas son representaciones gráficas, utilizadas en geología, de las variaciones verticales y los cambios horizontales que presentan los cuerpos rocosos, información que se obtiene con base en observaciones y mediciones, con diverso grado de detalle de sucesiones estratigráficas para describir la ubicación vertical de unidades de roca en un área específica. La representación gráfica tiene carácter cronológico y sentido reconstructivo de los sedimentos: una típica columna estratigráfica muestra una secuencia de rocas sedimentarias, con las rocas más antiguas en la parte inferior y las más recientes en la parte superior. Además, el estudio de los métodos geofísicos brinda gran ayuda para determinar los tipos de acuíferos y los lugares donde se pueden distribuir adecuadamente los materiales para la construcción del pozo. En la figura 3.7 se presentan las convenciones utilizadas en una columna estratigráfica y en la figura 3.8 se presenta una columna litológica. [14]

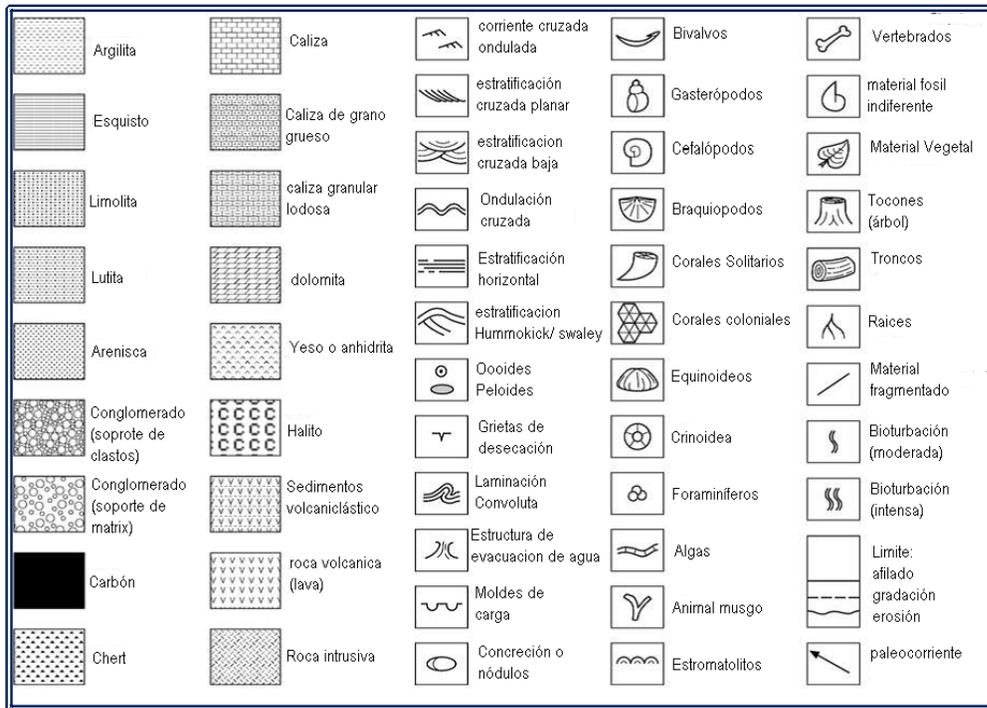


Figura 3.7. Símbolos y convenciones utilizados en las gráficas de columnas estratigráficas

3.4 Elección del sitio de construcción del pozo.

El agua subterránea es por lo general limpia y segura para su consumo. La empresa perforadora deberá elegir un sitio tal que sea el más alto posible respecto a la superficie para minimizar efectos de contaminación, además debe ser fácilmente accesible para reparaciones, limpieza, tratamiento sanitario e inspección. Para la determinación del sitio de perforación, el método y los procedimientos de desinfección, se deben considerarse los siguientes parámetros:

La hidrogeología local, pendiente del terreno, naturaleza del suelo y de los estratos subyacentes, espesor de la formación saturada, profundidad y pendiente del nivel freático; los detalles de construcción de pozos vecinos ya sea que estén en operación o abandonados; el área de recarga que contribuye al suministro de agua al acuífero; la naturaleza, distancia y dirección de las posibles fuentes de polución; los métodos usados para proteger el acuífero contra contaminación; la construcción del pozo: profundidad, diámetro y longitud del entubado. Tipo y localización de la formación sellante (cemento, bentonita); la protección superficial del pozo, incluyendo presencia de sellos sanitarios, protección contra erosión y contra animales; la capacidad de la bomba y nivel de bombeo.

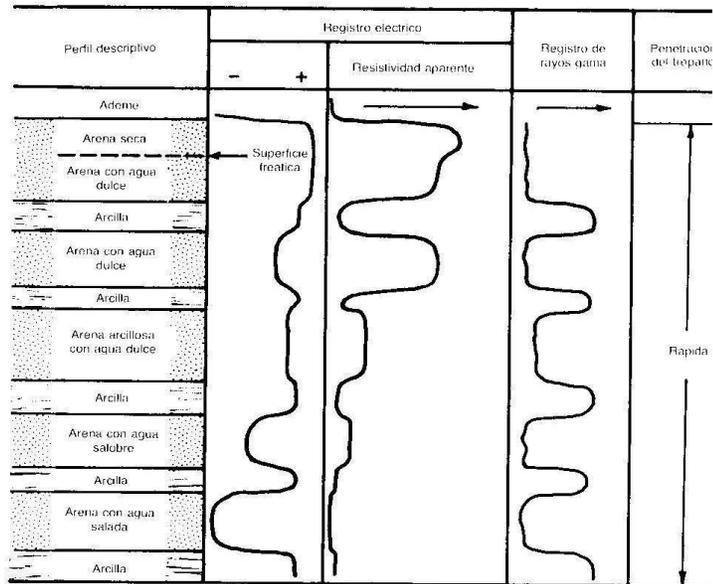


Figura 3.8.Columna litológica. Se observa un registro de un pozo. [15]

Las distancias mínimas de un pozo a cualquier fuente contaminante deben ser lo suficientemente grandes para asegurar que filtraciones o flujos subsuperficiales contaminados no alcancen el pozo. Se recomienda las siguientes distancias mínimas:

- 48 m de un área de almacenamiento, riego o preparación de químicos, o fertilizantes que puedan causar contaminación del agua o del suelo.
- 31 m de depósitos de desechos orgánicos animales.
- 16 m de tanques sépticos, gallineros, entre otros. Algunas Investigaciones recomiendan que la distancia mínima entre un tanque séptico y un pozo debe ser mayor de 31 m si el suelo es más grueso que arena fina y la velocidad es mayor de 0.01 m/día.
- la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR debe estar alejada de tal forma que no vaya a contaminar el pozo.



CAPITULO IV: Métodos de Perforación

De acuerdo con la información que arroja el método geoelectrico y las características y formaciones que circundan el sitio donde se realizará la excavación, se puede determinar cuál maquinaria y qué método de perforación es el más acertado. El proceso de construcción comprende la perforación, desarrollo, desinfección y limpieza del pozo y selección del equipo de bombeo.

En este capítulo se consigna información sobre el proceso de construcción de pozos y extracción de aguas subterráneas de acuerdo con lo investigado a partir de visitas técnicas realizadas a pozos en construcción y empresas constructoras que operan en la región del valle geográfico del río Cauca. Así, se inicia con el estudio de los sistemas de perforación, el proceso de construcción del sello sanitario, el tipo de bombas utilizadas para la extracción del agua subterránea, tuberías, filtros y proceso de perforación.

4.1 Métodos de perforación.

Según el tipo de roca que encontrada en la formación geológica, existen métodos de perforación que permiten un avance rápido, menos costoso y más seguro. El constructor elegirá el método dependiendo de la profundidad y el diámetro del pozo, del tipo de formación a ser penetrada, de los requerimientos sanitarios y del uso que vaya a dársele al pozo ya que no hay un único método que se pueda utilizar en todos los casos y para todas las condiciones geológicas. Una perforación exitosa depende de la experiencia y de buenas prácticas de ingeniería. A continuación se describen los principales métodos de perforación en la ejecución de pozos para la exploración y/o captación de agua subterránea:

- Perforación por rotación: circulación directa e inversa.
- Percusión
- Roto percusión

4.1.1 Perforación por rotación

Las técnicas de rotación usan circulación de fluidos con el objetivo de eliminar detritus. La maquinaria empleada en este tipo de perforación consta de una torre de perforación (figura 3.1), brocas de diferente calibre y forma, equipo de bombeo y tubería.

El fluido utilizado es una mezcla de bentonita¹⁰ y agua, conocido como lodo bentonítico. Los lodos bentoníticos tienen una propiedad muy importante que los hace muy útiles en construcción: cuando es

¹⁰La bentonita es una arcilla de grano muy fino que contiene hierro y sales básicas, utilizada en cerámica. Es una arcilla muy pegajosa con un alto grado de encogimiento y tiene tendencia a fracturarse durante la cocción y el enfriado. Por ese motivo no conviene trabajarla sola o como materia predominante de una masa. Su gran plasticidad puede servir de gran ayuda a cuerpos del tipo porcelana. También ayuda a la suspensión del barniz.

amasado sin que se produzca variación de agua, pierde resistencia mecánica, comportándose como un fluido. Sin embargo, vuelve a adquirir esta resistencia una vez que entra en reposo, lo que lo hace útil como película protectora de las paredes del pozo. A pesar de las ventajas del uso del fluido, su uso puede obstruir ciertas formaciones permeables, volviéndolas impermeables, lo que no es deseable para la extracción de aguas. De acuerdo con la dirección del flujo se determina el tipo de perforación específico: por rotación directa o por rotación inversa.



Figura 4.1. Torre de perforación utilizada por la empresa perforadora Colpozos.

➤ **Perforación por rotación directa.**

En este tipo de perforación el fluido es inyectado a través de las barras de acople de la broca, tal como se observa en la figura 4.2.

El lodo se prepara en la superficie y es bombeado por el interior de la tubería hasta llegar a la broca, retornando a la superficie arrastrando material triturado o cortado. Este método es similar al que utiliza la industria petrolera; es el más difundido y empleado, su mayor ventaja radica en la velocidad de avance.

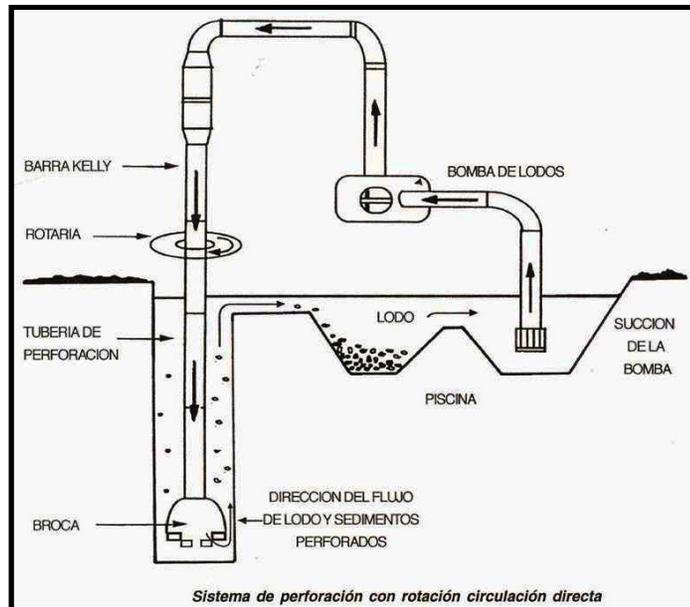


Figura 4.2. Perforación por circulación directa [16].

