



Preparado por:

Ing.

*Mauricio Vega
Araya*

Geol.

*Alonso Alfaro
Martínez*

**ESTUDIO HIDROLÓGICO CON
FINES DE OPTIMIZACIÓN Y
APROVECHAMIENTO EN LA
CUENCA DEL RÍO PEÑAS
BLANCAS, PÉREZ ZELEDÓN
COSTA RICA**

Informe Final

Diciembre, 2007

Índice

1	Introducción	3
1.1	Justificación	5
1.2	Área de estudio (cuenca del río Peñas Blancas).....	6
1.3	Objetivos	7
2	Metodología de trabajo	7
3	Hidrología.....	10
3.1	Parámetros morfométricos de la cuenca	10
3.1.1	Perímetro y área de la cuenca del río Peñas Blancas	10
3.1.2	Índice de factor de forma (F) de la cuenca del río Peñas Blancas.....	11
3.1.3	Índice de compacidad (índice de Gravelious) de la cuenca del río Peñas Blancas 11	
3.1.4	Pendiente del cauce del río Peñas Blancas.....	12
4	Geología	15
4.1	Geomorfología de la cuenca del río Peñas Blancas.....	15
4.1.1	Formas de origen tectónico erosivo – Cordillera Costeña	16
4.1.2	Conos de Talus (fascies proximales)	17
4.1.3	Conos Aluviales (fascies distales).....	18
4.1.4	Terrazas aluviales recientes	19
4.2	Formaciones Geológicas en la cuenca del río Peñas Blancas.....	19
4.2.1	Cordillera de Talamanca.....	19
4.2.2	Formación Térraba	20
4.2.3	Formación Valle de El General	21
4.2.4	Aluviones recientes.....	21
5	Hidrogeología.....	22
5.1	Aguas subterráneas	22
5.2	Acuíferos, definición y clasificación	22
5.3	Pozos perforados	23
5.4	Hidrogeología regional	24
5.4.1	Acuíferos ausentes en rocas volcánicas e intrusivas.....	24
5.4.2	Acuíferos fracturados en rocas sedimentarias (bajo potencial acuífero).....	24
5.4.3	Acuíferos porosos en rocas sedimentarias (medio a bajo potencial)	25
5.4.4	Concesiones de agua en la cuenca del río Peñas Blancas	25
6	Balance hídrico de suelos para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos	27
6.1	Precipitación.....	27
6.2	Evapotranspiración (potencial y real)	30
6.3	Infiltración potencial.....	33
6.4	Escorrentía superficial.....	36
6.5	Otros parámetros a tomar en cuenta.....	37
6.6	Textura del suelo.....	38
6.7	Estructura del suelo.....	41
6.8	Cobertura vegetal.....	42
6.9	Conductividad hidráulica (pruebas de infiltración)	47
6.10	Recarga potencial de acuíferos.....	48
6.11	Balance hídrico de suelos	50
6.12	Resultados obtenidos en la balance hídrico de suelos.....	53
6.13	Zonas de recarga potencial en la cuenca del río Peñas Blancas	55
7	Conclusiones	58
8	Recomendaciones	66
9	Referencias Bibliográficas.....	68
10	Anexos.....	73

1. Introducción

El agua de los océanos, de la atmósfera y de las tierras modifica su posición geográfica; y su estado físico, en una gran serie de continuos intercambios que se designan con el nombre de *ciclo hidrológico*. Este proceso incluye una serie de posibles circuitos que incluyan alternativamente el estado gaseoso, líquido o sólido del agua.

El insumo principal para que se de el ciclo hidrológico son los océanos, que cubren casi las tres cuartas partes del globo, por ejemplo se ha estimado que cada año se evaporan de los océanos unos 335.000 km³ de agua y otros ó 5.000 km³ se evaporan en los lagos y de las superficies húmedas de los continentes (Straler & Straler, 2002). El total de evaporación anual (400.000 km³) debe de compensar, por regla general, la cantidad total de agua restituida a la superficie de la tierra por condensación de la atmósfera. Alrededor 100.000 km³ de agua caen en forma de precipitaciones sobre las superficies de los continentes cada año. Esto indica que cae considerablemente más agua sobre la tierra que la que es devuelta a la atmósfera por evaporación de las aguas continentales. Por consiguiente, mucha de la cae vuelve al mar en forma líquida (Straler & Straler, 2002).

Estas partes del ciclo hidrológico en la que el agua está en forma de vapor, el movimiento de esta hacia las tierras en masas de aire marina y la eventual precipitación desde las nubes son fases de la meteorología. Una parte de La precipitación se evapora directamente antes de llegar al suelo. Parte de la que llega a la tierra puede ser rápidamente de vuelta a la atmósfera al evaporarse el agua depositada sobre las plantas y el suelo. Si la lluvia es fuerte y continua, mucha penetraría en los terrenos convirtiéndose en agua de infiltración. Si queda retenida en la superficie del suelo, el agua de infiltración puede ser devuelta a la atmósfera por las plantas, que la absorben por sus raíces y la reintegran a la atmósfera a través de sus hojas (transpiración). Parte del agua de infiltración se evapora directamente en el aire que ocupa las aberturas del suelo.

Si continúa lloviendo, el agua se infiltra a través del suelo debido a la fuerza de la gravedad y alcanza el lecho recoso o penetra en profundos depósitos formados por materiales del manto detrítico. Esta agua de saturación se mueve muy lentamente para por fin emerge en arroyos, lagos o incluso en el fondo del océano en forma de filtraciones, (Straler & Straler, 2002).

Si es excedida la capacidad del suelo en recibir y transmitir grandes y continuas precipitaciones, se originan corrientes superficiales que conducen el agua directamente hacia abajo por los declives hasta los ríos y lagos (escorrentía superficial). Desde estas superficies al descubierto el agua puede evaporarse directamente en la atmósfera o puede alcanzar los océanos mediante corrientes (Straler & Straler, 2002).

Existen diferentes formas de expresar los movimientos de agua, por ejemplo en un concepto general del balance hídrico Heuvelop y otros (1986) sintetiza el los todos estos conceptos en la siguiente fórmula:

$$P+I+U-ET-S\pm\Delta A=0$$

En términos de las partes esenciales de mismo la precipitación (P), representa la entrada principal, I son ingresos de agua superficial y U de agua subterránea. La evapotranspiración (ET), representa la salida y S el flujo de egreso. Si el flujo de entrada excede al flujo de salida, el agua almacenada total (A) aumenta o disminuye. Estas des cantidades deben de tenerse en cuenta mes tras mes durante todo el año, pero a la hora de llevar a cabo una estimación se deberán emplear los valores medios mensuales de una serie de años en vez de los datos de un único año, (Heuvelop y otros, 1986).

6.1 Justificación

El recurso hídrico es motivo de preocupación a todo nivel de la sociedad, tanto en el ámbito nacional como internacional. Su escasez relativa amenaza con el desarrollo potencial al que podría aspirar una región y, por tanto, esta escasez se convierte en una limitante importante para que la población mantenga o mejore su bienestar. Esta preocupación se acrecienta por la multiplicidad de factores, y sus relaciones, que explican el deterioro del recurso hídrico tanto en calidad como en cantidad.

Sin duda, es incuestionable la importancia del recurso hídrico para el sostén de las relaciones ecológicas y sus funciones; para el desarrollo de las actividades productivas; para la atención de las necesidades sociales; y, para la reproducción de la población en general. Sin embargo, a pesar de esa importancia, el ser humano ha sido, y sigue siendo, el responsable principal de la degradación y agotamiento del recurso hídrico, debido al desarrollo de actividades económicas que son, en algunos casos, altamente demandantes de agua y, en otros, altamente contaminantes ya sea por el tipo o por los altos volúmenes de desechos que generan durante el proceso productivo o de consumo. Lo anterior se puede constatar en varias de las cuencas de Costa Rica, donde el recurso hídrico es un eje que toda a todos los componentes socio-productivos y ecosistémicos.

Sin duda, estamos en un momento crucial donde se plantea un desafío social fundamental, que es conciliar los objetivos de desarrollo con los de conservación, procurando mantener el equilibrio ecológico, actualmente debilitado y frágil. Esto es fundamental para el mantenimiento de las funciones de los ecosistemas, de modo que se mantenga o mejore el flujo de bienes y servicios ambientales a la población, particularmente el flujo del servicio ambiental hídrico. Este esfuerzo, además de mejorar en calidad y cantidad las oportunidades de desarrollo, minimiza el riesgo inminente al que se ha sometido todo el aparato productivo debido a la escasez creciente de recursos naturales.

No es casualidad, entonces, que en esa búsqueda de un desarrollo en armonía con la naturaleza surjan nuevas formas de entender las relaciones entre las actividades humanas y las necesidades ecológicas.

En diferentes foros y a nivel nacional e internacional el recurso hídrico es tema de discusión, abordándose desde diferentes aristas, sin embargo, la conclusión general es que las acciones deben ser locales; cualquiera que sea el enfoque de análisis. Es en este punto donde los actores que interactúan, viven, utilizan o disfrutan de este valioso recurso, son los que en primera instancia deben realizar todas aquellas acciones tendientes a utilizar óptimamente este preciado recurso.

6.2 Área de estudio (cuenca del río Peñas Blancas)

La cuenca del río Peñas Blancas se localiza en la vertiente del pacífico sur de Costa Rica, la misma forma parte de la cuenca del río General la cual tiene un carácter más regional; el cual junto con el río Coto Brus se unen a la altura del lugar llamado Paso Real y conforman el río Grande de Térraba, desembocando finalmente en el océano Pacífico.

Administrativamente la cuenca del río Peñas Blancas ubica en su totalidad en la Provincia de San José y en el cantón de Pérez Zeledón, abarcando los distritos de General y Cajón, específicamente entre las coordenadas 138700-158000N y 576150-587875W de la cuadrícula Lambert Costa Rica Norte en las hojas topográficas Repunta (3443-I) y San Isidro (3444-II); a escala 1:50.000; editadas por el IGN, (ver anexo 1, Mapa de Ubicación).

6.3 Objetivos

- Realizar una caracterización biofísica de la cuenca del río Peñas Blancas; para determinar cuales son los factores más influyentes en el balance hídrico de suelos.
- Realizar un balance hídrico mensual en la cuenca del Río Peñas Blancas con fines de optimizar el uso racional de dicho recurso.

6 Metodología de trabajo

La primera etapa consistió en la recopilación de información existente; en esta fase se realizó una investigación para compilar y sistematizar la información previa de instituciones gubernamentales (Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento, Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, Acueductos y Alcantarillados (AyA), Instituto Geográfico Nacional (IGN), Departamento de Aguas del MINAE, Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Universidad Nacional (UNA), así como también información interna de COOPEAGRI R.L y mapas regionales existentes.

La segunda etapa: Generación de información de campo; realizando recorridos en la cuenca para levantar información geológica, geomorfológica, hidrológica, uso y cobertura del suelo, obtención de muestras de suelos, pruebas de infiltración; insumos esenciales para la realización del balance hídrico de humedad de suelos.

La tercera etapa: Interpretación y procesamiento de la información; una vez que se recopiló la información existente y conforme se va generando la información en el campo la misma se analiza y representa por medio de mapas, bases de datos y se generan mapas digitales que serán utilizadas para el análisis espacial y generación de un modelo del balance hídrico de humedad de suelos.

Se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual es una combinación de “*hardware*” y “*software*” que permiten codificar, capturar, almacenar, editar, analizar y visualizar información espacial. Los SIG en general, pueden trabajar información en formato vector y raster. Para el presente trabajo se combinaron ambos formatos según correspondió.

Particularmente y dentro de la amplia gama de aplicaciones SIG se aplicaron técnicas de modelado espacial, a partir de interpolación. El proceso de interpolación espacial consiste en la estimación de los valores que alcanza una variable Z en un conjunto de puntos definidos por un par de coordenadas (X, Y), partiendo de los que adopta Z en una muestra de puntos situados en el mismo área de estudio. La estimación de valores fuera del área de estudio se denomina extrapolación. Los diferentes métodos de interpolación se pueden dividir en métodos globales y métodos locales, los primeros utilizan toda la muestra para estimar el valor en cada punto de estimación, y los segundos utilizan solo los puntos de muestreo más cercanos.

En el caso de los modelos raster estos representan lo que se denomina una superficie estadística, esto por que en general, no siempre se tienen los suficientes datos o bien, estos son puntuales, como es el caso de datos de precipitación y temperatura que se miden en estaciones meteorológicas, sin embargo, representan un fenómeno espacial. En estos casos es necesario utilizar técnicas de interpolación espacial para crear una superficie a partir de dichos puntos.

En general los interpoladores utilizan funciones polinomiales. Los polinomios son expresiones matemáticas que involucran sumatorias de potencias de una o más variables multiplicadas por coeficientes.

Existen diferentes interpoladores incluidos en la plataforma SIG. Uno de ellos es “Curvatura mínima o Spline” que es método de interpolación que ajusta una curvatura mínima a la superficie a través de puntos de entrada. Este interpolador

fue utilizado para ajustar los puntos de entrada, minimizando la curvatura de la superficie. Con este interpolador se ajustó una función a un número específico de puntos vecinos de entrada, mientras pasa a través de puntos de muestreo (ESRI, 1992-2002).

Hancock y otros (2002), utilizaron una variación del interpolador curvaturas mínimas denominado “thin plate spline ” para estimar la media mensual de lluvia de 78 años y compararlas con los promedios obtenidos de los datos base. Los autores estimaron además los errores a partir de “non-diagonal error covariance” (NDEC) y el “pr-standardised diagonal error covariance” (PDEC) por sus siglas en inglés para evaluar la exactitud de las estimaciones. Los resultados muestran que el “thin plate spline” es capaz de predecir promedios de lluvia con un satisfactorio grado de exactitud.