Los elementos fundamentales que intervienen en la perforación de un pozo a rotación con circulación directa son [17]:

- La columna o sarta de perforación.
- La máquina de perforar que, desde la superficie, proporciona, a la sarta el movimiento de giro y avance que se transmite a la broca.
- El fluido de perforación que, en general, es un lodo bentonítico, con ciertos aditivos para adecuar sus características a las necesidades de la perforación

El tipo de broca generalmente usado en la perforación por circulación directa es la llamada broca tricónica. La función de la broca es triturar y despedazar la roca de la formación.

A su vez la función del lodo puede clasificarse de la siguiente manera:

- Recoger todos los fragmentos de roca del fondo del pozo y llevarlos a la superficie.
- Soportar las paredes del pozo y prevenir su derrumbe.
- Refrigerar, limpiar y lubricar la broca.
- Sellar las paredes del pozo con el fin de evitar pérdidas de lodo.
- Lubricar la tubería de perforación y la bomba de lodos.

El método de perforación por circulación directa tiene una tasa de penetración relativamente alta sobre todos los tipos de materiales, siendo un método utilizado para perforar formaciones duras y formaciones

poco consolidadas. No obstante presenta algunas desventajas, tales como los costos de los equipos y debido a que la perforación se hace en terrenos de alta dureza, la broca es susceptible de cambiar su trayectoria de penetración, dificultándose la construcción de un pozo totalmente vertical.

Además de las dificultades citadas, uno de los mayores inconvenientes que presenta la rotación con circulación directa es la falta de representatividad de las muestras litológicas que se colectan en boca de pozo, ya que, por ser llevadas en forma ascendente por la inyección, contienen lodo bentonítico y sedimentos de capas superiores, lo que requiere que sean sometidas a un proceso de lavado, lo que a su vez requiere la existencia de una fuente de agua cercana.

➤ Perforación por Circulación Inversa

Quando el diámetro de una perforación es grande, la velocidad del lodo en el espacio anular, es decir, el comprendido entre la pared del varillaje y el terreno, resulta muy pequeña e insuficiente para elevar el detritus o ripio a la superficie, haciendo lenta y peligrosa la perforación. Por lo tanto se hace conveniente invertir el sentido de circulación del lodo, es decir, se le hace descender por el espacio anular y retornar por el interior del varillaje que. En esto consiste el método de perforación por circulación inversa. En la figura 4.3 se presenta un esquema del proceso de este método.

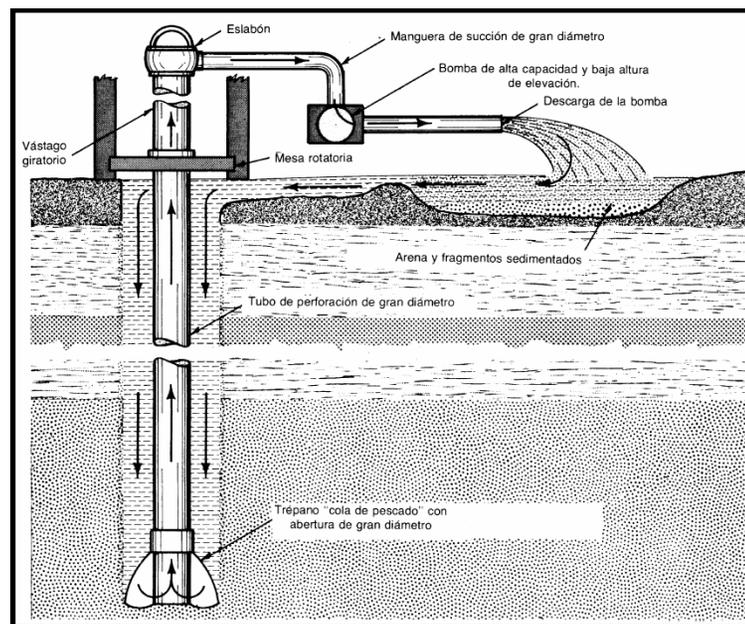


Figura 4.3. Perforación por circulación inversa

Las tres ventajas principales que se obtienen son [18]:

- Gran capacidad de extracción de detritus debido a la alta velocidad del lodo en el interior del varillaje.
- Baja velocidad de descenso del lodo por el anular, con mínimo efecto de erosión de las paredes del terreno, disminuida aún más por tratarse de lodo limpio, sin partículas de detritus.
- Posibilidad de emplear lodos de baja densidad y viscosidad, puesto que la capacidad de arrastre del detritus no es determinada por la densidad de los lodos, sino por su alta velocidad en el interior del varillaje. Con estos lodos ligeros, que pueden llegar a ser agua limpia, no se corre el riesgo de impermeabilizar acuíferos de poca potencia o escasa presión.

Este procedimiento de perforación debe utilizarse preferentemente para diámetros grandes, para formaciones poco definidas o blandas y en las que las pérdidas de agua o lodo sean pequeñas. La utilidad del método decrece a medida que la formación se aleja de estas condiciones ideales. Las brocas en este tipo de perforación difieren de las de la perforación rotatoria con circulación directa.

La empresa perforadora de pozos Colpozos, con sede en la ciudad de Santiago de Cali, tiene su zona de influencia principalmente en el valle geográfico del río Cauca, que presenta terrenos con características que se adaptan más al tipo de perforación de rotación por circulación directa. Los pozos que construyen tienen diferentes finalidades, desde aguas para uso farmacéutico hasta aguas para riego, lo que conlleva planear características diferentes tales como diámetro, profundidad.

4.1.2. Percusión.

La gente de la antigua China perforaba hace 1000 años pozos de hasta 900 m de profundidad para explotar sal. Con un hierro pesado de la forma de una pera golpeaban constantemente las rocas a perforar. Un poco de agua en el fondo del pozo se mezclaba con el polvo de roca y se extraía con baldes de tubo (ver Figura 4.4). Por lo anterior, el método de percusión se basa en la caída libre de un peso en sucesión de golpes rítmicos dados contra el fondo del pozo. La perforación a percusión con cable se basa en el golpeo con una pesada herramienta de corte (trépano) que se eleva con un cable y que cae por gravedad, fragmentando el suelo. Resulta evidente, por tanto, que los sondeos realizados por esta máquina deben ser verticales.

En la perforación a percusión pueden distinguirse dos tipos de terreno que condicionan el procedimiento a seguir. En formaciones rocosas consolidadas, la perforación puede hacerse sin necesidad de que el revestimiento siga inmediatamente al avance, y en muchos casos puede prescindirse totalmente de él. En formaciones granulares poco consolidadas, es preciso que el revestimiento siga al avance de la

perforación. Por esta razón este procedimiento es ventajoso en la perforación de rocas consolidadas, cuyas paredes se sostienen sin necesidad de inmediato revestimiento a medida que se avanza.

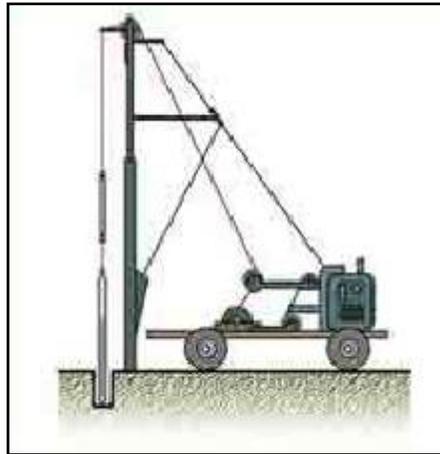


Figura 4.4. Esquema del Sistema de perforación de percusión.

En la figura 4.5 se presenta una fotografía del equipo utilizado en este método de perforación.



Figura 4.5. Equipo de percusión.

Los elementos fundamentales que intervienen en la realización de un pozo por este procedimiento son:

- *Columna o sarta de perforación*, formada por una serie de herramientas cuya disposición puede verse en la figura 4.6.
- *Sonda o máquina de perforación* que desde la superficie del terreno proporciona a la sarta (por medio de un balancín), el movimiento de vaivén, figura 4.6.

- *Broca o trépano*: es la herramienta que realiza el trabajo de rotura, disgregación y trituración de la roca. Su peso puede variar entre 100-500kg para pozos de pequeño y mediano diámetro y de 500-1200 kg para pozos de gran diámetro. Su función es penetrar, triturar, escariar y mezclar. Las características geométricas de un trépano deben ser función de la geología del sitio donde se realizará la perforación.
- *Barrón o barrena*: encima del trépano y enroscada a él, se coloca una barra cilíndrica, cuya doble función consiste en dotar a la sarta del peso necesario para la perforación y en servir de guía, dada su longitud, colaborando en forma importante al mantenimiento rectilíneo y vertical de la perforación. Su longitud varía entre 3-5 m y su peso entre 400 - 1000kg.
- *Cable*: A este elemento pende la sarta, a la que le comunica el movimiento de vaivén, que a su vez es transmitido al balancín de la sonda. Este cable está sometido a un duro trabajo debido a las tensiones alternantes que se producen al elevar y soltar la herramienta, así como por las continuas sacudidas al tensar.
- *Unidad de potencia*: consiste en un motor de combustión interna, preferentemente del tipo Diesel, por ser el más económico.[17]

El método de percusión por cable tiene varias ventajas sobre todo en terrenos de rocas fisuradas, para el que es el único aplicable. En sitios donde el agua para perforación sea escasa, este método ofrece ventajas, sin embargo, con este método se tienen algunas desventajas: tasas de perforación bajas, y a veces dificultades para extraer el entubado en algunas formaciones geológicas. Este método se recomienda en terrenos consolidados, para pozos de gran diámetro con profundidades de 250 a 300 m. En resumen las ventajas y desventajas de perforar con percusión son las siguientes:

- La mayoría de los equipos utilizados son pequeños, de relativo bajo costo y se pueden desplazar fácilmente aún en terrenos montañosos. Tienen unidades de potencia pequeñas que pueden ser a gasolina o diesel.
- Tienen costos de operación y mantenimiento bajos.
- Son pocos los accesorios y herramientas que se necesitan para este tipo de perforación.

4.1.3. Roto percusión.

Este sistema de perforación combina el efecto percusivo con la acción rotatoria de los equipos respectivos por medio de un martillo de percusión que se halla colocado en el extremo inferior de la tubería de

perforación (varillaje) el cual, al golpear el terreno sufre una rotación que maximiza el proceso de fractura y desprendimiento de material de roca.

Con este método se realiza la perforación mediante el movimiento alternativo (subida y bajada) de una masa pesada que en su caída y rotación va fracturando o disgregando la roca, desprendiendo de la misma, trozos de varios tamaños que después son extraídos por medio de una válvula o cuchara de limpieza.

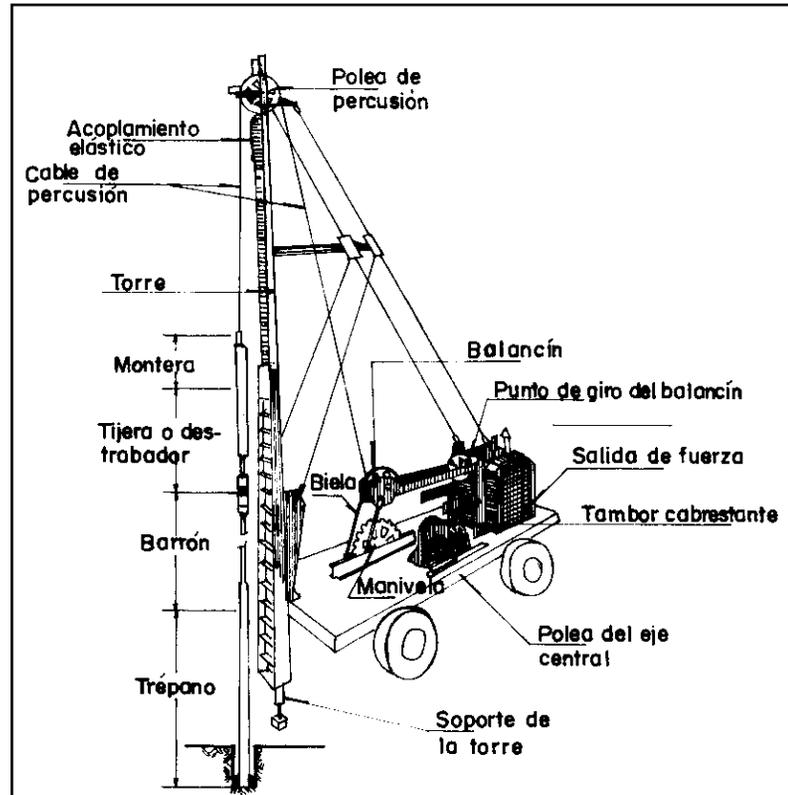


Figura 4.6. Esquema del sistema de roto percusión.

Este método de perforación es poco utilizado en ambientes con cobertura de sedimentos, debido a la lentitud en el avance y a la necesidad de emplear varios diámetros de cañería (entubamiento telescópico) cuando se superan 80 o 100 m de profundidad. En ciertos terrenos rara vez se superan 10 m de avance diario. Otra desventaja de la percusión a cable, es lo dificultoso que resulta la extracción de cañerías temporarias de encamisado, maniobra que requiere en muchos casos el empleo de criques de alta capacidad de tiraje. Este método fue desarrollado por los chinos, siendo el primero que se utilizó y su uso ha continuado hasta el presente.

Los materiales cortados, triturados o mezclados durante el proceso de la perforación se van acumulando en el fondo del pozo, hasta formar un colchón que impide el avance de las herramientas. Para extraer este material se usa la cuchara, que consiste en una pieza tubular con una válvula en un extremo y un travesaño en el otro. El procedimiento de extracción, llamado cuchareo, consiste en bajar la cuchara hasta el fondo del pozo y darle un movimiento leve de subida y bajada, lo que produce una acción de bombeo, que permite la entrada de detritos a través de la válvula interior de la cuchara.

4.2. Sello sanitario.

Los acuíferos profundos son susceptibles a contaminación por aguas que provengan de acuíferos más altos. Para protegerlos, uno de los pasos importantes en la construcción del pozo es la construcción de un sello sanitario.

El proceso parte de la ampliación de la entrada del pozo, creando un espacio anular donde se funde el llamado sello sanitario (ver figura 4.7); La profundidad del sello sanitario depende del uso que se le quiera dar al agua extraída. Para ejemplificar la situación, el pozo construido por la empresa Colpozos para la empresa Tecnofar (Villarrica-Cauca), tiene una profundidad aproximada de 30 m ya que el agua se utilizará para fines farmacéuticos, por lo que se requiere que tenga altas características de pureza, por lo tanto el sello sanitario debe cumplir una función de protección contra agentes externos; Por su parte, el pozo de la empresa Incauca (Corinto-Cauca), tiene un sello con una profundidad de aproximadamente 20 m, pues el destino del agua es riego de cultivos de caña de azúcar, por lo que obviamente requiere de menos protección que el de Tecnofar. Cabe destacar que para la profundidad del sello sanitario los constructores del pozo dan unas recomendaciones (datos de la columna litológica, sección 2.6 del capítulo 2), pero el veredicto final lo toma la Corporación Autónoma que determina hasta que profundidad debe ser el sello de acuerdo con las posibles fuentes de contaminación a las que está sometido el pozo.

De acuerdo con el proceso seguido por la constructora de pozos Colpozos en el pozo de Tecnofar, la perforación para el sello sanitario inicia con brocas pequeñas y muy fuertes (de 8 – 12 pulgadas). Se perfora hasta la profundidad a la que llegará el sello sanitario y se va ampliando el diámetro de perforación con brocas cada vez más grandes, hasta llegar a brocas alrededor de las 32 pulgadas.



Figura 4.7. Perforación inicial previa al sello sanitario.

Como paso siguiente, se recubren las paredes con una mezcla de arena y cemento (conocida como mortero) con un espesor de cuatro pulgadas, dejando un diámetro libre de trabajo de 24 pulgadas. Antes de continuar el proceso de construcción se debe dar un tiempo (alrededor de 48 horas) para que el sello fragüe, es decir, que la mezcla alcance la dureza requerida. Durante este proceso de fraguado el pozo se llena con arena para impedir que las paredes colapsen, siendo necesario retirar esta arena usando nuevamente el principio del método de perforación utilizado, es decir, circulación directa de lodos.

Todo el proceso de construcción del sello sanitario se hace en un tiempo de trabajo “normal”, es decir, en horarios diurnos. Otra cosa sucede con el proceso de perforación del pozo, en el que el trabajo debe ser continuo (día y noche) para evitar posibles contaminaciones de las fuentes profundas.

4.3. Proceso de perforación

El método de perforación seguido en la construcción del pozo de Tecnofar fue el de circulación directa. Como se mencionó en el ítem 3.1. En este método se ubica una torre de perforación en la boca del pozo. Posterior al sello, la perforación continúa con brocas pequeñas y medianas (16 pulgadas) hasta la profundidad requerida. En el paso siguiente se introduce la tubería, empezando por el tubo que quedará en el fondo del pozo, los diferentes tubos se van parando en la torre y se van soldando punta con punta tal como se observa en la figura 4.8.



Figura 4.8. Proceso de introducción de la tubería

Además de los tubos por los que circulará el agua, se ubican también tuberías ranuradas llamadas *filtros*, (ver figura 4.9), cuya finalidad es permitir el paso de aguas de depósitos subterráneos en contacto con las paredes del pozo.



Figura 4.9. Tubería ranurada o filtro.

Por lo anterior, la soldadura puede ser entre tubos o entre un tubo y un filtro. La ranura del filtro depende de la granulometría de la capa permeable, información obtenida a partir de la columna litológica, y corresponde con la profundidad a la que se ubique el filtro. La empresa Colpozos construye la tubería y los distintos tipos de filtros de acuerdo con los requerimientos de la zona.

4.4. Limpieza del pozo y prueba de bombeo

Después de que la tubería se encuentra enterrada, se rellena el diámetro restante con grava de una granulometría determinada de acuerdo con el diámetro del material más fino encontrado en las capas permeables de la columna litológica. La grava se va introduciendo usando un vibrador en el fondo del pozo

que permite que el material se ordene de forma ideal y que todo el espacio anular quede lleno de grava. Esta grava desempeñará el papel de pre-filtro para el agua que entra en el pozo.

Como paso siguiente se instala la bomba de succión (elegida de acuerdo con las especificaciones del pozo) y se hace el empotramiento de las tuberías de salida y de los medidores de flujo; antes de poner en funcionamiento el sistema se realiza un lavado interno del pozo, prendiendo e instantáneamente apagando el equipo, con el objetivo de que la bomba succión el agua e inmediatamente la suelte provocando que el agua desprenda, de las paredes, de la tubería y del pre-filtro, material no deseable. Luego se introduce al pozo un equipo llamado *hidrolavadora* que expulsa agua a muy alta presión hacia la tubería, desprendiendo el lodo que pueda haber quedado adherido a las paredes, a los pre-filtros de grava y a los filtros.

Una vez terminado estos procedimientos se pueden realizar las pruebas de bombeo finales, poniendo el sistema en funcionamiento por un periodo de tiempo de entre 30 a 50 horas. En estas pruebas interviene la corporación autónoma correspondiente, los usuarios y el constructor. Se pondrá en marcha la bomba a régimen máximo y se podrá probar la capacidad del acuífero para entregar agua a muy alta exigencia, se verificará que se esté extrayendo solo el agua requerida y la calidad de agua que está saliendo.

4.5. Herramientas y maquinarias

Como ya fue mencionado en el texto anterior, las herramientas básicas en el proceso de construcción de un pozo y extracción de aguas subterráneas son las brocas, la tubería y las bombas de succión. A continuación se detallan las características de estas herramientas haciendo énfasis en las utilizadas por la empresa constructora Colpozos.

✓ Brocas.

La broca es la herramienta que tiene contacto directo con la superficie del terreno. Su función es desprender y triturar el material geológico y darle forma al pozo. Dependiendo de las características del terreno, se utilizan diferentes tipos de brocas, tales como las tricónicas y las trepano. La empresa Colpozos utiliza en su método de perforación de rotación por circulación directa brocas tricónicas (ver figura 4.10). El nombre “tricónica” hace alusión al hecho de estar conformada por tres o más “conos” o cuchillas, fabricadas con acero al carbón, muchas veces con incrustaciones de diamante. Las brocas se limpian y lubrican con el lodo bentonítico que circula por el centro de la tubería al que se acopla la broca.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10. Brocas tricónicas de la empresa Colpozos: (a) de diferentes diámetros, (b) con acople al tubo, (c) vista frontal de los conos.

✓ **Tubos**

El tipo de tubería requerido en el proceso de perforación y construcción de pozos para la extracción de aguas subterráneas es de diferente tipo, ya que se requiere tubería para las brocas, que no se queda en el pozo y para la conformación del pozo, que a su vez es de dos tipos, tubería continua y tubería ranurada o filtro. La empresa Colpozos diseña y construye la tubería de acuerdo con los requerimientos de la obra. En la figura 4.11 se presenta una fotografía de los tubos utilizados para las brocas, para el agua y los filtros.

✓ **Bombas.**

Posterior al proceso de perforación, a la construcción del sello sanitario y a la instalación de la tubería con sus respectivos filtros, se procede a la instalación de la bomba de succión encargada de extraer el agua en la cantidad y presión requerida por el cliente, es decir, la bomba realizará el trabajo diario de entrega del agua, objetivo único de la construcción del pozo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.11. Tubería utilizada por la empresa perforadora Colpozos. (a) Tubería para broca; (b) Tubería mostrando la rosca para acoplar a la broca. (c) Filtros, (d) tubería de conformación del pozo.

Una bomba para pozos no profundos se instala en la superficie del terreno y su tubería de succión irá al interior del pozo, no obstante este tipo de bomba se puede instalar dependiendo de su capacidad de succión, sin importar la profundidad del pozo. Las bombas de pozo profundo se instalan dentro del pozo, de tal modo que la succión está sometida a presión positiva, lo que implica que la granada (boca de succión de la bomba) está sumergida por debajo del nivel de bombeo. En la figura 3.12 se muestra una fotografía de la instalación de una bomba de succión en un pozo construido por Colpozos.



Figura 4.12. instalación de una bomba dentro de un pozo de aguas subterráneas por Colpozos.

Para el bombeo de aguas subterráneas las bombas más frecuentemente utilizadas son las centrífugas, (ver figura 4.13). Existen muchas variantes en su diseño, originalmente eran instaladas en el terreno o en un lugar próximo a éste, para operar por succión; luego fueron adaptadas para colocarlas en los pozos bajo el agua, en un principio mediante largas extensiones del eje (dentro de cajones sumergidos) y posteriormente en la forma compacta que hoy se conoce con el nombre de *bomba turbina vertical*.

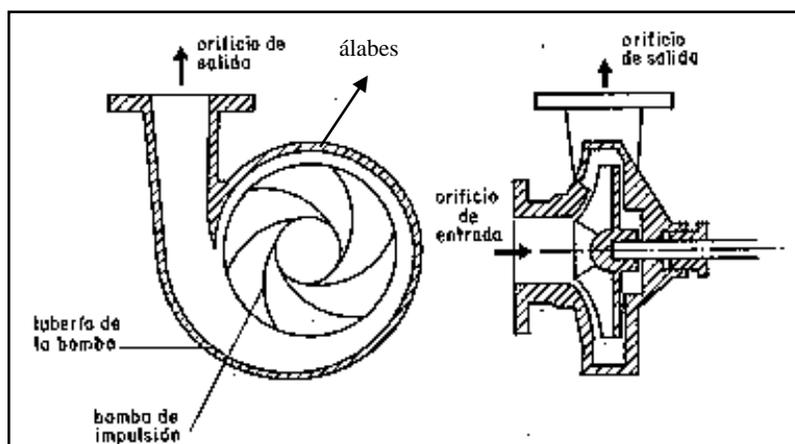


Figura 4.13 Corte frontal y lateral de una bomba centrífuga.