Baigorria, G; Bowen, W; Stoorvogel, J (1999-2000), utilizaron interpoladores espaciales para estimar máximos y mínimos de temperatura, precipitación y radiación solar en ambientes montañosos del Perú. Utilizando datos independientes de cuatro estaciones meteorológicas en la misma cuenca hidrográfica muestran que las estimaciones en temperatura están en concordancia con los datos observados. Por otro lado la precisión de los modelos de precipitación y radiación solar están siendo evaluados, en el momento de la publicación.

En la sección 7 del presente documento se detalla la metodología empleada, donde se describe el cálculo de cada uno de los parámetros del balance hídrico de suelos aplicado.

6 Hidrología

6.1 Parámetros morfométricos de la cuenca

La microcuenca del río Peñas Blancas se sitúa en la vertiente del pacífico de Costa Rica; forma parte de la gran cuenca del río Grande de Térraba la cual desemboca sus aguas en el océano Pacífico; políticamente la microcuenca del río Peñas Blancas abarca parte de los distritos General y Cajón del cantón de Pérez Zeledón; tiene una forma elongada con dirección suroeste; desembocando en el río General prácticamente en el sitio del puente sobre la carretera interamericana sur.

La cuenca del río Peñas Blancas tiene un área de 9.029 hectáreas (90.293.704, 14 m²); con una diferencia de altura de 2594 metros ya que la altura máxima es de 3109 m.s.n.m en el cerro de la divisoria de aguas al nor-este de la microcuenca y una altura mínima de 515 m.s.n.m en la confluencia con el río General a la altura del puente en la carretera interamericana. Los principales ríos y afluentes del río Peñas Blancas en la microcuenca son los ríos Peña Blanquita, Caliente, Calientillo así como también las quebradas Salitrales, Roble y Champulón.

5.1.1 Perímetro y área de la cuenca del río Peñas Blancas

Con base en las curvas a escala 1:25.000 y el modelo de elevación digital elaborado en el SIG; se procedió a delimitar la cuenca del río Peñas Blancas. El perímetro de la misma tiene una longitud de 52.208,97 metros y un área de 9.029 hectáreas (90.293.704, 14 m²).

5.1.2 Índice de factor de forma (F) de la cuenca del río Peñas Blancas

Este índice expresa la relación, entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud (Villón, 2002), es decir:

$$F = \frac{\text{ancho}}{\text{longitud}} = \frac{B}{L}$$

Suponiendo la cuenca del río Peñas Blancas de forma rectangular tenemos que:

$$F = \frac{B \times L}{L \times L} = \frac{A}{L^2}$$

La longitud (L) tienen un valor de 21.500 metros y el área de la cuenca del río Peñas Blancas es de 90.293.704,14 metros cuadrados; por lo tanto aplicando los valores en la fórmula anterior:

$$F = \frac{90.293.704,14}{(21.500)^2} = 0,20$$

Por lo tanto el índice de factor de forma es relativamente bajo, por lo que la cuenca del río Peñas Blancas tiene una tendencia menor a concentrar las intensidades de lluvias, esto debido a su forma alargada provocando que exista una relación mayor entre su largo que su ancho.

5.1.3 Índice de compacidad (índice de Gravelious) de la cuenca del río Peñas Blancas

El índice de compacidad de una cuenca (K), definida por Gravelious (en Villón, 2002), expresa la relación entre el perímetro de la cuenca, y el perímetro

equivalente de una circunferencia, que tiene la misma área de la cuenca del río Peñas Blancas, es decir:

$$K = \frac{\text{Perímetro de la cuenca}}{\text{Perímetro de un círculo de igual área}}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación

$$K = 0,28 \frac{52.268,971}{\sqrt{90.293.704,14}} = 1,54$$

La cuenca del río Peñas Blancas tiene una forma alargada hacia el SW y por lo tanto el índice de compacidad tiene un valor de 1,54, esto reduce la posibilidad de que la cuenca del río Peñas Blancas sea cubierta en su totalidad por una tormenta, ya que el índice de compacidad trata de expresar la influencia del perímetro y el área de la cuenca en la escorrentía; esto que afecta el tipo de respuesta de las avenidas del cauce principal a las precipitaciones fuertes que se presentan en la cuenca del río Peñas Blancas; principalmente cuando las mismas se presentan en la parte alta de la cuenca.

5.1.4 Pendiente del cauce del río Peñas Blancas

Pendiente uniforme: este método considera la pendiente del cauce, como la relación entre el desnivel que hay entre los extremos del cauce y la proyección horizontal de su longitud, es decir:

$$S = \frac{H}{L}$$

Donde:

S = pendiente

H = diferencia de cotas entre los extremos del cauce del río Peñas Blancas, en kilómetros (2,285 – 0,515 = 2,285 km)

L = longitud del cauce, en kilómetros (21,500 km).

Sustituyendo los valores obtenidos:

$$S = \frac{2,285}{21,500} = 0,106$$

De acuerdo a la metodología la pendiente uniforme del cauce tiene un valor de 0,106, lo cual significa que tenga una capacidad energética mayor en la parte media y alta; lo cual aunado a los tipos de roca que atraviesa y a los depósitos aluviales originan rápidos y caídas de agua.

Pendiente utilizando la ecuación de Taylor y Schwarz:: este método considera que el río está formado por *n* tramos de igual longitud, cada uno de ellos con pendiente uniforme, la ecuación para este caso es:

$$S = \frac{N}{1/\sqrt{S_1} + 1/\sqrt{S_2} + \dots + 1/\sqrt{S_n}}$$

Donde:

S = pendiente media del cauce del río Peñas Blancas.

N = número de tramos iguales, en los cuales se subdivide el perfil del río Peñas Blancas (= 25 tramos).

S1, S2;...Sn = pendiente del tramo, según S = H/L.

Los valores calculados para el cauce principal del río Peñas Blancas son los siguientes:

**CUADRO 1 DATOS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE LA PENDIENTE
MEDIA DEL CAUCE DEL RÍO PEÑAS BLANCAS**

ALTITUD (m)	LONGITUD DEL CAUCE (m)	S = H/L	Raiz (S)	1/raiz S
2800	174,68	0,572	0,757	1,322
2700	122,30	0,818	0,904	1,106
2600	118,18	0,846	0,920	1,087
2500	173,09	0,578	0,760	1,316
2400	105,97	0,944	0,971	1,029
2300	210,18	0,476	0,690	1,450
2200	261,40	0,383	0,619	1,617
2100	266,36	0,375	0,613	1,632
2000	417,91	0,239	0,489	2,044
1900	554,53	0,180	0,425	2,355
1800	716,07	0,140	0,374	2,676
1700	470,14	0,213	0,461	2,168
1600	756,90	0,132	0,363	2,751
1500	724,67	0,138	0,371	2,692
1400	1650,22	0,061	0,246	4,062
1300	1072,66	0,093	0,305	3,275
1200	1141,40	0,088	0,296	3,378
1100	1357,26	0,074	0,271	3,684
1000	1207,41	0,083	0,288	3,475
900	1909,73	0,052	0,229	4,370
800	1914,35	0,052	0,229	4,375
700	2751,16	0,036	0,191	5,245
600	1751,80	0,023	0,151	6,618
560	3055,74	0,013	0,114	8,740
520	232,62	0,021	0,147	6,821
515				
				79,289

Sustituyendo los valores obtenidos del cuadro 1 en la ecuación anterior obtenemos que el valor de la pendiente del cauce del río Peñas Blancas es de 0,315.

$$S = \frac{25}{79,289} \quad 0,315$$

Con base en los valores del cuadro 1 se puede analizar que la pendiente del cauce es mayor entre la cota de los 1800 a 2000 metros sobre el nivel de mar; esto se corroboró con las observaciones de campo en donde se observa que el río Peñas Blancas es muy energético en la parte alta de la cuenca debido a su pendiente, forma del terreno y la composición de bloques métricos de lavas e intrusivos en el aluvión; lo que provoca rápidos y muchas caídas de agua.

6

6 Geología

6.1 *Geomorfología de la cuenca del río Peñas Blancas*

La geomorfología es la parte de la geología que estudia las formas del terreno, las describe, tratando de reconstruir los procesos y las etapas que contribuyeron a su formación, determina además los materiales que la componen y la edad de su formación. La geomorfología trata de dar una idea sobre la dinámica de las formas, de su origen, su estado actual y su evolución. La forma del terreno actual es el resultado del proceso geomórfico que actuó sobre rocas diversas bajo diferentes climas, todo relacionado con la estructura, vegetación y el suelo en función del tiempo. Para la caracterización geomorfológico se utiliza tanto el trabajo de campo como de otros métodos; entre los cuales están la fotointerpretación, análisis y modelos matemáticos, dataciones de rocas, (Salazar & Madrigal, 1993).

Uno de los objetivos finales de un estudio geomorfológico es la elaboración de un mapa geomórfico, que en su representación más simple es un mapa de las formas del terreno, en el que se representan las formas fluviales, escarpes de

línea de falla, conos de talus, zonas de deslizamiento, terrazas fluviales, etc (Salazar, 2000).

Con base en los mapas geológicos regionales, las formas del terreno observadas en los recorridos de campo y el modelo de elevación digital elaborado en el SIG; se procedió a delimitar las unidades geomórficas en la cuenca del río Peñas Blancas (Anexo 4, Mapa Geomorfológico); unidades que serán utilizadas para el cálculo del balance hídrico; principal objetivo de este análisis hidrológico.

5.1.1 Formas de origen tectónico erosivo – Cordillera Talamanca

Esta unidad se localiza en la parte norte y nor-este de la cuenca del río Peñas Blancas, tiene pendientes muy fuertes ($> 45^\circ$) y las divisorias de las aguas entre los ríos y las quebradas son angostas; formando valles muy profundos (> 30 metros) y de fuerte pendiente esto debido a la dureza de las rocas volcánicas e intrusivas y a los aspectos geológicos-estructurales de buzamientos y plegamientos a nivel regional de las secuencias sedimentarias. Esta compuesta por rocas sedimentarias (Formación Térraba), volcánicas e intrusivas (Cordillera de Talamanca) y las elevaciones oscilan entre los 1325 y los 2800 metros sobre el nivel del mar. En esta geoforma la pendiente del cauce del río Peñas Blancas es fuerte; provocando que esta zona de la cuenca sea muy energética debido a la composición de bloques métricos de lavas e intrusivos en los aluviones de los ríos y las quebradas, lo que provoca rápidos y muchas caídas de agua de altura moderada debido al estado juvenil de profundización de las rocas y a la alta dureza de las rocas, esto se ve reflejado en la pendiente del cauce principal del río Peñas Blancas, la cual empieza a ser más pronunciada a partir de los 2000 metros de altura; también debido a la alta pendiente del terreno debido a la dureza de las rocas los cauces de los ríos y quebradas afluentes en esta unidad geomorfológico son más cortos pero con una pendiente más fuerte; no se descarta que en la parte alta de la cuenca (cotas mayores a los 2200 metros) existan caídas de agua de alturas considerables.

5.1.2 Conos de Talus (fascies proximales)

Esta unidad se localiza en la parte media de la cuenca del río Peñas Blancas; se tratan de conos de deyección, coalescentes, en formas de abanicos con su ápice o su parte superior apuntando hacia la Cordillera Costeña. Están formados por los depósitos coluviales de los primeros derrames de la Cordillera Costeña (Bergoeing, 1998).

Esta unidad se formó en la zona de transición de la cordillera a la llanura aluvial; tienen pendientes de moderada a fuerte y están compuestos por bloques métricos de rocas volcánicas, intrusivas y sedimentarias sanos y levemente meteorizados englobados en una matriz de textura arenosa-arcillosa; las cuales debido a su tamaño y densidad no pudieron tener un transporte muy significativo en la cuenca; acumulándose como coluvios (conos) en los pie de monte (base de la cordillera), la separación y divisorias entre los cauces es amplia y de pendiente plano –ondulada; ya que debido a la diferencia en la resistencia a la erosión de las rocas se forman patrones de drenajes dicotómicos; el origen de esta geoforma está ligado a la actividad de los glaciares que cubrieron las cimas de la cordillera de Talamanca en el Pleistoceno (Salazar, 2000).

En esta unidad geomórfica la pendiente del cauce del río Peñas Blancas es moderada debido a que empieza la transición de la parte montañosa de la cuenca hacia la zona de los abanicos aluviales; sin embargo el río todavía es muy energético; ya que en los cauces de los ríos y las quebradas hay mucha acumulación de bloques métricos de lavas, rocas sedimentarias y troncos que fueron depositados en las primeras etapas del avance de los glaciares; los cauces son angostos pero profundos; lo que no deja mucho espacio por lo que los aluviones están restringidos estrictamente al cauce de los ríos; originando pequeñas caídas de agua y rápidos de poca extensión.

5.1.3 Conos Aluviales (fascies distales)

Corresponde con las fascies distales de los conos de deyección y se distribuyen en la parte baja de la cuenca del río Peñas Blancas, cubriendo un área de aproximadamente 45 km²; tienen superficies plano onduladas y se observan con lomeríos alargados y aislados debido a la acumulación de bloques de roca sanos y la resistencia de los mismos a la erosión diferencial. Esta geoforma está compuesta por arcillas rojas de descomposición, transportadas desde el pie de monte y ricas en gibsitas y en caolinitas (lateritas); en el interior de la masa arcillosa persisten algunos elementos de cantos rodados, completamente alterados (“fantasmas”); en los cuales es difícil identificar la naturaleza petrográfica, sin embargo, se infiere la composición volcánica y sedimentaria de las rocas que conforman la Cordillera Costeña; (Bergoeing, 1998); los abanicos aluviales son materiales muy antiguos que representan las fascies más distales de los derrames de la Cordillera Costeña. y su origen de está ligado (al igual que los Conos de Talus) a la actividad de los glaciares que cubrieron las cimas de la cordillera de Tamanca en el Pleistoceno (Salazar, 2000).