Las bombas más comúnmente utilizadas en los pozos profundos según su principio de funcionamiento y su lugar de ubicación son:

Bombas centrífugas tipo caracol.

También llamadas roto-dinámicas, utilizan la energía de un impulsor. El agua entra por el centro de la bomba de impulsión, que dispone de unos álabes para conducir el fluido que es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la tubería de la bomba, que por su forma lo conduce hacia el orificio de salida o hacia una siguiente bomba de impulsión; el papel de la bomba de impulsión es de comunicar energía al fluido en forma de energía cinética.

Bombas de Pistón.

Una bomba de pistones una bomba que genera movimiento mediante un pistón, tal como se muestra en la figura 4.14. Las bombas de pistón se emplean para el movimiento de fluidos a alta presión o fluidos de elevadas viscosidades o densidades. Cada movimiento del pistón desaloja un mismo volumen de fluido, que equivale al volumen ocupado por el pistón durante su movimiento.

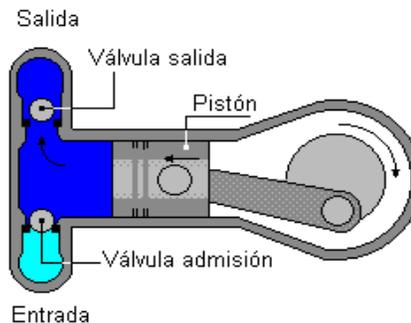


Figura 4.14 Sistema interno de una bomba de pistón.

Bombas centrífuga tipo turbina vertical.

Las bombas tipo turbina vertical generalmente se utilizan cuando es necesario elevar un líquido desde capas freáticas, desde almacenamientos subterráneos artificiales (cavernas) o desde captaciones abiertas de líquidos. Son altamente eficientes, rentables y de bajo mantenimiento, lo que las hace las más utilizadas. En la figura 4.15 se presenta una imagen de este tipo de bomba.

Dentro de las ventajas que presentan este tipo de bombas se tiene:

- El motor está directamente acoplado a los rotores y tiene un diseño de rotor completamente extraíble.
- Por estar ubicado en la profundidad del pozo, se elimina el ruido en la superficie.
- Puede ser montada en pozos que no sean completamente verticales.
- No es necesario instalar caseta de bombeo.

- Sus componentes hidráulicos han sido optimizados para un alto rendimiento.

Sin embargo presenta los siguientes inconvenientes: baja eficiencia, no tolera bombeo de arena, el motor es menos accesible para reparaciones, no toleran fluctuaciones de voltaje sin la adecuada protección.

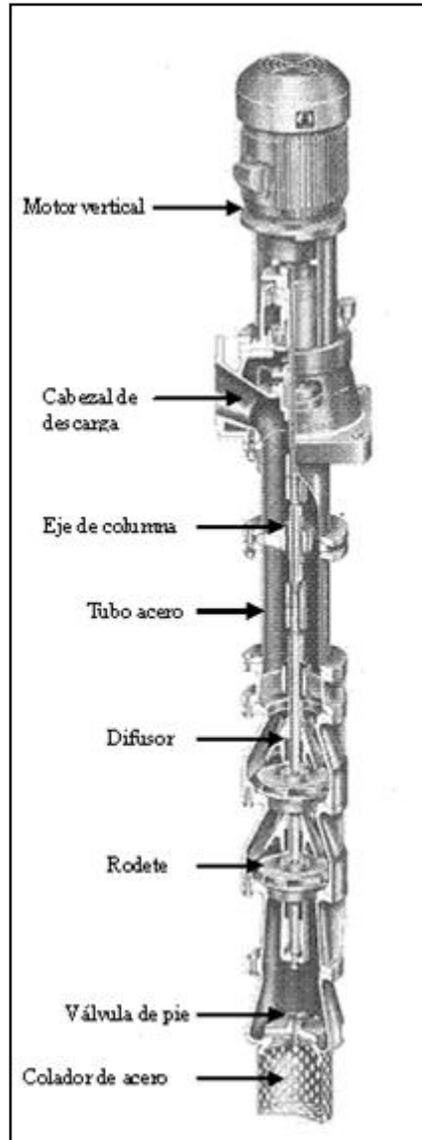


Figura 4.15 bomba tipo turbina vertical



CAPITULO V: Información Legislativa y Actos Administrativos para la Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas

En el año de 1973 el Estado colombiano analizó la necesidad de proteger los recursos naturales renovables. Para tal fin se fijaron los límites mínimos de contaminación y las sanciones por violación de las normas, además se facultó al Presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales y de Protección al Medio ambiente y el ministerio del medio ambiente es el encargado de regular los recursos.

En la Constitución Política de Colombia de 1991 [19] se establecieron dos artículos referentes a la protección del medio ambiente:

- El artículo 79, que dice: "Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines".
- Así mismo, en el artículo 80 señala que "El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados ... "

Se estableció que la política ambiental colombiana acompañaría el proceso de desarrollo económico y social del país orientado según los principios Universales y del desarrollo sostenible contenidos en la Declaración de Río de Janeiro de junio de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo.

Igualmente se definió por medio del decreto 1640 de 2012 [20] *acuífero* y *agua subterránea* de la siguiente manera

- ✓ *Acuífero*. Unidad de roca o sedimento, capaz de almacenar y transmitir agua, entendida como el sistema que involucra las zonas de recarga, tránsito y de descarga, así como sus interacciones con otras unidades similares, las aguas superficiales y marinas.
- ✓ *Aguas Subterráneas*. Las ocultas debajo de la superficie del suelo o del fondo marino que brotan en forma natural, como las fuentes y manantiales captados en el sitio de afloramiento o las que requieren para su alumbramiento obras como pozos, galerías filtrantes u otras similares.

Es por ello que la ley 23 de 1973 [21] tiene como objeto prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del Territorio Nacional. Dado que el medio ambiente es un patrimonio común constituido por la atmósfera y los recursos naturales renovables tales

como aire, el agua y el suelo, su mejoramiento y conservación son actividades de utilidad pública, en las que deberán participar el Estado y los particulares.

El decreto Ley 2811 del 18 diciembre 1974 [22] dice que al ser el ambiente un patrimonio común de la humanidad y necesario para la supervivencia y el desarrollo económico y social de los pueblos, el Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social. La preservación y manejo de los recursos naturales renovables también son de utilidad pública e interés social. Esta ley tiene por objeto:

- ✓ Lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios de equidad que aseguren el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de éstos y la máxima participación social, para beneficio de la salud y el bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio nacional.
- ✓ Prevenir y controlar los efectos nocivos de la explotación de los recursos naturales no renovables sobre los demás recursos.
- ✓ Regular la conducta humana, individual o colectiva y la actividad de la Administración Pública, respecto del ambiente y de los recursos naturales renovables y las relaciones que surgen del aprovechamiento y conservación de tales recursos y de ambiente.

Para cumplir estos objetivos establecidos, se dictó el decreto 1541 de 1978 [23], el cual tiene por finalidad reglamentar las normas relacionadas con el recurso agua en todos sus estados, teniendo en cuenta los siguientes aspectos: El dominio; la reglamentación; las restricciones y limitaciones; las condiciones para la construcción de obras hidráulicas; la correcta y eficiente utilización del recurso; la protección de los demás recursos relacionados con el agua; la conservación de las aguas y sus cauces; la preservación cualitativa del recurso; proteger los demás recursos que dependen de ella; el valor monetario en razón del uso del recurso y para asegurar su mantenimiento y conservación, así como el pago de las obras hidráulicas que se construyan en beneficio de los usuarios; las sanciones y las causales de caducidad a que haya lugar por la infracción de las normas o por el incumplimiento de las obligaciones contraídas por los usuarios.

En este decreto también se hace referencia al dominio de las aguas, definiendo dos categorías: aguas de dominio público y aguas de dominio privado.

Las aguas de uso público son:

- a) Los ríos y todas las aguas que corran por cauces naturales de modo permanente o no;

- b) Las aguas que corran por cauces artificiales que hayan sido derivadas de un cauce natural;
- c) Los lagos, lagunas, ciénagas y pantanos;
- d) Las aguas que están en la atmósfera;
- e) Las aguas lluvias;
- f) Las aguas privadas que no sean usadas por tres (3) años consecutivos, a partir de la vigencia de dicho decreto

Se definen como aguas privadas aquellas que nazcan y mueran dentro del mismo predio.

La ley 99 de 1993 [24]del Ministerio del Medio Ambiente, reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables y organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA. Además se menciona que: “las Corporaciones Autónomas Regionales son entes corporativos de carácter público, creados por la ley, integrados por las entidades territoriales que por sus características constituyen geográficamente un mismo ecosistema o conforman una unidad geopolítica, biogeográfica o hidrogeográfica, dotados de autonomía administrativa y financiera, patrimonio propio y personería jurídica, encargados por la ley de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del Ministerio del Medio Ambiente.”

Las personas o empresas interesadas en construir un pozo en sus predios deben dirigirse a las corporaciones autónomas regionales de sus respectivos departamentos, encargadas de proteger y controlar el uso de los recursos naturales.

La corporación entregará al interesado en la prospección un *formulario único nacional de prospección y exploración de aguas subterráneas*, (ver figura 5.1) en el que el interesado deberá registrar la siguiente información

- ✓ Datos del solicitante
- ✓ Objetivo de la prospección (un pozo nuevo, un aljibe o una reposición).
- ✓ Datos del predio.
- ✓ Empresa que realiza la prospección.
- ✓ Dónde va a estar ubicado el pozo.
- ✓ Qué sistema de perforación se utilizará.
- ✓ Cronograma del plan de trabajo.

La Resolución 2115 de 2007 [25] establece el índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano, IRCA, asignando el puntaje de riesgo contemplado en tabla 5.1.a cada característica física, química y microbiológica. Es decir, cuando no se cumple con una de las características especificadas en la tabla, se le asigna a la característica el valor correspondiente (puntaje de riesgo).

Tabla 5.1 índice de riesgo del agua para consumo humano

Característica	Puntaje de riesgo
Color Aparente	6
Turbiedad	15
pH	1.5
Cloro Residual Libre	15
Alcalinidad Total	1
Calcio	1
Fosfatos	1
Manganeso	1
Molibdeno	1
Magnesio	1
Zinc	1
Dureza Total	1
Sulfatos	1
Hierro Total	1.5
Cloruros	1
Nitratos	1
Nitritos	3
Aluminio (Al ³⁺)	3
Fluoruros	1
COT	3
Coliformes Totales	15
Escherichia Coli	25
Sumatoria de puntajes asignados	100

Cuando la sumatoria de puntajes asignados es cero, el valor del IRCA es cero (0) puntos, es decir, todas las características físicas, químicas y microbiológicas cumplen con los valores aceptables de acuerdo con lo establecido por la Resolución. A su vez, si la sumatoria de puntajes da como resultado cien puntos (100), se tiene el riesgo más alto, es decir, no cumple con ninguna de las características.