En esta unidad el río Peñas Blancas ensancha su cauce principal; la pendiente es menor e incluso se puede caminar en muchas secciones de los depósitos aluviales; en los cuales hay paleoterrazas que evidencian diferentes episodios de depositación; el río es un poco menos energético con respecto a la caída por efecto de la pendiente; sin embargo ya ha recibido el agua de los afluentes principales por lo que en esta sección drena un caudal mayor de agua; la cuenca es un poco más ancha en relación a las dos unidades geomórficas anteriores.

En esta unidad el río Peñas Blancas ensancha su cauce principal; la pendiente es menor e incluso se puede caminar en muchas secciones de los depósitos aluviales; en los cuales hay paleoterrazas que evidencian diferentes episodios de depositación; el río es un poco menos energético con respecto a la caída por efecto de la pendiente; sin embargo ya ha recibido el agua de los afluentes principales por lo que en esta sección drena un caudal mayor de agua; la cuenca es un poco más ancha en relación a las dos unidades geomórficas anteriores.

5.1.4 Terrazas aluviales recientes

Sobre la geoforma de los abanicos aluviales los cauces activos de los principales ríos de la cuenca han depositado sedimentos recientes formando terrazas en las partes planas; con profundidades de hasta 3 metros y ancho de los ríos de más de 10 metros; en donde se observan las diferentes etapas de despositación de los bloques de roca y las arenas gruesas y medias; están compuestos por bloques de rocas volcánicas, intrusivas y sedimentarias redondeados y de alta esfericidad en su mayoría sanas, englobados en una matriz arenosa – arcillosa; dentro de la cuenca destacan los depósitos aluviales del río Peñas Blancas.

6.2 Formaciones Geológicas en la cuenca del río Peñas Blancas

El Mapa Geológico de la (Anexo 5); se basó en la información de Tournon & Alvarado, (1995) y en el análisis de campo en los afloramientos observados en los recorridos hechos por la cuenca del río Peñas Blancas y alrededores. Se han conservado las unidades estratigráficas formales regionales; las cuales se describen a continuación.

5.2.1 Cordillera de Tamanca

En la cordillera de Tamanca afloran rocas volcánicas y plutónicas (intrusivas) muy variadas que de acuerdo a su edad y composición química se pueden agrupar por lo menos en tres unidades (Kussmaul, 2000); basados en el Mapa Geológico a escala 1:200000 (Tournon & Alvarado, 1995); sobre esta cordillera y tipos de roca nace el cauce principal del río Peñas Blancas y sus afluentes principales; en el recorrido de campo se observó un afloramiento de lavas andesíticas (coordenadas Lambert norte 581854W y 147825N), son rocas de color azul oscuro a negro, de textura afanítica porfirítica con fenocristales de

plagioclasas y ceolitas relleno de las fracturas, la matriz es de grano muy fino; la roca fresca es muy dura; sin embargo el afloramiento anlizado presenta un alto grado de fracturamiento.

La roca meteorizada es de color rojizo y morado, con pátinas de limonita y hematita en las fracturas; se aclara que de acuerdo al mapa geológico regional utilizada en este estudio; el afloramiento de estas rocas se localiza sobre la Formación Valle de El General; sin embargo de tiene que estudiar con más detalle el cartografiado geológico de la cuenca.

En la zona noreste de la cuenca se observó un afloramiento de una zona con alteración hidrotermal; es una zona de falla con alteración argilítica conteniendo una brecha monomíctica compuesta de clastos subangulares de tamaños centimétricos de lavas andesíticas; los bloques tienen texturas afaníticas porfiríticas y algunos tienen un alto grado de alteración; sin embargo otros están sanos; los mismos están englobados en una matriz arcillosa de color blanco; se observa pirita y cloritas; el afloramiento de situa en la coordenada Lambert norte de 581742W y 1190N del mapa geológico.

5.2.2 Formación Térraba

Consiste en una secuencia compuesta por lutitas, limonitas y areniscas calcáreas de color gris oscuro a negro, que se encuentran bien expuestas en el río Térraba, entre la boca del río Changuinola y el paso de El Cajón. Su edad es del Oligoceno al Mioceno Inferior, determinada con base en su contenido faunístico, (Linkimer & Aguilar, 2000).

En la zona NE del cuenca del río Peñas Blancas; en las coordenadas Lambert norte de 580459W y 153209N se observó un afloramiento de rocas sedimentarias de la Formación Térraba; se trata de una secuencia de intercalaciones de paquetes con espesores centimétricos de arenas finas a gruesas, con niveles de limolitas y lutitas; en general las rocas son de color gris

verdoso y están muy fracturadas, con pátinas de color anaranjado, rojizo y negras. Hay algunos niveles que no están muy litificados y los sedimentos se disgregan fácilmente al tacto con los dedos de las manos, son niveles de arenas medias a gruesas; se midió un buzamiento con una dirección de inclinación $067^{\circ}/30^{\circ}$; esta formación geológica está en contacto discordante con las rocas volcánicas e intrusivas de la Cordillera de Tamanca.

5.2.3 Formación Valle de El General

Esta formación definida por Dóndoli (1943) citado en Linkimer & Aguilar (2000) como "Terrazas compuestas por materiales aluvionales en su mayoría de origen volcánico". Castillo (1978, en Linkimer & Aguilar, 2000) la define formalmente como "Formación Valle de El General" dividiéndola en Miembro no laterítico Valle de El General en la base y Miembro Laterítico Valle de El General en la parte superior.

Se le asigna una edad principalmente pleistocénica. Sobreyace en discordancia angular a la Formación Curré y a la unidad Vulcanitas de Tamanca; el tipo de contacto con la Formación Paso real se desconoce y su espesor estimado es de 200 a 400 metros (Linkimer & Aguilar, 2000). La Formación El General es sobreyacida únicamente por depósitos superficiales (aluviones) del Cuaternario (Mora, 1979; en Campos et.al., 1984).

5.2.4 Aluviones recientes

Sobreyacen en forma concordante sobre la Formación Valle de El General; se han depositado sobre los cauces activos y abandonados de los principales ríos de la cuenca; conformando terrazas recientes en las partes planas; con espesores de 3 a 5 metros; en donde se observan las diferentes etapas de deposición durante el cuaternario reciente; están compuestos por bloques de rocas volcánicas, intrusivas y sedimentarias; son redondeados y de alta

esfericidad lo que evidencia su alto grado de arrastre desde la parte alta de la cuenca; en su mayoría sanas, englobados en una matriz arenosa – arcillosa; dentro de la cuenca destacan los depósitos aluviales del río Peñas Blancas.

6 Hidrogeología

6.1 Aguas subterráneas

El término aguas subterráneas se aplica a toda el agua que, después de infiltrarse a través del suelo, penetra, se mueve y se almacena en las rocas infrayacentes (acuíferos). El agua subterránea en un 99% del total, proviene del agua meteórica, la cual ha alcanzado el acuífero después de infiltrarse a través del suelo sobre el cual se precipita en forma de lluvia o por haber circulado por el lecho de un río influente o sea un río que le aporta agua al acuífero, (Mora & Valverde, 2005).

6.2 Acuíferos, definición y clasificación

Un acuífero es un cuerpo rocoso o formación geológica que permite almacenar y transmitir agua y que rinde cantidades de ésta para ser utilizada como fuente de abastecimiento. La capacidad de transmitir y almacenar el agua se mide por medio de los parámetros hidráulicos de permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento; (Vargas, 2000).

Los acuíferos se pueden clasificar de acuerdo a sus espacios vacíos como acuíferos porosos o fisurados; estos últimos se pueden caracterizar como acuíferos volcánicos o sedimentarios, dependiendo del tipo de roca que los forman. De acuerdo a la presión a la que está sometida el agua contenida en el acuífero se le puede clasificar como acuífero libre, confinado o semiconfinado; (Vargas, 2000).

6.3 Pozos perforados

Se realizó una investigación en las bases de datos del Área de Aguas Subterráneas del Senara y el Departamento de Aguas Subterráneas de la Dirección de Acueductos Rurales del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, con el objetivo de obtener información de las condiciones acuíferas de las rocas contenidas dentro de la cuenca del río Peñas Blancas, la información la encontramos en el Cuadro 6 y su ubicación en el Mapa Hidrogeológico del Anexo 6:

CUADRO 6. POZOS PERFORADOS REPORTADOS EN EL CANTÓN DE PÉREZ ZELEDÓN

POZO	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN	PROPIETARIO
RE-001	139495	576754	520	COOPETUR
RE-011	144547	579396	723	BANCO DEL ISTMO COSTA RICA
RE-004	143845	573554	605	CERDOS DEL SUR S.A
RE-008	141274	578168	550	BANCO DEL ISTMO COSTA RICA
RE-009	142632	579772	640	BANCO DEL ISTMO COSTA RICA
SD-010	147156	577060	730	CENTRO DE SERVICIOS EQUI.P
Pozo N° 07-04	137588	579599	480	AyA
Pozo N° 07-03	139266	578415	600	AyA

(Fuente: Senara y AyA, 2007).

Como se puede observar en el Mapa Hidrogeológico no existen muchos pozos perforados reportados en la cuenca del río Peñas Blancas tan solo los pozos RE-008, RE-009, RE-011 y el SD-010 se encuentran localizados dentro de la cuenca, lo que evidencia el bajo potencial acuífero de los abanicos aluviales de la Formación Valle de El General.

A partir de la perforación de los pozos N°07-03 y N°07-04, por parte del del AyA para la ASADA de la Comunidad de Cajón, el Geol. Carlos Vargas expresó que el acuífero lo más que puede rendir es un caudal bajo (Vargas, comunicación personal, 2007).

6.4 Hidrogeología regional

Se revisó la información hidrogeológica disponible en el Área de Aguas Subterráneas del SENARA, el Departamento de Aguas del MINAE, la Escuela Centroamérica de Geología de la Universidad de Costa Rica y en el Departamento de Gestión Ambiental (Sección Hidrogeología) del AyA y no existen trabajos hidrogeológicos locales (publicaciones a escala 1:25.000 o menos); en los cuales se hayan estudiado y caracterizado en detalle las características hidrogeológicas de las rocas volcánicas y sedimentarias que se localizan en la cuenca del río Peñas Blancas; por lo tanto se procedió a realizar una caracterización de la geoaptitud hidrogeológica de las rocas desde el punto de vista del potencial acuífero.

5.4.1 Acuíferos ausentes en rocas volcánicas e intrusivas

En esta unidad se agrupan las rocas volcánicas de la cordillera de Talamanca; que se clasifican de bajo a muy bajo potencial acuífero, el bajo potencial se debe a la baja porosidad y permeabilidad ya que las rocas son muy masivas y están afectadas por alteración hidrotermal que rellena las fracturas con arcillas y minerales secundarios.

5.4.2 Acuíferos fracturados en rocas sedimentarias (bajo potencial acuífero)

Las rocas sedimentarias de la Formación Térraba son secuencias de areniscas y lutitas calcáreas; que se clasifican con un potencial acuífero de medio a bajo; puede presentar permeabilidades medias debido al fracturamiento de las rocas; sin embargo la misma se puede ver afectada por la precipitación del carbonato

de calcio en las fracturas; no se reporta la formación de manantiales que brotan de estas rocas.

5.4.3 Acuíferos porosos en rocas sedimentarias (medio a bajo potencial)

Dentro de este grupo se clasifican las rocas de la Formación Valle del General; a pesar de tratarse de rocas cuaternarios de origen coluvio-aluvial son rocas que tienen un potencial acuífero de medio a muy bajo, esto se debe a que la porosidad y permeabilidad se ve muy disminuida por las texturas arcillosas de la matriz (suelos lateríticos) y el contacto de los granos y bloques es por la matriz; las cuales provocan que el potencial de recarga directa de la lluvia hacia los acuíferos sea muy pobre, favoreciendo la esorrentía hacia los drenajes superficiales. El bajo potencial se ve reflejado en los escasos pozos perforados reportados los cuales rinden caudales entre 0,5 y 1 litro/segundo, el espesor para estas rocas reportado en los pozos oscila entre los 65 y 80 metros.

5.4.4 Concesiones de agua superficial en la cuenca del río Peñas Blancas

Se investigó los expedientes de las concesiones de agua en la base de datos del Departamento de Aguas del MINAE; los principales datos están en el cuadro y la ubicación en el Mapa Hidrogeológico, (Anexo 6).

**CUADRO 2. CONCESIONES DE AGUA SUPERFICIAL EN LA
CUENCA DEL RÍO PEÑAS BLANCAS**

EXP.	FUENTE	Y	X	Q (l/s)	NOMBRE	ESTADO
310H	RIO PEÑAS BLANCAS	142600	576690	140,00	HERMANOS ESQUIVEL RAMIREZ	CANCELADO POR VENCIMIENTO INSCRITO
340R	NACIMIENT O FUENTE	146051	577033	1671,3 6	AYA	OTORGADO
7297A	RIO CALIENTILL O	145320	577750	17,00	VIVEROS Y DESARROLLO S AGRICOLAS S.A	OTORGADO
7297A	RIO CALIENTILL O	147130	582250	18,00	VIVEROS Y DESARROLLO S AGRICOLAS S.A	OTORGADO
7397A	PEÑAS BLANCAS	143951	577037	400,00	COOPERATIV A AGRICOLA INDUSTRIAL EL	OTORGADO
8138A	QUEBRADA	139800	577346		JUDITH ZAMORA RODRIGUEZ	CANCELADO
11323A	NACIMIENT O	145820	577250	0,10	ALVARADO CAMPOS S.A	OTORGADO
11620A	RIO CALIENTILL O	147111	581782		VERDE VIGOR S.A	EN TRAMITE
11838P	POZO ARTESANAL	142550	577040	0,50	BANEX S.A	INSCRITO
12390A	NACIMIENT O	148752	577127		ANA MERCEDES HERRERA VALVERDE	EN TRAMITE
TOTAL				2250		

Fuente: Departamento de Aguas del MINAE, 2007

Por lo tanto, con base en la información de los doce expedientes del Departamento de Aguas del MINAE; la extracción concesionada (“legal”) en la cuenca del río Peñas Blancas es de aproximadamente 2.250 litros por segundo.