Las características químicas de los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias en el agua para consumo humano, que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, deben enmarcarse dentro de los valores máximos aceptables que se señalan a continuación en la tabla 5.2.:

Tabla 5.2 valores máximos de los elementos presentes en el agua para la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias aceptable	Valor máximo (mg/L)
Antimonio (Sb)	0,020
Arsénico (As)	0,010
Bario (Ba)	0,700
Cadmio (Cd)	0,003
Cianuro libre y disociable (CN-)	0,050
Cobre (Cu)	1,000
Cromo total (Cr)	0,050
Mercurio (Hg)	0,001
Níquel (Ni)	0,020
Plomo (Pb)	0,010
Selenio (Se)	0,010
Trihalometanos Totales (THMs)	0,200
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	0,010

Todo lo anterior, presupone una fuerte información previa a nivel legislativo antes de emprender una tarea de prospección y posterior explotación de aguas subterráneas.



CAPÍTULO VI: Experiencias de Perforación de Pozos en la Región de Estudio

La prospección y exploración de aguas subterráneas en Colombia está en manos de diferentes empresas, tales como Ingeoexploraciones en Bucaramanga; Colpozos, Aguas de Colombia, Unipozos y Perfovalle en Cali; Andina Pozos en Cota (Cundinamarca); Giese Ingeniería en Barranquilla; Perfoaguas, Ciclo Water, Arturo Lizarazo & Cia.Ltda. en Bogotá, entre las más conocidas. Sus funciones incluyen la perforación, construcción, y puesta en funcionamiento de los pozos subterráneos para la captación de aguas profundas.

Como parte de la investigación se hicieron visitas técnicas que permitieron evidenciar el trabajo de campo y conocer las características particulares de estos trabajos, características que, por ser de carácter práctico y específico de los terrenos y/o necesidades, no se encuentran documentadas. Se visitaron cuatro lugares para observar las experiencias, la puesta en funcionamiento de maquinaria específica para el terreno, conocer el tipo de análisis previos y los requisitos legales que deben seguirse. Tres de las visitas fueron a lugares donde se estaba excavando pozos en diferentes etapas de construcción y una cuarta visita se hizo a una de las principales empresas de construcción, exploración y fabricación de materiales para uso en pozos profundos.

En este capítulo se detallan las cuatro visitas: Tecnofar (Villarrica-Cauca), Ingenio Incauca (Corinto-Cauca) e Ingenio Rio Paila (Puerto Tejada-Cauca) y a las instalaciones de Colpozos situadas en el Valle del Cauca

6.1. Tecnofar

Se realizó una visita técnica en el municipio de Villarrica, norte del departamento del Cauca, sector del parque industrial, sitio donde está ubicada la empresa Tecnofar (figura 6.1), que es la planta farmacéutica de Tecnoquimicas, una compañía de producción y comercialización de productos y servicios en las áreas de la salud, del cuidado personal y el aseo del hogar, de los alimentos procesados, y de los productos agropecuarios y veterinarios.



Figura 6.1 instalaciones de Tecnofar en el parque industrial (Villarrica-Cauca)

Esta empresa en su proceso de expansión, se vio en la necesidad de encontrar una fuente de agua diferente a la generada por el acueducto de la región. De acuerdo con sus necesidades actuales y

proyectadas en su plan maestro de expansión se determinó que la manera más factible de encontrar una fuente de agua era las aguas subterráneas por su calidad. La empresa determinó que sus necesidades pueden ser satisfechas con un caudal máximo de 23 L/s.



Figura 6.2. Pozo de perforación en Tecnofar (Villa Rica – Cauca).

La empresa contratada para la puesta en marcha de este proyecto de explotación de aguas subterráneas fue la empresa Colpozos donde ubico la torre de perforación la cual se puede apreciar en la figura 6.2 y un equipo de perforación, figura 6.3 basado en el método de circulación directa.

La muestra litológica del terreno o análisis litológico, hace referencia al reconocimiento de los tipos de suelo a diferentes profundidades del terreno, lo que permite observar y analizar la combinación de los rasgos geológicos y morfológicos. Como ya fue explicado en el capítulo III, este análisis da información sobre la capacidad que tiene el terreno de almacenar y transmitir agua. Este análisis no es definitivo, debe complementarse con un análisis estructural del suelo¹¹. La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales del terreno y se debe tener en cuenta el ambiente geológico local y regional ya que zonas con características litológicas similares pueden diferir sustancialmente en su capacidad potencial como pozos.

¹¹ Análisis estructural: La agregación del suelo puede asumir diferentes modalidades, lo que da por resultado distintas estructuras de suelo. La circulación del agua en el suelo varía notablemente de acuerdo con la estructura. Un análisis estructural del suelo revela información sobre la calidad del suelo (poros/canales capilares, red, etc.), así como del grado de circulación del agua o la permeabilidad.



Figura 6.3. Equipo de perforación de la empresa Colpozos.

En Tecnofar se pudo observar que en los dos primeros metros el terreno es arcilloso de 2m a 5m, donde está el primer acuífero, en este sitio es posible realizar un aljibe; entre los 6m y los 10m se ve arcilla una capa impermeable, es decir, un acuitardo; entre los 10m hay una capa de arena, o sea hay agua, metros después se ve un terreno arcilloso o sea no hay agua, a los 27 m hay agua nuevamente, luego es arcilloso; a 29 metros se nota un capa de arcilla, allí se realiza el sello sanitario, para que quede bien sellado ya que si queda en una capa de arena queda mal sellada; a los 36 m se nota una capa de arena de río, limpia, sin oxidaciones donde hay buena circulación de agua y de buena calidad. Hasta aquí iba la excavación del pozo con este tipo de muestra se reconoce los tipos de roca que forman la superficie del terreno, lo que permite observar y analizar la combinación de las rasgos geológicos y morfológicos. En la figura 6.4 se puede observar las diferentes muestras obtenidas al ir perforando el pozo, las cuales son depositadas en bolsas para su posterior análisis.

Allí se observó el trabajo realizado hasta el momento de la visita, los procedimientos, labores, la excavación y construcción del pozo, para construir dicho pozo cumpliendo con las expectativas de la empresa contratante.

El pozo en el momento se encontraba en su proceso inicial: se había realizado la excavación con la broca más pequeña (17 pulgadas) con el fin de poder corroborar que el análisis litológico coincidiera con lo arrojado por el análisis eléctrico.



Figura 6.4. Muestras para análisis litológico.

El análisis eléctrico es el estudio previo que determina los posibles sitios donde puede encontrarse el recurso hídrico, se realiza con los métodos descritos en el capítulo III, Cabe anotar que este estudio en la zona del valle geográfico del río Cauca, al estar estudiado por las corporaciones autónomas de Cauca como del Valle no se realiza. Los datos de la litología y los sitios donde posiblemente están los acuíferos son suministrados por dichas entidades, en el sitio cuando se excava, los datos suministrados y los datos obtenidos no difieren, lo que da una mayor precisión.

Una vez tomadas las muestras metro a metro y ver la coincidencia con el análisis eléctrico. Se continuó con la expansión del boquete con brocas cada vez más amplias hasta llegar a una de 32 pulgadas con el fin de dejar un diámetro interior libre de 24 pulgadas y un espacio anular de 8 pulgadas que se rellena con mortero (mezcla de arena y cemento). En la figura 6.5 se presenta una foto de las diferentes brocas utilizadas.

Con esto queda finalizada la construcción del sello sanitario, que es una especie de cilindro de 30 metros de largo con pared de 5 pulgadas, que impedirá el contacto del agua que se encuentre dentro del pozo con el agua que alojen capas superficiales de suelo de menos de 30 metros de profundidad. A esta profundidad (30 metros) se sabe que se encuentran el nivel freático y acuíferos muy superficiales que pueden tener algún nivel de contaminación no aceptable para la calidad de agua que se espera en capas más profundas. Posterior al trabajo realizado hasta el momento y esperando que el mortero fragüe de la mejor forma, la empresa continúa con la excavación con una broca de 22 pulgadas hasta alcanzar los 80

metros de profundidad y después se continuará excavando con una de 17 pulgadas hasta alcanzar la profundidad máxima de 160 metros.



Figura 6.5. Brocas tricónicas de 17, 22 y 36 pulgadas.

Cuando se está perforando el pozo se debe tener en cuenta que la perforación sea totalmente vertical, ya que si se presenta alguna desviación en su fabricación le restará vida útil al pozo, si se presenta esto hay dos casos posibles (ver capítulo III):

- ✓ Que el agua del pozo salga con arena.
- ✓ Que el rendimiento del pozo en su caudal sea menor al esperado.

Colpozos utilizó un equipo Gardner Denver (ver figura 6.6) que mueve una bomba de pistón (encargada de hacer circular el lodo de bentonita con agua). La mezcla de bentonita-agua realiza la labor de lubricación de los dientes de la broca, además, en su circulación hacia la superficie se adhiere a las paredes del pozo permitiéndoles que tengan una resistencia al derrumbe aceptable durante las labores de construcción del mismo. La mezcla de bentonita-agua sale a la superficie y es dirigida a un tanque en la superficie donde nuevamente es bombeada a las profundidades del pozo realizando un ciclo de lubricación y arrastre del material desprendido. Al salir a la superficie la mezcla con agua y material es separada dando la oportunidad de obtener la información litológica del terreno que es desprendido por la broca de su interior.

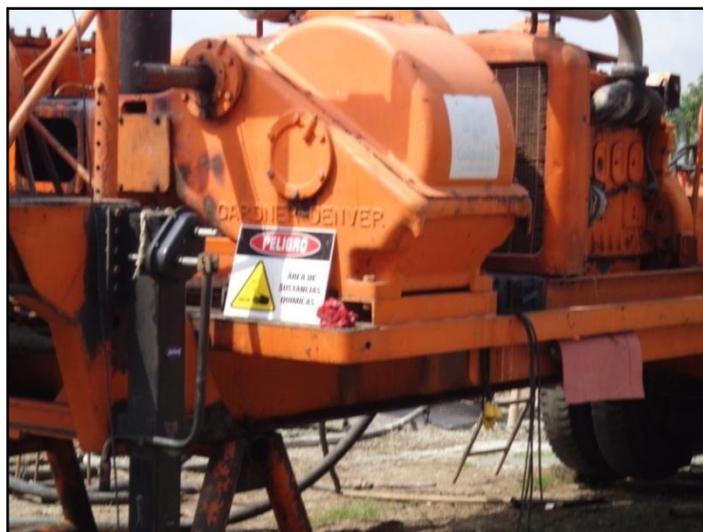


Figura 6.6 Equipo Gardner-Denver para perforación por circulación directa.

El pozo que se estaba perforando en el momento de la visita se encontraba en el proceso inicial de excavación, con treinta metros de profundidad, y en el proceso de realización de los sellos sanitarios, que consisten en una argamasa impermeable que se coloca en el espacio anular existente entre el terreno perforado y el tubo del pozo, desde la superficie del terreno hasta una profundidad que no interfiera con la captación de agua, evitando así el paso de las sustancias peligrosas. La argamasa es una mezcla de materiales que después de colocada se endurece y permanece adherida a las paredes del pozo. Una muy efectiva consiste en arcilla, que por su impermeabilidad impide el paso de sustancias, bentonita que le otorga flexibilidad a la mezcla, y cal que actúa como bactericida. Otra argamasa muy utilizada para sello sanitario se realiza con cemento. De este modo, no sólo se evita el ingreso de contaminantes desde la superficie del terreno sino desde otros estratos acuíferos que contengan agua de calidad no deseada.

En los días anteriores a la visita ya habían excavado con una broca de 32, 28, 24 de diámetro que les permitiría dejar un área anular para poder meter concreto con un ancho que permita aislar el agua de los acuíferos profundos con cualquier agua que pueda entrar en él.

Los ingenieros manifestaron que posteriormente se excavará con una broca de 22 pulgadas hasta lograr una profundidad de 80 metros y posteriormente con una broca de 16 pulgadas hasta lograr la profundidad total que es de 160 metros, el método utilizado para la excavación del pozo es el de circulación directa con un equipo Gardner Denver que mueve una bomba de pistón, que es la que se encarga de hacer circular un líquido viscoso que se encarga de ir sacando los residuos que la broca va desprendiendo de su

superficie de contacto, además de lubricarla y de hacer que las paredes del pozo no se derrumben por lo menos mientras se culmina el revestimiento del pozo.