6

6 Balance hídrico de suelos para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos

6.1 Precipitación

La precipitación y sus diferentes manifestaciones (lluvia, granizo, nieve) se produce para el caso de Costa Rica cuando grandes masas de aire experimentan un descenso uniforme en la temperatura por debajo del punto de rocío, es decir el momento donde las moléculas de aire cargadas de humedad se juntan hasta formar gotas de tamaño en el cual se ven obligadas a caer por la fuerza de la gravedad. Muchas veces el proceso de enfriamiento de las masas de aire se produce por convección, ascenso orográfico, convergencia de masas de aire, frentes fríos o cálidos y ciclones (Heuvldop, y otros, 1986).

En Costa Rica gran parte de la precipitación se debe a la influencia de la zona de convergencia intertropical (ZCI) que es una franja donde interactúan vientos provenientes del Noreste en el Hemisferio Norte con los vientos Oestes provenientes del Hemisferio Sur.

Cuando las ZCI se encuentra desplazada hacia el norte, la confluencia de los vientos se presenta hacia el norte de Costa Rica. Esto produce que los vientos del suroeste sean los predominantes, produciendo precipitaciones de tipo pacífico¹: es decir con una época lluviosa y seca bien definida, la lluviosa desde mayo octubre, presentando los máximos de precipitación en los meses de junio, setiembre y octubre y la seca de diciembre a marzo con abril y noviembre como mes de transición entre las épocas.

¹ Una época lluviosa y seca bien definida, la lluviosa desde mayo octubre, presentando los Máximos de precipitación en los meses de junio, setiembre y octubre y la seca de diciembre a marzo con abril y noviembre como mes de transición entre las épocas

Cuando la ZCI se encuentra desplazada al sur de Costa Rica la vertiente pacífica de Costa Rica, se encuentra a sotavento de los vientos provenientes del noreste, es decir se encuentra del lado opuesto al paso de los vientos que pasan por el sistema montañoso central (Cordillera de Talamanca y Volcánica Central). En este tiempo estos vientos pasan desprovistos de humedad provocando una estación seca marcada en gran parte de la Vertiente Pacífica, siendo una excepción la Península de Osa. Por otro lado cuando la ZCI se encuentra desplazada al Norte de Costa Rica se producen copiosas lluvias que dan paso a la estación lluviosa, debido al choque de las masas de viento provenientes del Oeste con la parte terrestre en el Pacífico.

El Fenómeno ENOS (El Niño/Oscilación del Sur) es el nombre que se da a un calentamiento anormal de las aguas ecuatoriales del Pacífico, y forma parte de un ciclo oceánico-atmosférico que consiste en el enfriamiento y calentamiento anómalos de las aguas superficiales del océano Pacífico ecuatorial. El ENOS está relacionado no solo con trastornos climáticos en muchas partes del mundo, sino también con alteraciones significativas en ecosistemas tanto terrestres como marinos (Stolz, 2004). El impacto del ENOS en Costa Rica es muy variado, sin embargo, existen efectos bien definidos cuando la intensidad de la fase cálida del ENOS (El Niño) es fuerte, tal y como sucedió en 1982 y 1997; los valores acumulados de precipitación en la vertiente del Pacífico tienden a ser mucho menores que lo normal (Stolz, 2004).

Con relación a la fase fría, el mismo autor señala que este fenómeno contribuye al aumento de la cantidad de sistemas tropicales en la Cuenca del Atlántico y que en los últimos cinco años se han formado en el mar Caribe dos huracanes muy importantes: César en 1996 y Mitch en 1998. El huracán César fue uno de los huracanes más destructivos en la historia costarricense, afectando severamente al Pacífico Sur. El huracán Mitch, por su parte, está considerado el huracán más destructivo en la historia centroamericana, afectando fuertemente a Costa Rica en lo que a precipitaciones se refiere. Por su parte, también las

temperaturas extremas se ven afectadas, observándose temperaturas por encima de lo normal están ligadas al fenómeno del Niño, (Stolz, 2004).

La precipitación es un elemento de mucha variación en el tiempo y en el espacio; no siempre está presente ni ocurre en todas partes por igual. La precipitación es un elemento del clima que influye en la estructura y función de los ecosistemas. Existen diferentes tipos de precipitación, siendo una de ellas la lluvia. En el presente estudio solo se aborda la precipitación en forma de lluvia.

La precipitación se mide en milímetros (mm), lo que corresponde a la altura que alcanza un litro de agua en un m², así un mm de lluvia significa que ha caído un litro de agua por metro cuadrado. Para el análisis de la precipitación se contó con los datos de 26 estaciones meteorológicas (ver anexo 1).

Con los datos mensuales y un SIG se realizó una interpolación utilizando el módulo “spline” o curvaturas mínimas, para generar la superficie estadística con valores continuos de precipitación en celdas de 15*15 metros.

El total de precipitación para la cuenca es de 4069.6 mm anuales siendo los meses más lluviosos agosto, septiembre y octubre, donde ocurre el 41.4% de la precipitación anual. En estos meses la presencia de algún huracán, ya sea en el Atlántico o en el Pacífico incrementaría los promedios mensuales, empeorando las condiciones del tiempo en forma rigurosa; a tal punto que durante 2,3 o 4 días no brillará el sol, persistiendo lluvias torrenciales con posibles inundaciones. Los máximos de precipitación en estos tres meses se dan en la parte media alta de la cuenca.

En los mes de noviembre y diciembre, descienden las precipitaciones y el buen tiempo empieza a generalizarse en la cuenca. Sin embargo, en las cumbres montañosas, las masas de viento alisio procedentes del Caribe producen todavía precipitaciones considerables.

En enero, febrero y marzo predominan vientos alisios del noreste; estos, a través del fenómeno de inversión de temperaturas, impiden el desarrollo de sistemas

convectivos, y mas bien dan lugar a días soleados. En estos meses se da el 5% de la precipitación promedio anual la cual se ubica fundamental mente en la zona montañosa, propiamente en el Parque Nacional Chirripó.

A finales de marzo y propiamente en abril inicia la estación lluviosa, desplazándose los máximos de lluvia de abril a la zona media alta de la cuenca.

Para mayo la zona de Convergencia Intertropical (ZCI) ya afecta a todo el país. Las lluvias se generalizan en todo el territorio, y cesa la estación seca. En la cuenca en las tardes predomina viento oeste ecuatorial, proveniente del Océano Pacífico, lo que provoca un pico de precipitación de 559.1 mm.

En julio se obstruye el desarrollo de nubes convectivas por un descenso de los vientos del Pacífico y desciende la precipitación a 316.5 mm. Este descenso se conoce como el veranillo de San Juan.

6.2 Evapotranspiración (potencial y real)

Evapotranspiración es el agua perdida a la atmósfera por dos procesos: evaporación y transpiración. La evaporación es la pérdida de aguas abiertas de superficie, tales como lagos y depósitos, humedales, suelo pelado, y cubierta de la nieve; la transpiración es la pérdida de agua por los seres vivos, más significativamente por las plantas. Varios son los factores que afectan el proceso del evapotranspiración; entre ellos las características físicas del agua, del suelo, de la nieve, y de la superficie de la planta también (Hanson,1991; Holdridge, 1982; Reynolds, 1997, Heuveltop y otros, 1986). Aparte de la precipitación, la evapotranspiración es el componente principal en el balance hídrico.

Los factores más importantes incluyen en la evapotranspiración son la radiación solar neta, el área superficial de aguas de superficie abiertas, velocidad del viento, densidad y tipo de cubierta vegetativa, disponibilidad de la humedad del

suelo, profundidad raíces, las características reflexivas de la tierra-superficie, y estación del año (Hanson,1991; Reynolds, 1997, Heuvelop y otros, 1986). Para Sumioka y Bauer, (2003) los factores que controlan el evapotranspiración son: temperatura del aire, radiación de la onda corta, velocidad del viento, tipo del suelo y tipo de la vegetación (Sumioka y Bauer, 2003).

Durante los periodos de lluvia, el agua contenida en el suelo es eliminada gradualmente por un doble proceso de secado. En primer lugar una evaporación directa al aire libre en la superficie del suelo, que se extiende progresivamente a niveles inferiores. El aire también penetra libremente en el suelo y puede ser forzado alternativamente a salir y entrar por los cambios de presión atmosférica. Incluso si el suelo no "respirase" de este modo, existirla una lenta difusión de vapor de agua hacia la superficie a través de los poros abiertos del suelo se abrirían, únicamente se secan por evaporación !os primeros 30 cm de suelo en una sola estación seca, pero en la prolongada sequía de unos desiertos el secado se extiende a profundidades de varios metros. En segunde lugar, las plantas absorben el agua de infiltración a través de sus numerosas y delgadas raíces. Esta agua, después de ascender por el tallo y las ramas, penetra en las hojas, donde es descargada a la atmósfera en forma de vapor de agua a través de los poros de las mismas en un proceso denominado *transpiración*. Es difícil ser consiente de las enormes cantidades de agua cedida por las plantas en su proceso de transpiración.

En estudios del clima y de hidrología es conveniente usar el término *evapotranspiración* para abarcar la combinación de pérdida de humedad por evaporación directa y por transpiración de las plantas. La proporción de evapotranspiración se reduce a medida que se merma la humedad del suelo durante un periodo estiaje, porque las plantas emplean diversos mecanismos para reducir la transpiración. Por lo general, cuanto menor es la humedad que queda, mas lenta es la pérdida por evapotranspiración. Consecuentemente, es necesario definir dos formas de evapotranspiración: 1) *Evapotranspiración neta o potencial (en adelante ETp*, que es la máxima pérdida posible de agua bajo las

condiciones dadas de cobertura vegetal y de factores climáticos, suponiendo que podemos suministrar al suelo, mediante irrigación, dada el agua que las plantas puedan consumir y los poros del suelo puedan albergar. 2) *Evapotranspiración real* (ETr) que es la cantidad de evapotranspiración real u observada y disminuye en proporción a medida que se agota la humedad del suelo.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, primeramente se utilizó las ecuaciones de regresión propuestas por Herrera (1988), que estiman la temperatura máximas, mínimas y promedias (ver anexo 3). Estas ecuaciones están ajustadas para la vertiente pacífica de Costa Rica y se pueden utilizar cuando existen vacíos de información. Este es el caso de la cuenca del Río Peñas Blancas que no posee esta información en la parte media alta de la microcuenca.

Propiamente, para este trabajo el cálculo de la evapotranspiración potencial se realizó con la fórmula propuesta por Hargreaves (1981), como sigue:

$$ET_p = [(K * RA * \sqrt{TD}) * (0.0075)] * [32 + (1.8 * Temp) * N] \quad \text{ec. 1}$$

Donde:

ET_p, es la evapotranspiración media mensual

RA, es la radiación extraterrestre en el tope de la atmósfera

K; Concete con valores de 0.17 a 0.18 para climas húmedos

TD, diferencia entre la temperatura máxima media y mínima media mensual (°C)

N, número de días del mes.

Con base en los cálculos realizados el valor promedio anual de la evapotranspiración potencial es de 1523,29 mm; por su parte la evapotranspiración real se obtuvo en el proceso del balance hídrico de suelos y tiene un valor de 1331,38 mm promedio anual.

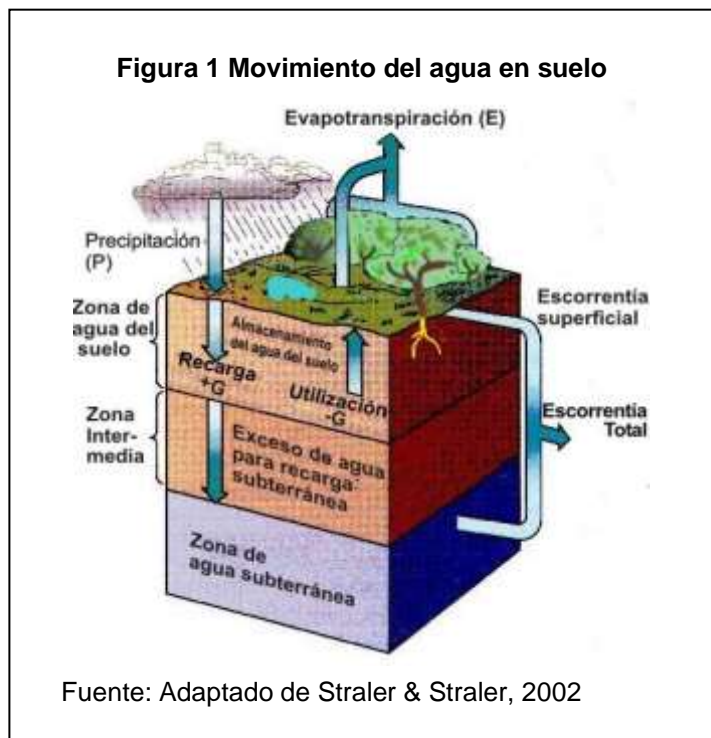
Es a partir del mes de diciembre y hasta febrero que la ETp es mayor que ETr, indicando que no existe suficiente agua en la cuenca para satisfacer la necesidad teórica de agua. Con la llegada de las precipitaciones, a partir de abril y hasta noviembre, la ETp y ETr son iguales. Generalmente la ETp es constante a lo largo del año, esto por la particularidad de que Costa Rica es un país isotermal. Solamente se presenta un ligero descenso de la ETp en enero y febrero, caso contrario a la ETr que para febrero y marzo tiene los valores más bajos 34.7 y 44.7 mm.

6.3 Infiltración potencial

Cuando el agua toca el suelo, esta desciende por gravedad a través de los poros del suelo, humedeciendo sucesivamente niveles inferiores los orificios del suelo, que se llenan pronto con esta agua, excepto aquellos que contienen aire atrapado en forma de burbujas. Los suelos, son capaces de absorber el agua de lluvias ligeras o moderadas mediante un proceso denominado infiltración (Soil Science Society of America, 2001).

Cuando el agua de infiltración sigue hacia abajo en dirección al lecho rocoso. El exceso de agua de continuará fluyendo hacia abajo, pero una parte de ella queda adherida a las partículas del suelo resistente la atracción de la gravedad mediante una fuerza denominada tensión capilar, (Straler & Straler, 2002).

Cuando un suelo se ha saturado de agua, esta va descendiendo por gravedad hasta que ya no sigue



removiéndose en este sentido, por eso es que se dice que el suelo es poseedor de una determinada capacidad de retención de agua.

La capacidad de retención se le denomina también **capacidad de campo**, y esta es el contenido en humedad de un suelo sometido a drenaje libre después de un riego intenso o fuertes lluvias durante 2 o tres días, la capacidad de campo se ha relacionado con la retención de humedad a un determinado potencial métrico, a menudo de 0,33 bar (33 kPa) en suelos de textura fina y de 0,1 bar (10 kPa) en suelos de textura gruesa (Forsythe, 1985, Heuveldop y otros, 1986, Saxton y otros, 2004). La variación en los porcentajes de capacidad de campo dependen de la textura del particular del suelo (Saxton & otros, 2004).

La capacidad de retención de un suelo determinado, depende grandemente de su textura, un suelo arenoso tiene una capacidad de retención muy baja, mientras que uno arcilloso la posee considerablemente alta (Straler & Straler, 2002, Saxton, y otros, 2004). Los suelos arenosos alcanzan su capacidad de retención muy rápidamente, debida a la facilidad con que penetra el agua y a la baja cantidad requerida (Straler & Straler, 2002). Los suelos arcillosos necesitan de largos periodos de lluvia para alcanzar su capacidad de retención debido a que la infiltración es lenta y la cantidad total que deben absorber es grande (Straler & Straler, 2002).

La capacidad de campo se obtuvo de las mediciones directas de laboratorio del porcentaje por peso de suelo seco y se convirtieron a mm. Para la cuenca se interpolaron los valores y se obtuvo un mapa raster. Los valores menores son de 406 mm, los mayores son de 945 mm, para un promedio de 710 mm de capacidad de campo..

Un parámetro relacionado con las plantas y la agricultura, que también es una medida de la humedad del suelo es el **punto de marchitez**. Esta se define como la cantidad de agua de infiltración por debajo de la cual las plantas se ven imposibilitadas a extraer más humedad del suelo y sus hojas se marchitan, el

punto depende también del tamaño de las partículas del suelo (Heuveldop & otros 1986; Forsythe, 1985).

El proceso para obtener el parámetro del punto de marchites fue similar a la capacidad de campo. Los valores fueron de 348 mm el mínimo, 745 el máximo y 590 el promedio.

En general, los suelos tienen pasadizos naturales entre las partículas del suelo mal encajadas y también aberturas mayores, tales como grietas de la tierra resultantes de la desecación del suelo, orificios producidos por gusanos y animales, cavidades precedentes de la putrefacción de las raíces de las plantas y aberturas debidas a enrizamientos y hundimientos del suelo producidos por el alternativo crecimiento y fusión de los cristales de hielo. Una alfombra de hojas y ramas caídas amortigua la fuerza de las gotas que caen y ayudan a conservar abiertos esos orificios, (sobre este punto se detalla más ampliamente más adelante). Si la lluvia cae demasiado de prisa para ser absorbida, corre hacia abajo a través de estas cavidades del suelo, el exceso sobrante fluye en forma de una película o lámina de agua superficial que sigue la dirección de los declives del terreno y da lugar a un proceso de desagüe denominado escorrentía, (Straler & Straler, 2002).

La infiltración puede ser considerada como la velocidad a la que desciende el nivel del agua en el mismo recipiente si el agua se saliera a través de una base porosa, esta medida se expresa en milímetros por hora y (Soil Science Society of America, 2001).

En otras palabras, la infiltración es el proceso por el cuál el agua penetra en el suelo y es uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico (Cerdá, 1996; citado por Kunst, 2003). A partir de este parámetro se pueden definir muchos elementos de manejo de una cuenca hidrográfica, donde se incluyan todos los usuarios del dicho recurso.

6.4 Escorrentía superficial

El escurrimiento es un componente del ciclo hidrológico y se define como el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (estación de aforo). El escurrimiento superficial es aquel que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo, el efecto sobre el escurrimiento total es inmediato y existirá durante la tormenta e inmediatamente después de que esta termine, la parte de la precipitación total que da lugar a este escurrimiento se denomina precipitación en exceso (Villón, 2002).

La escorrentía superficial es la porción de precipitación o de agua de irrigación que no infiltra, sino que por el contrario se descarga en un área específica. Esta puede ser superficial y sub superficial (Soil Science Society of America, 2001). El desagüe por escorrentía también se mide en milímetros por hora, y puede considerarse como la cantidad de agua que rebosa un recipiente por hora cuando llueve demasiado de prisa para que pueda ser absorbida por infiltración a través de la base (Straler & Straler, 2002).

La facilidad de la lluvia para infiltrarse, es generalmente grande al comienzo de una lluvia que ha sido precedida por un periodo de sequía, pero disminuye rápidamente a medida que sigue lloviendo y se empapa el suelo. Después de varias horas la capacidad de infiltración del suelo llega a ser casi constante. La razón de este alto valor inicial y de su rápido descenso es, desde luego, que las aberturas del suelo son obstruidas rápidamente por partículas arrastradas desde arriba, o tienden a taponearse a medida que las arcillas coloidales absorben agua y aumentan de volumen. Según esto, podemos fácilmente deducir que un suelo arenoso con poca arcilla o carente de ella no sufrirá un descenso tan acusado de su capacidad de infiltración, sino que continuará permitiendo indefinidamente el paso del agua en proporción considerable. Por el contrario, el

suelo rico en arcilla es rápidamente obstruido hasta el punto de permitir solamente una infiltración muy lenta, (Straler & Straler, 2000).

La esorrentía se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

$$Esc=P-Ret-Pi$$

Donde:

Esc, es la esorrentía superficial

P, es la precipitación media mensual

Ret, es la retención de la lluvia que no toca suelo

Pi, es la infiltración pluvial mensual

Los parámetros de Ret y Pi se detallan más adelante.

La cuenca posee una esorrentía superficial total anual de 1034.6 mm, la cual está muy mal distribuida a lo largo del año. En el gráfico 1, se presenta la distribución mensual de esta variable.

Como es de esperar existe una alta correlación entre la precipitación y la esorrentía. Los valores más bajos son para los meses de diciembre a marzo, donde ocurre únicamente el 8% (78.6 mm) de la esorrentía. Caso contrario para los meses de agosto, septiembre y octubre se da el 42% de la esorrentía superficial.

6.5 Otros parámetros tomados en cuenta

Para entender la dinámica y las relaciones que intervienen en el movimiento del agua en el suelo y específicamente el proceso de infiltración, se debe diferenciar entre las condiciones más estáticas o elementos generales determinantes y la respuesta hidrológica a un evento específico.

Para Heuvelop y otros (1986) los diferentes caminos que sigue el agua varían según el tipo de cobertura, tipo de suelo, la pendiente y la intensidad de la precipitación (Heuvelop y otros, 1986).

Por su parte Sumioka y Bauer (2003) indican que la recarga al agua subterránea por precipitación (filtración profunda, o percolación) en los horizontes del suelo hasta la zona de la tabla del agua está influenciada por factores como la duración e intensidad de la tormenta, cubierta de tierra, las características del suelo, y grueso de la zona no saturada (Sumioka & Bauer, 2003).

En términos generales la respuesta hidrológica a un determinado evento depende de la duración e intensidad del evento de lluvia, la geomorfología de cuenca, contenido de humedad del suelo antes de evento lluvia, condición y estado de la superficie del suelo, por último de la condición y estado de la vegetación.

Como se puede notar esta respuesta corresponde a la suma de las condiciones estáticas o elementos generales determinantes mencionadas en el párrafo tras anterior, sumado a condiciones particulares (como intensidad y duración, por ejemplo). Se hace esta diferenciación pues ambas forman parte de una misma cosa, sin embargo, las condiciones estáticas (relativamente) sirven para aislar las relaciones generales que interfieren en el proceso de infiltración.

6.6 Textura del suelo

La textura del suelo se refiere al tamaño de las partículas que lo conforman (Mata y Quevedo, 1997). Según el Departamento de Agricultura de Estado Unidos las fracciones dispersadas del tamaño de los diámetros de las partículas del suelo en son para la arcilla $< 2 \mu\text{m}$, del limo de $2 \mu\text{m}$ a $50 \mu\text{m}$ y de la arena de 50 a $2000 \mu\text{m}^2$.

² $1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$

El potencial de agua del suelo y la relación hidráulica de la conductividad con el contenido de humedad son necesarios para muchos los estudios de la planta y del complejo suelo-agua. La medida de estas relaciones es costosa, difícil, y a menudo impráctica. Para Saxton y otros (2004), la textura permite realizar para muchos propósitos, estimaciones generales basadas en dicha información, que resulta más fácilmente disponible. Según Forsythe, (1985) la textura se ha utilizado no solo para diagnosticar propiedades físicas como retención de humedad, la consistencia y la infiltración, si no otras propiedades químicas como la capacidad de intercambio catiónico, (Forsythe, 1985).

Saxton y otros (2004) define la conductividad hidráulica como la capacidad del agua de moverse en medio de la matriz del suelo por la gravitación, indicando que esta propiedad depende de la textura del suelo y del contenido de humedad.

Para determinar la textura del suelo se realizó un trabajo de campo y se obtuvieron 23 muestras de suelo en diferentes zonas de la cuenca del río Peñas Blancas y alrededores; con el fin de tener una mayor cobertura con respecto a las unidades geomorfológicas definidas; los ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos del Instituto de Investigaciones Forestales de la Universidad Nacional (INISEFOR) y la información resumida se encuentra en el cuadro siguiente:

**CUADRO 3 TEXTURA DE LOS SUELOS, CUENCA DEL RÍO PEÑAS BLANCAS
PÉREZ ZELEDÓN**

Código	Textura			Nombre	Retención humedad (%)		
	% Arcilla	%Arena	%Limo		PMP	CC	A. Util
PBSI-1	45,8	16	38,2	Arcilla	25,7	32,6	6,9
PBSI-2	24,4	10	65,6	Franco Arcillo Arenoso	32,5	42,6	10,1
PBSI-3	53,8	28	18,2	Arcilla	18,5	24,1	5,6
PBSI-4	32,4	14	53,6	Franco Arcillo Arenoso	32,5	48,4	15,9
PBSI-5	29,8	34	36,2	Franco Arcilloso	28,1	33,8	5,6
PBSI-6	53,8	18	28,2	Arcilla	20,6	24,6	4,1
PBSI-7	25,8	12	62,2	Franco Arcillo Arenoso	24,5	35,9	11,5
PBSI-8	25,8	20	54,2	Franco Arcillo Arenoso	25,2	27,4	2,2
PBSI-9	30,4	22	47,6	Franco Arcillo Arenoso	24,2	30,0	5,8
PBSI-10	57,8	14	28,2	Arcilla	20,0	25,5	5,5
PBSI-11	53,8	26	20,2	Arcilla	16,1	25,7	9,6
PBSI-12	30,4	26	43,6	Franco Arcilloso	28,1	40,5	12,4
PBSI-13	38,4	28	33,6	Franco Arcilloso	38,3	39,9	1,6
PBSI-14	27	23,4	49,6	Franco Arcillo Arenoso	28,8	30,4	1,6
PBSI-15	21	15,4	63,6	Franco Arcillo Arenoso	40,7	41,5	0,8
PBSI-16	62,4	20	17,6	Arcilla	27,1	28,4	1,3
PBSI-17	27	21,4	51,6	Franco Arcillo Arenoso	34,7	36,0	1,3
PBSI-18	15	31,4	53,6	Franco Arenoso	23,5	27,2	3,7
PBSI-19	55	18,8	26,2	Arcilla	26,1	26,7	0,6
PBSI-20	25	16,8	58,2	Franco Arcillo Arenoso	35,8	37,9	2,1
PBSI-21	27	46,8	26,2	Franco	18,3	24,1	5,8
PBSI-22	29	18,8	52,2	Franco Arcillo Arenoso	39,6	41,9	2,4
PBSI-23	59	13,4	27,6	Arcilla	19,9	30,9	11,0

De las muestras de suelo obtenidas, predominan las texturas finas y medias con texturas franco arcillo arenosos y arcillosas, lo cual es muy importante para el proceso de la recarga potencial de los acuíferos y el aporte de agua por medio del flujo base en la época seca.