Para este pozo nos manifiestan los ingenieros que la empresa había contratado 40 metros de filtros que es por donde va a entrar agua al pozo, o es la zona del pozo encargada de proveer el líquido que será bombeado y tendrán contacto con las zonas permeables de la excavación y donde está la parte delicada de la construcción, los ingenieros nos manifiestan que se utilizan filtros de 0.2 cm de ranura que pueden ser de distinta fabricación pero que son los que cumplen con las características de granulometría de estas zonas

6.2 Ingenio Incauca

En visita realizada a una finca de explotación de caña de azúcar perteneciente al ingenio del cauca "Incauca" ubicada en parte rural del municipio de Corinto (Cauca) figura 6.7, se observó la construcción de un pozo profundo para la extracción de agua subterránea, con un caudal esperado de 100 litros por segundo para lograr regar un área de 150 hectáreas aproximadas de cultivo de caña de azúcar, la profundidad de excavación era de 210 metros incluidos los 10 metros que la empresa encargada de la excavación Colpozos adicionó, para tener mayor información de la litología de la profundidad y para lograr dejar un espacio para llenarlo de filtro de grava.



Figura 6.7. Corinto (Cauca), ingenio Incauca

La empresa Incauca determinó en estudios previos que su necesidad en el lugar era de 100 litros por segundo, según las necesidades de su cultivo que eran de aproximadamente 0.7 a 0.8 litros por hectárea de cultivo, para esta labor contrato la el trabajo especializado de Colpozos, empresa ya conocida y nombrada anteriormente.



Figura 6.8 Maquinaria de prospección Corinto Cauca

El pozo debía tener una profundidad de 200 metros, un sello sanitario de 17 metros y 60 metros de filtros, que tendrán contacto con las capas de mayor reserva hídrica y que serán capaces de proveer la cantidad de líquido requerido.

La empresa perforadora del pozo se encontraba en el momento de la visita en una profundidad de 80 metros y con el sello sanitario completamente consolidado con un grosor de pared de 4 pulgadas en mortero. En el momento de la visita se encontraba perforando con un equipo de circulación directa con una broca de 17 pulgadas que posteriormente sería cambiada para ir ampliando el diámetro de excavación. En el sitio se encontraba un lugar de provisión de agua que era una quebrada desviada que irrigaba las instalaciones internas de la finca de Incauca, se tenían construidos los pozos de decantación como el pozo de mezcla de bentonita.

Según los funcionarios de la empresa perforadora del pozo, en aproximadamente un mes se podía llegar a la conclusión de la construcción del pozo para su posterior prueba de bombeo y entrega del mismo.

6.3 Ingenio rio Paila

En el municipio de Puerto Tejada, Cauca se encuentra los cultivos de caña en la finca La serafina propiedad del ingenio Riopaila allí se construyó un pozo en el cual se busca lograr un caudal de 120 litros por segundo para riego de cultivos de caña de azúcar en una extensión de 150 hectáreas.

El pozo estaba completamente excavado y ya se le había empotrado la tubería de descarga de 12 pulgadas, se encontraba inmersa una motobomba tipo turbina la cual en el momento de la visita estaba sin alimentación eléctrica ya que el ingenio en ese momento estaba haciendo las gestiones de consecución de un transformador de 75KW ante la empresa encargada de proveer el flujo eléctrico correspondiente.



Figura 6.9. Finca La Serafina, Puerto Tejada (Cauca), plantación de caña de azúcar lista para riego

Posterior a la instalación de la alimentación eléctrica y obtener el permiso para el uso de agua subterránea, se esperaba la visita de las personas de la entidad autónoma para iniciar el uso del líquido de riego y poner el respectivo medidor de agua.



Figura 6.10. Pozo en La Serafina, Puerto Tejada (Cauca). (a) Funcionario de la CRC en inspección previa a la expedición del permiso de funcionamiento del pozo. (b) Tubería dirigida del pozo al campo de riego.

6.4 Colpozos

La empresa Colpozos del grupo Mexichen tiene varias sedes distribuidas en todo el país, siendo Cali la sede suroccidental. Esta empresa construye pozos en la zona de valle geográfico del río Cauca (diseño, suministro, construcción, instalación y puesta en marcha de equipos y sistemas apropiados para la extracción, captación, bombeo, conducción y aplicación de agua). Cuenta con la experiencia técnica para

la excavación tanto de pozos para extracción como excavaciones para realizar el estudio litológico del terreno. Según sus datos han construido cerca de mil pozos en la zona. En la figura 5.11 se presenta una fotografía de la puerta de acceso a la empresa.



Figura 6.11. Puerta de acceso a Colpozos S.A.S. (Calle 70N # 2b -166 sector Sameco-Cali)

En la visita se contó con la asesoría del funcionario Arbey Arias, ingeniero supervisor de las perforaciones de pozos profundos. La información suministrada por el funcionario fue acerca de los diferentes pasos, procesos y datos técnicos sobre la labor realizada por Colpozos en todo el territorio colombiano, sus distintas áreas de trabajo y una idea de lo que fabrican en sus instalaciones, centrándose en la perforación de pozos profundos, para los que la empresa fabricación tubería en sus distintas gamas, filtros y bombas,

La empresa implementa dos tipos de métodos de excavación: circulación inversa y circulación directa que fueron detallados en el capítulo 3. Cada método requiere de equipo específico, por lo que la empresa cuenta con dos equipos para circulación inversa y seis para circulación directa; donde hay siete equipos de mantenimiento de pozos, dos grúas para montar las bombas turbina o bombas sumergibles dentro de los pozos; la empresa, además de construir el equipo, se encargan del empotramiento del sistema de bombeo según las necesidades del caudal requeridas por el cliente. Buena parte de la información consignada en los capítulos previos fue adquirida en las visitas técnicas a esta empresa, por lo que los autores de este documento agraden a la misma su colaboración.

La Corporación Autónoma Regional del Cauca es la encargada de registrar, controlar, regular, y autorizar la construcción y funcionamiento de los 201 pozos profundos construidos en el Cauca información registrada en el anexo 1.



Conclusiones y Recomendaciones

A continuación se exponen conclusiones que surgieron durante el tiempo del trabajo de grado, basadas tanto en lo aprendido con el estudio de la naturaleza de la técnica, como con la experiencia práctica adquirida durante el tiempo de trabajo de Campo.

- ✓ A partir de la experiencia de campo se pudo determinar que los costos de exploración, perforación y funcionamiento de un pozo de extracción de aguas subterráneas pueden superar los 500 S.M.L.V., costo que, a pesar de ser alto, es justificado teniendo en cuenta el impacto del resultado en la calidad de vida de una población.
- ✓ La zona norte del Departamento del Cauca cuenta con amplios estudios sobre la perforación y explotación del recurso hídrico, que se han realizado desde mediados del siglo XX e indican que hay una gran reserva de agua subterránea. En ese sector se ubican la mayoría de los pozos de agua subterránea que son utilizados en su mayoría en la industria asentada sobre esta zona. Por el contrario, en la zona central o meseta de Popayán, y en la zona sur o valle del Patía los estudios y las perforaciones son pocas; los pozos existentes tienen caudales que no satisfacen las necesidades de los usuarios.
- ✓ La cordillera de los Andes es una formación geológica relativamente joven, en continuo cambio debido al movimiento de las placas tectónicas. Al realizar las diferentes pruebas previas se proporciona una información significativa de las posibles formaciones, pero ellas solas no son contundentes para poder determinar la existencia de acuíferos.
- ✓ La construcción de la columna litológica da una información precisa de las formaciones geológicas del terreno, pero no de la cantidad de agua que posee. Por otro lado, aun si se confirma que es abundante el contenido de agua, las condiciones de transmisividad, que determinan la cantidad de agua que puede entregar el pozo, requieren de pruebas de bombeo posteriores a la construcción del pozo. Por lo anterior, cuando se quiere realizar un proceso de prospección de aguas subterráneas y el pozo a construir es el primero de la zona, ningún estudio previo puede predecir totalmente cuál será la cantidad de caudal, ni la profundidad a la cual deberá estar el pozo.
- ✓ La construcción de un pozo requiere ciertos pasos legales que en principio son accesibles, pero requieren un estricto cumplimiento por parte de la(s) persona(s) que quieran construirlo.
- ✓ En las distintas experiencias de campo se evidenció que la construcción de pozos se divide en dos etapas: la primera de forma lenta que se centra en la construcción del sello sanitario y la segunda parte de forma rápida en la que se llega hasta la profundidad deseada para evitar la contaminación de los acuíferos profundos.

- ✓ En la Costa Pacífica no se han hecho estudios hidrogeológicos, ni se reporta la construcción de pozos. En la bota caucana se presume un buen acuífero pero no hay ninguna construcción de pozos. En el macizo colombiano, donde se supone que hay un acuífero, la calidad del agua no es muy buena por alta presencia de hierro.
- ✓ La decisión de aprovechar el agua subterránea para proveer a las comunidades del Departamento del Cauca debe provenir del Estado.
- ✓ Además de lo ya citado, en el departamento del Cauca hay factores que impiden la explotación del recurso hídrico, tales como la falta de vías de acceso y la presencia de actores armados.

REFERENCIAS

- [1] Organización mundial de la salud. {en línea}.{ Consultado el 17-3-2013}. Agua para la salud: un derecho humano. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/pr91/es/index.html>
- [2] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. PNUMA Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 2002 GEO-3. Madrid. 2002
- [3] Caracterización ambiental plan departamental de aguas y saneamiento básico: Departamento del Cauca. (Corporación autónoma regional del Cauca CRC). Popayán. Marzo 2010.
- [4] SHIKLOMANOV, I.A. *Agua recurso mundial: evaluación y perspectivas modernas para el siglo XXI*. St Petersburg, Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environment Monitoring, State Hydrological Institute, 1999.
- [5] UNESCO. *Métodos de Cálculo de balance Hídrico*. Guía Internacional de Investigación y Métodos. España: Instituto de Hidrología de España, 1965
- [6] MONTES J. G. Recursos Hidrogeológicos. (Red Española de Historia y Arqueología) Madrid, 23 de septiembre 2008.
- [7] DAVIS S., De WIEST, R. *Hidrogeología*. Barcelona: Ediciones Ariel, 1971.
- [8] Cauca Características geográficas. IGAC, 2006
- [9] RODRÍGUEZCÉSAR O, VARGAS N.O. JARAMILLO O.PIÑEROS A. CAÑASH. Estudio nacional del agua. IDEAM. 2010.
- [10] Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM; sistema de control y seguimiento para el aprovechamiento, movilización y almacenamiento de productos forestales Bogotá 2003
- [11] Overmeeren. R. seminario sobre aplicaciones de los métodos geofísicos en trabajos de ingeniería. Universidad de los andes. Bogotá. 1987.
- [12] Gasulla, M. Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Pallas, R. (director/a). Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Departamentd'Enginyeria Electrónica, 1999.
- [13] Vélez Wilson. Equipos geofísicos. {en línea}.{ Consultado el 21-11-2013}. Disponible en: <http://www.sondeosgeofisicos.com/equipos-geofisicos/>.