Con las variables medidas a las muestras de suelo y con la determinación de las unidades geomorfológicas se obtuvo un valor de fracción que infiltra por textura de suelo o K_{fc}.

Por lo tanto y basados en Schosinski (2007) el K_{fc} se obtuvo de la siguiente manera:

$$K_{fc} = 0.26 \ln(fc) - 0.000154fc - 0.723 \quad \text{ec. 2}$$

Donde:

f_c , es la infiltración básica del suelo.

El valor de K_{fc} se integra en la ecuación 4 con el coeficiente de infiltración C .

6.7 Estructura del suelo

La estructura del suelo se refiere a la combinación o el arreglo de las partículas primarias del suelo en unidades o pedos secundarios (Soil Science Society of America, 2001; Straler y Straler, 2002). Las unidades secundarias se caracterizan en base de tamaño, de forma, y del grado. Los grados de la estructura del suelo se clasifican según la adherencia Inter e intra agregado, la cohesión o la estabilidad de los agregados.

Los efectos de la materia orgánica sobre la retención y la transmisión del agua del suelo los ha incorporado Saxton y otros (2004) en el modelo de la hidrología del agua del suelo, bajo la premisa de que la materia orgánica abundante produce generalmente un suelo con más contenido de humedad, influyendo en la formación de agregados y el espacio poroso del suelo (Saxton y otros, 2004).

Saxton y otros (2004), mencionan que si bien es ciertas conclusiones de investigaciones sobre este tópico han sido variables y que los análisis han sido poco representativas para los horizontes superficiales donde es más sentida la influencia de la materia orgánica en la humedad del suelo.

Hillel (1998) citado por Saxton y otros (1985) refuerza la tesis de que el rango y forma de la curva de la humedad del suelo depende fuertemente de textura del suelo. Sin embargo, Él observó que en rangos bajos, de humedad ($< kpa 100$) en la matriz de curva de succión, esta depende principalmente del efecto capilar, de la distribución y del tamaño del poro, por lo tanto es afectado fuertemente por la estructura del suelo.

En 1975, el “Soil Conservation Service” dependiente del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, culmina una obra iniciada en los años sesenta y publica la “Soil Taxonomy” por sus siglas en inglés, que clasifica los suelos en 12 Ordenes o niveles jerarquicos superiores, cada orden se divide en sub ordenes, éstos en grandes grupos, que a su vez lo hacen en subgrupos. El Gran grupo se forma a partir de los nombres de los niveles superiores y constituye un sustantivo que se mantiene en su lengua original (U.S.D.A. Natural Resources Conservation Service, 1998).

Para el presente trabajo no se midió la estructura del suelo, sin embargo, es un parámetro que se integra en los conceptos de capacidad de campo y punto de marchites.

6.8 Cobertura vegetal

En términos generales, Kitterdige (1948), resume la influencia de la cobertura vegetal³ en la relación directa con la radiación solar, viento, agua, y suelo. La vegetación se conecta con la atmósfera y su energía mediante el dosel. Aislado otras características topográficas, el dosel puede modificar la dirección e intensidad del viento, la radiación solar parte es absorbida y parte es reflejada por el dosel, otra fracción de esta llega al suelo. En un suelo con cobertura vegetal existe una capa de biomasa que hace que la radiación neta que llega al suelo mineral sea todavía menor, influyendo en por su puesto en la temperatura del suelo

Figura 2 Impacto de una gota de lluvia sobre suelo desnudo



Straler, A, 1977

³ Como cobertura vegetal se incluye la vegetación dominante (generalmente bosque) así como páramos, manglares, pasturas y otros ecosistemas.

(Kitteridge, 1948). Por otro lado, la vegetación está anclada al suelo mediante las raíces e interactúa con este directamente.

Con el fin de poder clasificar los diferentes tipos de vegetación en el mundo, se han desarrollado diversos sistemas de clasificación, sin embargo, muchos de ellos tienen en común elementos climáticos (principalmente precipitación y temperatura) y edáficos inmersos, por ejemplo en Thornthwaite (1955), Holdridge, (1982). Herrera y Gómez (1993) incorpora además elementos fisiográficos. Esta concordancia, resalta la importancia y la relación que existe entre la cobertura vegetal la atmósfera, radiación solar, viento y el suelo.

En lo referente a la precipitación, el dosel intercepta parte de esta, que se evapora directamente, otra parte logra pasar el dosel donde es atajada por los diferentes estratos que forman la variedad de plantas existentes.

Como se mencionó anteriormente, la cobertura vegetal forma un colchón que evita y amortigua el golpeteo directo de las gotas de lluvia al suelo, ayuda también a mantener abiertos los poros. Como se muestra en la figura 2, el impacto del golpeteo directo sobre el suelo produce un desprendimiento de las partículas del suelo, que lo hace más susceptible a la erosión, por otro lado, el incesante golpeteo va produciendo una compactación por bloqueo de los poros, lo que hace que la infiltración disminuya.

En formaciones vegetales dominadas por especies leñosas se produce intercepción de lluvia por el dosel y troncos de las mismas, disminuyendo su energía cinética y facilitando una absorción más eficiente de agua por el suelo (Haworth y McPherson, 1994, Binkley y Giardina, 1998, Belmonte Serrato y Romero Díaz, 1998, Wainwright y otros, 1999, Acuña y Juárez, 2001; citados por Kunst y otros, 2003).

La intercepción relativa de una cobertura vegetal disminuye con la cantidad de lluvia por evento de precipitación. En cambio la cantidad absoluta que puede ser

interceptada por una cobertura vegetal se ajusta a un valor determinado: la capacidad de almacenamiento de la cobertura. Este valor depende de la estructura y densidad de la vegetación y sobre todo de su índice de área foliar (IAF) (Stadtmüller, 1986).

Scurlock y otros (2001) realizaron estimaciones del IAF a nivel prácticamente mundial, encontrando medias del IAF para 15 clases de cobertura vegetal analizadas. Estos valores van de 1.31 (± 0.85) para los desiertos a 8.72 (± 4.32) para las plantaciones forestales. Los bosques siempre verdes mostraron los valores de IAF más altos (ver cuadro 3) entre la vegetación natural analizada (Scurlock y otros, 2001).

El IAF es la relación de la superficie del follaje (de las hojas) con respecto a la superficie de suelo que se encuentra debajo, en este sentido este índice se puede relacionar con dos elementos que nos ocupan. Por un lado, entre más alto el IAF más protección por parte del dosel al suelo, por el otro, a mayor IAF se esperaría que exista una mayor cantidad de biomasa formada por el individuo, la población o la comunidad por unidad de tiempo, que de una u otra a forma se incorporará al suelo.

CUADRO 4. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR MEDIA PARA DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES

COBERTURA VEGETAL	ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) EN M²/M²
bosques	4,7
arbustos	2,08
cultivos	4,22
tundra	2,69
humedales	6,34
pastos	2,5

Fuente: (Scurlock y otros, 2001)

Relacionado a lo anterior, Stadtmüller (1987) realizó una investigación bibliográfica sobre el conocimiento de los bosques nubosos en las zonas tropicales húmedas; considerando y evaluando todas las disciplinas

relacionadas. Las disciplinas abordadas son: Elementos y factores climáticos, características edáficas, características hidrológicas a nivel de cuenca y por último factores bióticos (Stadtmüller, 1987).

Dentro de los elementos y factores climáticos, Stadtmüller (1987) analiza la denominada precipitación horizontal que se establece como una entrada del agua en el ecosistema condicionado por el proceso de la condensación de la humedad de nubes o niebla en la superficie de la vegetación, por medio del contacto directo de las gotitas de la nube con la vegetación. Esto significa una entrada del agua adicional a la precipitación y como apunta el mismo autor no se debe confundir la precipitación horizontal con la intercepción por copas y la subsiguiente evaporación (Stadtmüller, 1987).

La cantidad de precipitación horizontal depende tanto de factores inherentes de la vegetación como factores y elementos climáticos. Las primeras se refieren a la altura de la vegetación, estructura del dosel, cantidad, tamaño, arreglo y localización de las hojas y de la cantidad, formas y tipos de epífitas (Stadtmüller, 1987). Como se puede notar los elementos de cantidad y tamaño de las hojas se puede relacionar con el IAF, antes descrito y que si no existiera toda esa superficie de contacto para que se de la condensación, mucha de esta agua no iría al ecosistema. El aporte de biomasa al suelo tiene una serie de repercusiones en las propiedades físico - químicas y biológicas del suelo. Esta biomasa como materia orgánica se transforma en humus. En un suelo hay materia orgánica que no es humus: restos de hojas a medio descomponer, insectos, hongos y bacterias y compost incorporado, etc.

Cuando la biomasa en forma de hojas llega al suelo es inmediatamente atacada por hongos y bacterias e inician su descomposición. El resultado es que un porcentaje de la hoja se convierte en nutrientes minerales (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.); y otra parte de esa hoja se transforma en humus. El humus agrega las partículas del suelo y lo esponja, favoreciendo la aireación, lo cual mejora su estructura, retiene agua y minerales y así no se lavan o pierden profundidad. Por otra parte, aporta nutrientes minerales lentamente para las plantas a medida que

se descompone (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, etc.), propicia las condiciones para la actividad de microflora y microfauna del suelo (Weber, 2004). La formación de agregados ayudan a mantener una condición floja, abierta y granular del suelo, esto a su vez repercute en una mejor capacidad e infiltración y percolación del agua en el suelo (Weber, 2004).

La materia orgánica sirve como fuente de la energía para los organismos macro y en fauna microbiana. Las numerosas bacterias, hongos en el suelo se relacionan de una manera general con el contenido de humus. Los gusanos y otros organismos de la fauna son afectados fuertemente por la cantidad de material de residuos de la planta que vuelve al suelo (Weber, 2004). La cobertura vegetal, posee una cantidad de biomasa en raíces, que al podrirse, no solo incorporan materia orgánica si no que también, dejan espacios por donde el agua infiltra.

De la forma anterior el aporte de la materia orgánica al suelo da inicio a una cadena trófica y energética donde se tejen complejas relaciones que repercuten en la fauna en general. Esta fauna crea otros procesos relacionados con el suelo, por ejemplo, construcción de galerías, cuevas, túneles que también favorecen la infiltración.

En el siguiente cuadro donde se muestra la importancia de la cobertura vegetal en el proceso de infiltración:

CUADRO 5. INFILTRACIÓN DEL AGUA EN TERRENOS CON DIFERENTES COBERTURAS

TIEMPO EN MINUTOS	COBERTURA BOSCOSA		COBERTURA BAJO PASTO		SUELO SIN COBERTURA VEGETAL		TOTAL (cm ³)
	(cm ³)	%	(cm ³)	%	(cm ³)	%	
5	60.00	69.52	21.00	24.33	5.30	6.14	86.30
10	119.00	67.70	45.80	26.05	11.00	6.26	175.80
30	360.00	68.90	127.00	24.31	35.50	6.79	522.50
60	715.00	69.55	250.00	24.32	63.00	6.13	1028.00
Promedio		68.92		24.75		6.33	

Fuente: Suáres de Castro (1980) citado por Heuveltop y otros, 1986.

Sin embargo, no es correcto generalizar, sobre la respuesta hidrológica a un evento, ya que esta respuesta depende de la duración e intensidad del evento de lluvia, la geomorfología de cuenca, contenido de humedad del suelo antes de evento lluvia, condición y estado de la superficie del suelo, por último de la condición y estado de la vegetación.

En el presente trabajo se realizó una clasificación supervisada de coberturas del suelo agrupadas según la relación de esta cobertura que le representa al suelo y también la profundidad media de las raíces de la vegetación. Para ello se utilizó la imagen satelital Lansat TM del año 2005. Los resultados de esta clasificación se integran el coeficiente de infiltración C, y específicamente en el K_v, que se detallan más adelante en la ecuación 4.

6.9 Conductividad hidráulica (pruebas de infiltración)

La permeabilidad del suelo o conductividad hidráulica es la medida de la capacidad de un suelo a conducir agua bajo un potencial gradiente hidráulico unitario. La conductividad hidráulica saturada de campo se refiere a la conductividad hidráulica del suelo el cual contiene aire atrapado en los poros. El

flujo potencial de la matriz, es la medida de la capacidad de los suelos de expulsar agua debido a las fuerzas capilares a través de una sección unitaria en una unidad de tiempo, (Custodio & Llamas, 1983).

La conductividad hidráulica del suelo se calculó con base en 9 pruebas de campo por medio de la metodología de Porchet a profundidades que oscilaron entre los 29 y 30 centímetros, o sea en la parte superior del suelo que es la que recibe las gotas de lluvias y la encargada del primer proceso de infiltración; se muestran los valores en cm/min (centímetros por minuto) que son los obtenidos directamente de la prueba en el campo; así como también una columna con los valores en mm/mes (milímetros por mes); los cuales serán utilizados en el modelo analítico para el cálculo de la recarga potencial mensual, en el mapa hidrogeológico se de la figura la ubicación en la cuenca del río Peñas Blancas en el cuadro 5 se presentan los valores de las pruebas de infiltración:

CUADRO 6 VALORES DE LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN EN EL SUELO, CUENCA DEL RÍO PEÑAS BLANCAS, PÉREZ ZELEDÓN




CÓDIGO	X	Y	Z	K (cm/min)	Fc (mm/mes)	PROFUNDIDAD (cm)
PBS1-1	576422	143951	600	0,07	30240,00	29
PBS1-2	575902	147072	710	0,11	47520,00	30
PBS1-4	580368	153217	1220	0,23	99360,00	36
PBS1-5	579388	151579	1060	0,06	25920,00	37
PBS1-8	579526	149127	900	0,05	21600,00	38
PBS1-12	582356	147999	1060	0,13	56160,00	34
PBS1-13	582347	147971	1052	0,05	21600,00	38
PBS1-15	581895	147973	960	0,05	21600,00	32

6.10 Recarga potencial de acuíferos

En términos generales se denomina recarga al proceso por el que se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del contorno que los limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más

importante en general en la parte superior de la subcuenca del río Peñas Blancas) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosas), hasta la transferencia de agua desde otro sistema acuífero en consideración.

La recarga por lluvia y en general la producida a partir de aguas superficiales, afecta a sistemas acuíferos freáticos, es decir que limitan superiormente con el medio no saturado. Los acuíferos potencialmente recargan en áreas que deben de cumplir con los siguientes requisitos:

-  Un suelo y roca permeable en la superficie del terreno
-  Debe de existir comunicación hidráulica con los acuíferos
-  Debe de estar temporal o permanente contacto con agua (precipitación o escorrentía superficial).

Todos estos factores que definen la recarga, ocurren en diferentes grados relativos en las capas que sobreyacen a los acuíferos. Generalmente las montañas y las zonas altas de las cuencas hidrográficas debido a su alto régimen de precipitación, su suelo y subsuelo permeables y su cobertura forestal son por lo general áreas de recarga importantes, estas condiciones fueron las que se determinaron y calcularon en este trabajo para la cuenca del río Peñas Blancas.

Estrictamente hablando toda el área que sobreyace a un determinado acuífero es susceptible de recarga. Sin embargo un área relativamente pequeña compuesta por materiales de alta permeabilidad, en comunicación hidráulica directa con el acuífero y bajo un régimen de precipitación prolongado podría aportar el 70% u 80% de la recarga a ese acuífero y todavía más si en esa área existen cuerpos influentes de agua superficial (ríos o lagos) en contacto permanente con los materiales en superficie; situación que se refleja con las altas precipitaciones en la zona que incluye al Parque Nacional Chirripó de la cuenca del río Peñas Blancas.

El potencial de las aguas subterráneas de un acuífero, representa la máxima cantidad de agua a sustraer del acuífero, para que no sea sobreexplotado; dicho potencial se estima mediante la recarga al acuífero, que se determina conociendo en primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje y en segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie. En tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero que se encuentra debajo del suelo, (Schosinsky, 2007).

6.11 Balance hídrico de suelos

La metodología para realizar el balance hídrico de suelos y obtener el cálculo de la recarga potencial de acuíferos fue propuesta por Schosinsky (2007); esto por que la metodología toma en cuenta los parámetros más relevantes del movimiento del agua en el suelo, a nivel de cuenca y de sistema; y que a partir de la información se pueden tomar de decisiones sobre el recurso hídrico y las zonas de recarga en la cuenca.

Esta metodología se modeló la superficie estadística en el sistema de información geográfica con celdas de 15 x 15 metros para cada parámetro (por mes) requerido en toda la cuenca del río Peñas Blancas.

La retención (Ret); corresponde a la fracción de lluvia interceptada por el follaje; según Lee (1980) la intercepción del follaje o de copas es definida como la fracción de la precipitación que es evaporada desde la superficie de las copas de las plantas y árboles, con base en el mapa de cobertura vegetal en la cuenca del río Peñas Blancas se asignaron los valores del cuadro 8:

**CUADRO 7. COEFICIENTES DE INTERCEPCIÓN CON BASE EN LA
COBERTURA DEL SUELO**

POR COBERTURA VEGETAL	COEFICIENTE DE INTERCEPCIÓN DEL FOLLAJE (Int)
Sombras	0,88
Agricultura	0,92
Nubes	0,92
Cultivos de café	0,92
Bosques	0,88
Pastos y páramo	0,92

Modificado de: Shosinski G, 2007.

Por lo tanto el cálculo de la retención se realizó por medio de la fórmula:

$$\text{Ret: } P - (\text{Prec} \times \text{Int}) \text{ ec. 3}$$

Precipitación que infiltra (Pi); uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración (C). El cual depende de la textura del suelo (Kfc), la fracción que infiltra por efecto de la pendiente del terreno (Kp) y la fracción que infiltra por efectos de la cobertura vegetal (Kv); por lo tanto el coeficiente de infiltración se calcula de la siguiente manera:

$$C = Kp + Kv + Kfc \text{ ec. 4}$$

Con base en las curvas de nivel cada 10 metros de la cartografía del proyecto Terra, (ahora CENIGA) y con cartografía del Instituto Meteorológico Nacional, a escala 1:50.000 se elaboró y corrigió un modelo de elevación digital. De este modelo se derivó otro modelo de pendientes y reclasificadas según los valores del cuadro 8 para obtener el coeficiente Kp.

Con la ubicación geográfica de las pruebas de infiltración en las unidades geomorfológicas se correlacionaron de acuerdo con las texturas del suelo para crear el mapa y así asignar a cada tipo de orden de suelo un valor con base en la textura de las 23 muestras de suelo obtenidas en el trabajo de campo, el cual es interpolado y rasterizado en el SIG en las celdas de 15*15 m.

Los rangos para cada parámetro y los valores utilizados en los cálculos para el modelo en la cuenca del río Peñas Blancas está en el cuadro siguiente:

CUADRO 8. COEFICIENTES PROPUESTOS PARA EL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN (C) SEGÚN VEN TE CHOW (1994), VALORES MODIFICADOS DE SCHOSINSKY (2007)

Por textura de suelo	<i>K_{fc}</i>
Arcilla compacta impermeable	0,10
Combinación de limo y arcilla	0,20
Suelo limo arenoso no muy compacto	0,40
Por pendiente	<i>K_p</i>
Muy plana 0,02 - 0,06%	0,30
Muy plana - plana 0,06 – 0,3%	0,25
Plana 0,3 - 0,4%	0,20
Plana – algo plana 0,4 – 1%	0,18
Algo plana 1 - 2%	0,15
Promedio 2 – 7%	0,10
Fuerte > 7%	0,06
Por cobertura vegetal	<i>K_v</i>
Bosques	0,20
Sombras	0,15
Agricultura	0,11
Nubes	0,15
Pastos y páramo	0,10
Cultivos de café	0,12

Una vez obtenido el valor del coeficiente de infiltración (C) el cálculo de la precipitación de infiltra (Pi) se realiza con la siguiente fórmula:

$$P_i = (Pre - Ret) \times C \text{ ec. 5}$$

Recarga potencial (Rp) de los acuíferos en la cuenca del río Peñas Blancas se calculó por medio de la fórmula:

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - E_{Tr} \text{ ec. 6}$$

En donde:

Rp, es la Recarga potencial en mm.

Pi, es la Precipitación que infiltra en mm.

HSi, es la Humedad inicial del suelo en mm.

HSf, es la Humedad final del suelo en mm.

ETr, es la Evapotranspiración real en mm.

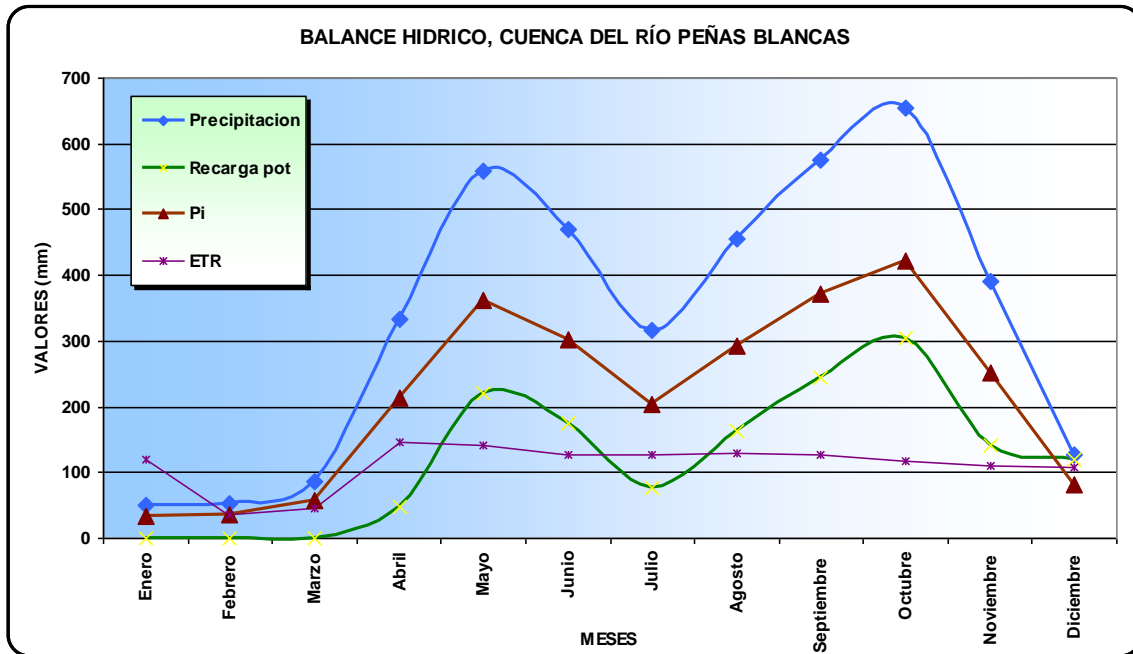
Todos los valores de los parámetros utilizados se encuentran en el Anexo 9; los cuales fueron obtenidos de las estadísticas por medio del álgebra de mapas en el SIG.

6.12 Resultados obtenidos en la balance hídrico de suelos

Una vez realizados los cálculos con el álgebra de mapas en el sistema de información geográfico; la precipitación promedio anual (insumo primordial) tiene un valor de 4069 mm por año; valores típicos para climas tropicales muy húmedos.

Se procedió a realizar los gráficos 1 y 2 para observar la relación entre cada parámetro:

GRÁFICO 1. BALANCE HÍDRICO, CUENCA DEL RÍO PEÑAS BLANCAS



En el gráfico 1 se observa que la precipitación que infiltra (Pi) corresponde a un 64,53% del total de la precipitación promedio anual en la cuenca del río Peñas Blancas y la recarga potencial del agua hacia las rocas del subsuelo es de un 36,68 de la precipitación y un 56,84% de la precipitación que infiltra (Pi).

GRAFICO 2

La escorrentía superficial en los ríos y quebradas de la cuenca representa un 25% de la precipitación media anual de la cuenca del río Peñas Blancas; la cual es mantenida por el flujo base de la descarga de los acuíferos durante los meses de enero, febrero y marzo; como se observa en el gráfico 1.

Con los resultados de los valores medios mensuales se procedió a realizar un cálculo de los caudales que se manejan en la cuenca; para lo cual se multiplica el área de la cuenca (en metros cuadrados) por los milímetros anuales (relación

de 1 mm de lluvia = 1 litro de agua por metro cuadrado por año) y así obtener un valor de un caudal en litros por segundo, cuadro siguiente:

**CUADRO 9. CÁLCULO DE CAUDALES EN LITROS POR SEGUNDO
EN LA CUENCA DEL RÍO PEÑAS BLANCAS**

CONCEPTO	TOTAL (mm/año)	CAUDALES (l/s)	PORENTAJE
Precipitación promedio anual	4069,64	11652,17	
Retención promedio anual	411,07		10,10%
Precipitación que infiltra promedio anual	2626,14	7519,15	64,53%
Escorrentía promedio anual	1034,64	2962,38	25,42%
Evapotranspiración potencial promedio anual	1523,89		
Evapotranspiración real promedio anual	1331,38		
Recarga potencial promedio anual	1492,77	4274,09	36,68%
Extracción superficial (concesiones en ríos y quebradas)	785,84	2250,00	
Necesidad de riego promedio anual	475,58		

Con base en la información del cuadro 10; se observa que las concesiones de agua superficial otorgadas por el Departamento de Aguas del Minae suman un total de 2250 litros por segundo; el cual corresponden al 76% de la escorrentía calculada en el balance hídrico; lo cual se considera crítico ya que se está muy cerca del valor promedio el cual se puede disminuir en un año con déficit de precipitaciones.

6.13 Zonas de recarga potencial en la cuenca del río Peñas Blancas

Los mapas generados en el sistema de información geográfico muestran que las principales zonas de recarga se localizan en la parte media-alta de la cuenca del río Peñas Blancas; principalmente en la zona de transición entre la zona montañosa de fuerte pendiente y los conos aluviales de la Formación Valle de El General; regiones en la cuales se acumula la mayor cantidad de precipitación y

la granulometría de las rocas de los Conos de Talus es más gruesa por lo que se favorece un poco más la infiltración del agua precipitada y que logra vencer la retención del follaje; por lo tanto hay una mayor percolación del agua subterráneas que alimentan los ríos en la época seca por medio de lo que se conoce como flujo base.

Es muy importante la protección de estas zonas preferenciales de recarga y precipitación ya que una disminución en la cobertura vegetal por cambio de uso del suelo provocaría que aumente la escorrentía pero que disminuya la recarga; esto aunado a periodos de déficit de lluvia causaría que el río vaya disminuyendo su caudal y sus niveles en la parte crítica (febrero-marzo) de la época seca.

La parte superior de la cuenca (Parque Nacional Chirripó) tiene un potencial menor como zonas de recarga; esto se debe principalmente a las mayores pendientes del terreno y a los tipos de rocas que tienen un potencial menor de percolación debido a su baja permeabilidad aparente; sin embargo durante la época seca se convierten en las zonas de captura de la mayor parte de la precipitación. Aunque no se ha medido en la cuenca, la precipitación horizontal, aporta gran cantidad de agua al sistema, esto debido al alto índice de área foliar que provee de superficie de condensación del agua en suspensión.