- [14] Caballero Cecilia. Construcción y medición de columnas estratigráficas, sedimentología de campo. Facultad de ciencias. (UNAM). MEXICO.
- [15] JOHNSON Edward. Agua subterránea y los pozos; libro de referencia dedicado a la industria de los pozos de agua. 1ra. Edit. Johnson División, VOP Inc. Saint Paul, Minnesota. EEUU. 1975.
- [16] Arbeláez Gómez Tulio operación y mantenimiento de pozos profundos para acueductos. (Sena Publicaciones-Universidad del Valle).1999
- [17] Vélez María Victoria. Hidráulica de aguas subterráneas. Facultad de minas. (Universidad Nacional de Colombia). 3ed.medellin septiembre 2004.
- [18] Auge Miguel. Perforaciones hidrogeológicas. (Universidad de Buenos Aires). Buenos Aires. 2005
- [19] Constitución política de Colombia (1991). 4 de julio de 1991. Bogotá.
- [20] Decreto 1640 de 2012 de Agosto 2. Ministerio de hacienda Y Crédito Público. Bogotá.
- [21] Ley 23 de 1973 [18]. Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente. Congreso de Colombia. Bogotá. 1973.
- [22] decreto Ley 2811 del 18 diciembre 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Presidencia de la República. Bogotá. 1974.
- [23] decreto 1541 de 1978. República de Colombia Ministerio de Agricultura. 26 de julio de 1978. Bogotá.
- [24] ley 99 de 1993. Ley General Ambiental de Colombia. El congreso de Colombia. 22 de diciembre de 1993. Bogotá.
- [25] Resolución 2115 de 2007. Ministerio de la Protección Social Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 22 de junio 2007. Bogotá.

ANEXO 1

POZOS EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA

Con información recogida por la CRC en el Cauca hay en operación alrededor de 194 pozos de aguas profundas, y la gran mayoría se ubican sobre el valle geográfico del Río Cauca, 7cho sobre el valle del Patía y en la meseta de Popayán no hay ningún pozo en funcionamiento a continuación se realiza una lista de los distintos pozos dados en concesión en el Cauca, su ubicación y el caudal generado en litros por segundo (L/S).

CÓDIGO POZO	USUARIO	PREDIO	MUNICIPIO	USO	Q (L/S)
CCca-24	Planta de Propal II	Planta Propal II	Caloto	Industrial	220,82
CCca-30	Guevara Paz Vicente	La Vaca Pintoja	Caloto	Agrícola	6,31
CCca-31	Planta de Propal II	Planta Propal II	Caloto	Industrial	189,27
CCca-32	Hacienda Japio	Japio	Caloto	Agrícola	22,08
CCca-33	Planta de Propal II	Planta Propal II	Caloto	Industrial	176,65
CCca-34	Desarrollos industriales del Cauca	Planta	Caloto	Agrícola	164,03
CCca-35	Colbesa	Planta	Caloto	Agrícola	73,50
CCca-36	Incabaña S.A.	Sarria	Caloto	Agrícola	100,00
CCca-37	Incauca S.A.	La Unión	Caloto	Agrícola	94,64
CCca-38	Química Básica Colombiana	Planta	Caloto	Industrial	24,98
CCca-39	Agropecuaria Latinoamericana	Egipto	Caloto	Agrícola	9,27
CCca-42	Hacienda Hato Chico	Hato Chico	Caloto	Agrícola	13,88
Ccca-43	Parque Industrial San Nicolás		Caloto		
CCca-44	Inducolsa	Planta	Caloto	Industrial	40,00
CCca-48	Incabaña S.A.	Santa Rita	Caloto	Agrícola	0,80
CCco-01	Hda. Ucrania Suerte -Ingenio	Ucrania Suerte	Corinto	Agrícola	126,18
CCco-02	Incauca S.A.	San Judas	Corinto	Agrícola	100,94
Ccco-05	Fundación Mariana Hoyos	El Blanco	Corinto	Agrícola	126,18
Ccgu-10	Incabaña S.A.	La Cabaña	Guachené	Agrícola	1,00
CCgu-11	Agrocauca	La Cabaña	Guachené	Agrícola	4,10
CCgu-16	Agrocauca	La Siberia	Guachené	Agrícola	0,60
CCgu-17	Agrocauca	Sin nombre	Guachené	Agrícola	0,70
CCgu-18	Agrocauca	Campoalegre	Guachené	Agrícola	1,00
CCgu-19	Agrocauca	Caponera	Guachené	Agrícola	1,50
CCgu-20	Agrocauca	La 25	Guachené	Agrícola	2,00
CCgu-21	Agrocauca	Cabañita	Guachené	Agrícola	1,20
CCgu-22	Agrocauca	La Caponera 3	Guachené	Agrícola	0,80
CCgu-23	Agrocauca	La Caponera 2	Guachené	Agrícola	0,80
CCgu-24	Agrocauca	La Caponera 1	Guachené	Agrícola	1,30
CCgu-25	Agrocauca	Sin nombre	Guachené	Agrícola	2,70
CCgu-26	Agrocauca	Naranjal 2	Guachené	Agrícola	1,00

CCgu-27	Agrocauca	Potocó	Guachené	Agrícola	2,00
CCgu-28	Agrocauca	Obando	Guachené	Agrícola	1,80
CCgu-29	Agrocauca	Sin nombre	Guachené	Agrícola	0,70
CCgu-30	Agrocauca	Campollanito	Guachené	Agrícola	0,80
CCmi-07	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Agrícola	18,93
Ccmi-27	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Industrial	37,85
Ccmi-28	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Agrícola	157,73
Ccmi-29	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Industrial	56,78
Ccmi-31	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Agrícola	176,65
CCmi-33	Incauca S.A.	San Fernando Sur 3	Miranda	Agrícola	94,64
Ccmi-34	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Agrícola	164,03
CCmi-35	Incauca S.A.	San Fernando Sur 1	Miranda	Agrícola	107,25
CCmi-37	Incastilla S.A.	San Gabriel	Miranda	Agrícola	114,19
Ccmi-38	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Agrícola	94,64
Ccmi-42	Incauca S.A.	Fábrica	Miranda	Industrial	94,64
CCmi-43	Porcícola cochinos Ltda	Providencia	Miranda	Pecuario	15,77
CCmi-44	Incauca S.A.	San Fernando Sur 5	Miranda	Agrícola	107,25
CCmi-50	Incauca S.A.	San Fernando Norte 1	Miranda	Agrícola	94,64
CCmi-51	Incauca S.A.	La Cañada El Pitayo)	Miranda	Agrícola	100,94
Ccmi-51	Incastilla S.A.	El Porvenir	Miranda	Agrícola	63,09
CCmi-55	Incastilla S.A.	La Pampa	Miranda	Agrícola	94,64
CCmi-57	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Industrial	94,64
CCmi-58	Incauca S.A.	San Fernando Norte 4	Miranda	Agrícola	94,64
CCmi-59	Incauca S.A.	San Fernando Norte 6	Miranda	Agrícola	119,87
CCmi-60	Incauca S.A.	Instalaciones de Incauca	Miranda	Agrícola	15,77
CCmi-61	Incauca S.A.	Gustavelez	Miranda	Agrícola	94,64
CCmi-62	Incauca S.A.	Hacienda Chimbico	Miranda	Agrícola	69,40
CCmi-63	Incauca S.A.	San Fernandito	Miranda	Agrícola	88,33
CCmi-65	Incauca S.A.	La Giralda	Miranda	Agrícola	88,33
CCmi-66	Incastilla S.A.	La Pampa	Miranda	Agrícola	82,02
CCmi-67	Incauca S.A.	La Gruta	Miranda	Agrícola	119,87
CCmi-68	Agrícola Arturo Giraldo e Hijos	La Trocha	Miranda	Agrícola	100,94
CCmi-70	Incauca S.A.	El Recreo	Miranda	Agrícola	132,49
CCmi-71	Incauca S.A.	Sevilla	Miranda	Agrícola	113,56
CCmi-72	Incabaña S.A.	Orocué	Miranda	Agrícola	117,98
CCmi-75	Centro Mecanizados del Cauca	Planta	Miranda	Industrial	15,77
CCmi-76	Incauca S.A.	Fabrica Incauca	Miranda	Industrial	94,64
CCmi-77	Hacienda Langara	Langara	Miranda	Agrícola	126,18
CCmi-78	Servicidas SA.	La Lindosa	Miranda	Agrícola	100,94
CCmi-80	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Agrícola	94,64
CCmi-81	Incauca S.A.	San Fernando	Miranda	Agrícola	94,64
CCmi-83	Agrocauca	Ortígal	Miranda	Agrícola	0,70
CCmi-84	Agrocauca	Santa Ana	Miranda	Agrícola	0,80
CCmi-85	Agrocauca	Agrocauca	Miranda	Agrícola	0,50
CCmi-86	Agrocauca	Agrocauca	Miranda	Agrícola	1,50
CCmi-87	Agrocauca	La Munda	Miranda	Agrícola	0,80
CCpa-24	Incabaña S.A.	Canadá	Padilla	Agrícola	113,56
CCpa-25	Incauca S.A.	Holanda Naranjo 1	Padilla	Agrícola	126,18
CCpa-26	Incauca S.A.	Potrero Verde	Padilla	Agrícola	113,56

CCpa-27	Incauca S.A.	Ukrania	Padilla	Agrícola	100,94
CCpa-28	Incauca S.A.	Holanda Naranjo 2	Padilla	Agrícola	126,18
CCpa-29	Incabaña S.A.	Mendiola La Paila	Padilla	Agrícola	113,56
CCpa-30	Incauca S.A.	La Pailita-Florencia	Padilla	Agrícola	100,94
CCpa-31	Incauca S.A.	La Gloria	Padilla	Agrícola	76,47
CCpa-33	Incabaña S.A.	Taula Mejía	Padilla	Agrícola	94,64
CCpa-34	Incabaña S.A.	El Chamizo	Padilla	Agrícola	113,56
CCpa-35	Incabaña S.A.	Mirandita	Padilla	Agrícola	119,87
CCpa-36	Incabaña S.A.	Rancho Grande	Padilla	Agrícola	107,25
CCpa-37	Incabaña S.A.	Canadá	Padilla	Agrícola	113,56
CCpa-38	Incabaña S.A.	Mendiola	Padilla	Agrícola	126,18
CCpa-41	Agrocauca	Tres Esquinas	Padilla	Agrícola	1,20
CCpa-42	Agrocauca	Las Cosechas 3	Padilla	Agrícola	1,50
CCpa-43	Agrocauca	AGROCAUCA	Padilla	Agrícola	0,60
CCpa-44	Agrocauca	La Lucha	Padilla	Agrícola	2,00
CCpa-45	Agrocauca	Guayabal	Padilla	Agrícola	1,50
CCpa-46	Agrocauca	Los Robles	Padilla	Agrícola	0,50
Ccpa-50	Incastilla S.A.	El Tamboral	Padilla	Agrícola	80,00
CCpat-02	Vereda Mulaló	Mulaló	Patía	Agrícola	3,72
CCpat-04	Vereda Patía	El Diviso	Patía	Agrícola	15,02
CCpat-06	Vereda El Rincón	El Rincón	Patía	Agrícola	13,31
CCpat-07	Vereda La Ventica	El Manzanillo	Patía	Agrícola	20,00
CCpat-08	Vereda La Ventica	El Paraiso	Patía	Agrícola	7,70
CCpat-09	Vereda La Manguita	Casaquemada	Patía	Agrícola	14,01
CCpat-10	Vereda El Puro II	Cañada honda	Patía	Agrícola	18,99
CCpt-100	Incauca S.A.	Suiza Caicedo	Puerto Tejada	Agrícola	107,25
CCpt-103	Incauca S.A.	Los Alpes	Puerto Tejada	Agrícola	69,40
CCpt-104	Hacienda Zanjón Rico	Zanjón Rico	Puerto Tejada	Agrícola	88,33
CCpt-105	Incastilla S.A.	Santa Helena	Puerto Tejada	Agrícola	127,69
CCpt-106	Incauca S.A.	Suiza Cauca	Puerto Tejada	Agrícola	126,18
CCpt-107	Hacienda Méjico	Méjico	Puerto Tejada	Agrícola	126,18
CCpt-108	Hacienda Bolivar	Bolivar	Puerto Tejada	Agrícola	113,56
CCpt-110	Incastilla S.A.	Central Colombia Lloreda	Puerto Tejada	Agrícola	114,19
CCpt-112	Hacienda San Isidro	San Isidro	Puerto Tejada	Agrícola	75,71
CCpt-114	Papeles del Cauca	Planta	Puerto Tejada	Agrícola	126,18
CCpt-115	Papeles del Cauca	Planta	Puerto Tejada	Agrícola	126,18
CCpt-119	Prodesal. Parque Ind Trocadero	Trocadero	Puerto Tejada	Agroindustrial	126,18
CCpt-121	Hacienda Santander. Insecauca	Santander	Puerto Tejada	Agroindustrial	194,57
CCpt-122	Incabaña S.A.	El Chontal	Puerto Tejada	Agroindustrial	126,18
CCpt-123	Finca La Cabañita	La Cabañita	Puerto Tejada	Agroindustrial	10,09
CCpt-124	Hda La Samaria	La Samaria	Puerto Tejada	Agrícola	18,93
CCpt-127	Parque Industrial Trocadero	Trocadero	Puerto Tejada	Industrial	0,88
CCpt-127-A	Agrocauca	Agrocauca	Puerto Tejada	Agrícola	1,50
CCpt-128	Agrocauca	San Carlos	Puerto Tejada	Agrícola	0,80
CCpt-129	Hacienda Canarias	Canarias	Puerto Tejada	Agrícola	94,64
CCpt-129A	Agrocauca	La Serafina	Puerto Tejada	Agrícola	0,20
CCpt-130	Agrocauca	Agrocauca	Puerto Tejada	Agrícola	1,50
CCpt-131	Agrocauca	Agrocauca	Puerto Tejada	Agrícola	1,00
CCpt-132	Agrocauca	Agrocauca	Puerto Tejada	Agrícola	0,98

CCpt-139	Grupo Pichucho R.E. Holguín	El Cenit	Puerto Tejada	Agrícola	100,00
CCpt-51	Bernardo Lince Tenorio S.C.	Los Cámbulos	Puerto Tejada	Agrícola	75,01
CCpt-54	Grupo Pichucho	El Cenit	Puerto Tejada	Agrícola	84,98
CCpt-55	Diego Sanint	Brasil	Puerto Tejada	Agrícola	180,00
CCpt-57	Espinosa Efraín	El Socorro	Puerto Tejada	Agrícola	138,80
CCpt-58	Incauca S.A.	Suiza Cauca 1	Puerto Tejada	Agrícola	129,02
CCpt-59	Bernardo Lince Tenorio S.C.	La Felisa	Puerto Tejada	Agrícola	65,99
CCpt-60	Incauca S.A.	Limoncito (La Paz)	Puerto Tejada	Agrícola	126,18
CCpt-61	Incastilla S.A.	Fábrica Incastilla S.A.	Puerto Tejada	Agrícola	145,99
CCpt-63	Hacienda Guengué Jigual	Guengué Jigual	Puerto Tejada	Agrícola	154,63
CCpt-64	Ingenio Mayaguez	Zanjón Oscuro	Puerto Tejada	Agrícola	49,84
CCpt-65	Incauca S.A.	Potosí	Puerto Tejada	Agrícola	75,71
CCpt-68	Hacienda Florencia	Florencia	Puerto Tejada	Agrícola	176,65
CCpt-71	Florencia Ltda	Florencia	Puerto Tejada	Agrícola	63,15
CCpt-72	Incastilla S.A.	La Pampa I	Puerto Tejada	Agrícola	126,18
CCpt-73	Grupo Pichucho	El Cenit	Puerto Tejada	Agrícola	84,98
CCpt-75	Incauca S.A.	Darién	Puerto Tejada	Agrícola	132,99
CCpt-76	Incauca S.A.	La Inés	Puerto Tejada	Agrícola	126,18
CCpt-78	Empresa Agrícola del Cauca Ltda	Bolivar	Puerto Tejada	Agrícola	100,94
CCpt-79	Inversiones Culzat Guevara	Holanda	Puerto Tejada	Agrícola	116,46
CCpt-80	Sanint Peláez Rodrigo	La Judea	Puerto Tejada	Agrícola	100,00
CCpt-81	Florencia Ltda.	Florencia	Puerto Tejada	Agrícola	94,64
CCpt-82	Sociedad Méjico Ltda	Méjico	Puerto Tejada	Agrícola	113,56
CCpt-83	Incauca S.A.	Judea Clementina	Puerto Tejada	Agrícola	157,73
CCpt-84	Hacienda Palermo	Palermo	Puerto Tejada	Agrícola	126,18
CCpt-85	Incauca S.A.	Palmirita	Puerto Tejada	Agrícola	145,11
CCpt-86	Hacienda La Roza Holanda	La Roza Holanda	Puerto Tejada	Agrícola	125,99
CCpt-87	Bernardo Lince Tenorio S.C.	El Espejo	Puerto Tejada	Agrícola	75,01
CCpt-94	Vaca Vaca Diego José	La Dehesa	Puerto Tejada	Agrícola	16,02
CCpt-95	Incastilla S.A.	La Pampa I	Puerto Tejada	Agrícola	126,18
CCpt-96	Fundación Mariana Hoyos de Gutiérrez	El Cairo	Puerto Tejada	Agrícola	100,00
CCpt-97	Hacienda La Cilia	La Cilia	Puerto Tejada	Agrícola	165,04
CCpt-99	Incastilla S.A.	Santa Helena	Puerto Tejada	Agrícola	119,81
CCsa-35	Hacienda Cachimbal	Hda Cachimbal	Santander de Quilichao	Agrícola	63,09
CCsa-36	Estación CIAT	Bachám	Santander de Quilichao	Agrícola	68,14
CCsa-37	Hacienda Japio	La Campiña	Santander de Quilichao	Agrícola	63,09
CCsa-39	Hacienda Japio	La Campiña	Santander de Quilichao	Agrícola	100,00
CCsa-40	Los Andes Golf Club	Los Andes	Santander de Quilichao	Agrícola	5,99
CCsa-41	Los Andes Golf Club	Los Andes	Santander de Quilichao	Agrícola	5,99
CCsa-43	Hacienda Los Lagos	Los Lagos	Santander de Quilichao	Agrícola	15,77
CCsa-44	Hacienda La Campiña	La Campiña	Santander de Quilichao	Agrícola	50,47
CCsa-58	Hacienda La Campiña	La Campiña	Santander de Quilichao	Agrícola	63,09
CCsa-60	Hacienda El Silletero	El Silletero	Santander de Quilichao	Agrícola	12,93
CCsa-65	Hacienda Japio	Japio	Santander de Quilichao	Agrícola	31,55
CCsa-66	Incauca S.A.	Mameyal	Santander de Quilichao	Agrícola	75,71
CCsa-68	Incauca S.A.	Chirringo	Santander de Quilichao	Agrícola	75,71
CCsa-69	Hacienda Limoncito	Limoncito	Santander de Quilichao	Agrícola	75,71
CCsa-70	Hacienda La Campiña	La Campiña	Santander de Quilichao	Agrícola	41,01

CCsa-71	Incauca S.A.	La Robleda	Santander de Quilichao	Agrícola	63,09
CCsa-72	Hacienda La subienda	La Subienda	Santander de Quilichao	Agrícola	50,47
CCsa-74	Agropecuaria El Silletero	El Silletero	Santander de Quilichao	Agrícola	63,09
CCsa-75	Parque Industrial Siglo XXI	Parque Industrial	Santander de Quilichao	Agrícola	63,09
CCsa-77	Inagromecanica	Lote N° 3	Santander de Quilichao	Agrícola	4,42
CCsa-80	Almidones Nacionales	Planta	Santander de Quilichao	Agrícola	0,00
CCsa-82	Ipac S.A.	Planta	Santander de Quilichao	Agrícola	3,53
CCsa-83	Genfar Ltda	Genfar Ltda	Santander de Quilichao	Agrícola	3,79
CCsa-89	Parcelación Industrial El Paraiso	El Paraiso	Santander de Quilichao	Industrial	56,78
CCsa-95	Los Andes Golf Club	L Garcia	Santander de Quilichao	Agrícola	15,77
CCsa-96	Agrocañas S.A.	Berlín I	Santander de Quilichao	Agrícola	47,32
CCsa-98	Avícola Kilimanjaro	El Limoncito	Santander de Quilichao	Agrícola	6,31
Ccsa-101	Sanclemente Fonseca Carlos	El Bohío	Santander de Quilichao	Agrícola	63,09
CCsa-102	Betancourt Suárez Héctor Fabio	Brasilia	Santander de Quilichao	Agrícola	25,60
Ccsa-103	Colombina del Cauca S.A.	Parque Industrial El Paraiso	Santander de Quilichao	Industrial	20,00
CCvi-01	Hacienda Limoncito	Limoncito	Villa Rica	Agrícola	0,00
CCvi-02	Incauca S.A.	Chirringo	Villa Rica	Agrícola	75,71
CCvi-04	Genfar Ltda	Genfar Ltda	Villa Rica	Industrial	2,52
CCvi-05	Incabaña S.A.	Sarria	Villa Rica	Agrícola	107,25
CCvi-06	Empresas Municipales Villarica E.S.P	Planta	Villa Rica	Agrícola	56,00
CCvi-10	Ingenio Mayaguez	Llano Grande	Villa Rica	Agrícola	120,00
Ccvi-14	Transportes Cabal & Cía	Cachimbal	Villa Rica	Agrícola	63,00
CCvi-15	Agrocauca	El Chorro	Villa Rica	Agrícola	0,50
Ccvi-16	Incauca S.A.	Cachimbalito	Villa Rica	Agrícola	82,017
TOTALES					13.936,17

ANEXO 2

TRABAJOS FUTUROS

Las zonas de la meseta de Popayán y el valle del Patía, en el departamento del Cauca poseen una base de datos mínima o casi nula, próximamente podría iniciarse el estudio de la cantidad y capacidad de los acuíferos que pueden encontrarse en las zonas menos estudiadas, trabajos que pueden enfocarse en la prospección por métodos geoeléctricos, gracias a que la facultad de ingeniería civil cuenta con los equipos requeridos para dichos estudios.

Basados en los estudios antes propuestos y en la base de datos de la CRC puede iniciarse un trabajo mancomunado de la corporación, junto a la academia y los entes gubernamentales (municipios) para aumentar y apoyar a los productores agrícolas y ganaderos, ubicados en el valle del Rio Patía para lograr potenciar todas las cualidades con las que cuenta esta zona, que son opacadas por las implacables sequias. La colaboración de la universidad puede centrarse en la asesoría del manejo de los distintos métodos de prospección que pueden ser bien manejados por distintos estudiantes del programa de Ingeniería Física en la facultad de educación o la facultad de Ingeniería Civil.

Implementar herramientas para simular el flujo y comportamiento de aguas subterráneas, inicialmente en el valle del Rio Cauca para comprobar su efectividad y después ser llevado a las zonas del sur y centro del departamento para obtener una información más cercana al comportamiento de los acuíferos de la zona

Realizar en las zonas de la llanura del pacifico, bota caucana y macizo colombiano estudios hidrogeológicos que puedan clarificar con una mayor exactitud que sitios pueden tener unos mejores acuíferos, para así, si es posible iniciar la construcción de pozos y determinar en verdad los caudales que se puedan obtener.

La construcción de pozos de agua subterránea en las zonas con presencia de acuíferos puede ser complemento de los acueductos de aguas superficiales en épocas de sequía u otro factor que altere el normal funcionamiento del agua en el sector.