En estas zonas altas la fisionomía de la vegetación (denominados páramos) hace que esté adaptada a las bajas temperaturas y a la baja radiación por la presencia constante de nubes. Esto favorece bajas tasas de evapotranspiración, lo cual hace que mucha de esa agua que se condensa, se convierta en escorrentía y eventualmente en recarga potencial.

La parte inferior de la cuenca del río Peñas Blancas se presentan bajas precipitaciones y aunado a la pobre cobertura vegetal son zonas que tienen un menor potencial para favorecer la recarga subterránea hacia los acuíferos. También afecta el tipo de roca del subsuelo; ya que las arcillas lateríticas de las

rocas de la Formación Valle de El General son rocas con muy baja permeabilidad aparente.

Por otro lado, del trabajo de campo se pudo comprobar que la cuenca, en ciertas zonas, se encuentra alta mente alterada con relación a su cobertura natural. El cambio de uso del suelo se sigue dando. Esto por la presión por ocupar nuevas tierras para pasturas para ganado o bien para futuros condominios y zonas residenciales.



Fotografía 1. Presión hacia la cobertura boscosa en la parte media alta de la cuenca del río Peñas Blancas.

En la fotografía anterior se puede notar como existe una fuerte presión por destinar las áreas boscosas a otros uso del suelo. El que exista pasto no solo baja la capacidad de recarga potencial del una determinada área. Esta baja además por la compactación que representa el peso del ganado sobre el suelo.



Fotografía 2. Previstas para segregación y venta de fincas en la parte media alta de la cuenca del río Peñas Blancas.

Existen además muchos caminos lastreados que llegan hasta casi el límite del Parque Nacional Chirripó lo que hace pensar que no existe zona de amortiguamiento de este Parque y que se pretende urbanizar en un futuro hasta este límite.

Como ya se ha discutido a través de todo el documento, esto por cuanto la metodología del balance hídrico de suelos aplicado toma en cuenta las principales variables que relacionan al movimiento del agua a través de los sistemas bióticos y abióticos de la cuenca.

Por tal motivo, todos aquellos elementos modificadores de las condiciones naturales, alterarán y harán que la respuesta hidrológica a condiciones promedio sea diferente que si se mantuvieran inalteradas. Sin embargo, y concientes de que no es posible mantener el 100% de las condiciones naturales, es que se debe buscar mecanismos que sean lo más acordes con la sostenibilidad y equidad con el ambiente.

En el capítulo de recomendaciones se analizan algunas opciones que se podrían implementar en la cuenca con miras a mejorar las condiciones que permitan una mejor recarga potencial.

6 Conclusiones

La cuenca del río Peñas Blancas se localiza en la vertiente del pacífico sur de Costa Rica, la cual forma parte de la cuenca del río General desembocando en el océano Pacífico.

Administrativamente la cuenca del río Peñas Blancas ubica en su totalidad en la Provincia de San José y en el cantón de Pérez Zeledón, abarcando los distritos de General y Cajón.

La cuenca del río Peñas Blancas tiene una forma elongada con dirección suroeste; tiene un área de 9.029 hectáreas; la altura máxima es de 3109 m.s.n.m en la divisoria de aguas al nor-este de la microcuenca y la altura mínima es de 515 m.s.n.m en la confluencia con el río General a la altura del puente en la carretera interamericana.

Los principales ríos y afluentes del río Peñas Blancas en la microcuenca son los ríos Peña Blanquita, Caliente, Calientillo así como también las quebradas Salitrales, Roble y Champulón.

La cuenca del río Peñas Blancas tiene una forma alargada hacia el sur oeste, esto reduce la posibilidad de que la cuenca del río Peñas Blancas sea cubierta en su totalidad por una tormenta así como también tiene una tendencia menor a concentrar las intensidades de lluvias, esto debido a su forma alargada provocando que exista una relación mayor entre su largo que su ancho.

La pendiente del cauce del río Peñas Blancas es mayor entre la cota de los 1800 a 2000 metros sobre el nivel de mar; por lo que es muy energético en la parte alta de la cuenca debido a su pendiente, forma del terreno y la composición de bloques métricos de lavas e intrusivos en el aluvión; lo que provoca rápidos y muchas caídas de agua.

Se definieron las siguientes unidades geomorfológicas:

- Formas de origen tectónico erosivo – Cordillera Salamanca; se localiza en la parte norte y nor-este de la cuenca del río Peñas Blancas, tiene pendientes muy fuertes ($> 45^\circ$) y las divisorias de las aguas entre los ríos y las quebradas son angostas; formando valles muy profundos (> 30 metros) y de fuerte pendiente esto debido a la dureza de las rocas volcánicas e intrusivas y a los aspectos geológicos-estructurales de buzamientos y plegamientos a nivel regional de las secuencias sedimentarias.
- Conos de Talus (fascies proximales); esta unidad se localiza en la parte media de la cuenca del río Peñas Blancas; se tratan de conos de deyección, coalescentes, en formas de abanicos con su ápice o su parte superior apuntando hacia la Cordillera Costeña. Están formados por los depósitos coluviales de los primeros derrames de la Cordillera Costeña.
- Conos Aluviales (fascies distales); corresponde con las fascies distales de los conos de deyección y se distribuyen en la parte baja de la cuenca del río Peñas Blancas, cubriendo un área de aproximadamente 45 km^2 ; tienen superficies plano onduladas y se observan con lomeríos alargados y aislados debido a la acumulación de bloques de roca sanos y la resistencia de los mismos a la erosión diferencial.
- Terrazas aluviales recientes; sobre la geoforma de los abanicos aluviales los cauces activos de los principales ríos de la cuenca han depositado sedimentos recientes formando terrazas en las partes planas; con

profundidades de hasta 3 metros y ancho de los ríos de mas de 10 metros; en donde se observan las diferentes etapas de despositación de los bloques de roca y las arenas gruesas y medias.

La geología regional en la cuenca del río Peñas Blancas está compuesta por las siguientes formaciones:

- Cordillera de Talamanca; constiuida por rocas volcánicas y plutónicas (intrusivas) muy variadas que de acuerdo a su edad y composición química se pueden agrupar por lo menos en tres unidades sobre esta cordillera y tipos de roca nace el cauce principal del río Peñas Blancas y sus afluentes principales.
- Formación Térraba; la cual consiste en una secuencia compuesta por lutitas, limonitas y areniscas calcáreas de color gris oscuro a negro, su edad es del Oligoceno al Mioceno Inferior, determinada con base en su contenido faunístico, (Linkimer & Aguilar, 2000).
- Formación Valle de El General; son terrazas compuestas por materiales aluvionales en su mayoría de origen volcánico, englobados en arcillas y limos con alto contenidos de óxidos de hierro y aluminio.
- Aluviones recientes; Sobreyacen en forma concordante sobre la Formación Valle de El General; se han depositado sobre los cauces activos y abandonados de los principales ríos de la cuenca; conformando terrazas recientes en las partes planas; con espesores de 3 a 5 metros, está compuestos por bloques de rocas volcánicas, intrusivas y sedimentarias; son redondeados y de alta esfericidad lo que evidencia su alto grado de arrastre desde la parte alta de la cuenca; en su mayoría sanas, englobados en una matriz arenosa – arcillosa; dentro de la cuenca destacan los depósitos aluviales del río Peñas Blancas.

En la cuenca del río Peñas Blancas no se han realizado estudios hidrogeológicos locales en los cuales se haya estimado el potencial acuífero de las rocas volcánicas y sedimentarias; con base en las características de las formaciones y las observaciones de campo se han zonificado en las siguientes unidades:

- Acuíferos ausentes en rocas volcánicas e intrusivas; en esta unidad se agrupan las rocas volcánicas de la cordillera de Talamanca; que se clasifican de bajo a muy bajo potencial acuífero, el bajo potencial se debe a la baja porosidad y permeabilidad ya que las rocas son muy masivas y están afectadas por alteración hidrotermal que rellena las fracturas con arcillas y minerales secundarios.
- Acuíferos fracturados en rocas sedimentarias (bajo potencial acuífero); las rocas sedimentarias de la Formación Térraba son secuencias de areniscas y lutitas calcáreas; que se clasifican con un potencial acuífero de medio a bajo; puede presentar permeabilidades medias debido al fracturamiento de las rocas; sin embargo la misma se puede ver afectada por la precipitación del carbonato de calcio en las fracturas; no se reporta la formación de manantiales que brotan de estas rocas.
- Acuíferos porosos en rocas sedimentarias (medio a bajo potencial); dentro de este grupo se clasifican las rocas de la Formación Valle del General; a pesar de tratarse de rocas cuaternarios de origen coluvio-aluvial son rocas que tienen un potencial acuífero de medio a muy bajo, esto se debe a que la porosidad y permeabilidad se ve muy disminuida por las texturas arcillosas de la matriz (suelos lateríticos) y el contacto de los granos y bloques es por la matriz; las cuales provocan que el potencial de recarga directa de la lluvia hacia los acuíferos sea muy pobre, favoreciendo la escorrentía hacia los drenajes superficiales., el espesor para estas rocas reportado en los pozos oscila entre los 65 y 80 metros.

Se utilizó la metodología de balance hídrico de suelos para obtener el cálculo de la recarga potencial de acuíferos y escorrentía superficial; ya que se considera que es una metodología que toma en cuenta parámetros importantes del movimiento del agua en el suelo y en general en todo el sistema.

En los suelos de la cuenca del río Peñas Blancas predominan las texturas finas y medias con texturas franco arcillo - arenosos y arcillosas, lo cual es muy importante para el proceso de la recarga potencial de los acuíferos y el aporte de agua por medio del flujo base en la época seca.

Con base en la información del Departamento de Aguas del MINAE; la extracción concesionada (“legal”) en la cuenca del río Peñas Blancas es de aproximadamente 2.250 litros por segundo; son concesiones otorgadas para extraer agua en los ríos y quebradas de la cuenca; se aclara que no se está contabilizando los caudales de las concesiones que están en trámite así como también las extracciones de agua ilegales.

No existen muchos pozos perforados profundos reportados en la cuenca del río Peñas Blancas tan solo los pozos 4 pozos (códigos RE-008, RE-009, RE-011 y el SD-010) se encuentran localizados dentro de la cuenca, lo que evidencia el bajo potencial acuífero de los abanicos aluviales de la Formación Valle de El General y la “*relativa*” abundancia de agua superficial que es de unos 2960 litros por segundo.

Con base en la información de 13 estaciones meteorológicas la precipitación promedio anual en la cuenca del río Peñas Blancas tiene un valor de 4069 mm por año; valores típicos para climas tropicales muy húmedos.

Por otra parte la escorrentía superficial en los ríos y quebradas representa un 25% de la precipitación media anual de la cuenca del río Peñas Blancas; ya que tiene un valor de 2962,98 mm; la cual es mantenida por el flujo base de la

descarga de los acuíferos durante los meses de diciembre, enero, febrero y marzo.

Las concesiones de agua superficial otorgadas por el Departamento de Aguas del Minae suman un total de 2250 litros por segundo; el cual corresponden al 76% de la esorrentía calculada en el balance hídrico; lo cual se considera crítico ya que se está muy cerca del valor promedio el cual se puede disminuir en un año con déficit de precipitaciones, por ejemplo un año con influencia del niño; provocando conflictos por la competencia en el uso del recurso hídrico superficial.

La recarga potencial del agua hacia las rocas del subsuelo es de un 36,68% de la precipitación total; lo que significa que apenas este porcentaje de precipitación recarga los acuíferos y mantiene el flujo base de los ríos durante la época seca. Los principales meses donde ocurre esto son: abril, mayo, junio, junio, julio, agosto, septiembre y octubre, donde el 48% de esta recarga ocurre en los meses estos tres últimos meses.

Las principales zonas de recarga se localizan en la parte media-alta de la cuenca del río Peñas Blancas; principalmente en la zona de transición entre la zona montañosa de fuerte pendiente y los conos aluviales de la Formación Valle de El General.

En estas regiones se acumula la mayor cantidad de precipitación y la granulometría de las rocas de los Conos de Talus es más gruesa por lo que se favorece un poco más la infiltración del agua precipitada y que logra vencer la retención del follaje; por lo tanto, hay una mayor percolación del agua subterránea que alimentan los ríos en la época seca por medio de lo que se conoce como flujo base.

El flujo base representa el caudal fundamental con el cuál se deben tomar las decisiones de uso del recurso hídrico en una cuenca. Máxime si se toma en

cuenta que muchas de las actividades económicas requieren usar el agua justamente cuando no hay precipitación considerable y la evapotranspiración es alta.

La parte superior de la cuenca tiene un potencial menor como zonas de recarga; esto se debe principalmente a las mayores pendientes del terreno y a los tipos de rocas que tienen un potencial menor de percolación debido a su baja permeabilidad aparente; sin embargo durante la época seca se convierten en las zonas de captura de la mayor parte de la precipitación, que se convertirá en flujo base que es donde se toma mucha del agua concesionada.

La parte inferior de la cuenca del río Peñas Blancas es menos cubierta por las precipitaciones y aunado a la pobre cobertura vegetal son zonas que tienen un menor potencial para favorecer la recarga subterránea hacia los acuíferos. También afecta el tipo de roca del subsuelo; ya que las arcillas lateríticas son rocas con muy baja permeabilidad aparente.

La protección de estas zonas preferenciales de recarga es de suma importancia ya que una disminución en la cobertura vegetal por cambio de uso del suelo provocaría que aumente la escorrentía superficial pero que disminuya la recarga; esto aunado a periodos de déficit de lluvia causaría que el río vaya disminuyendo su caudal y sus niveles en la parte crítica (febrero-marzo) de la época seca.

El balance hídrico por mes aplicado permitió relacionar diferentes variables que ayudan a visualizar la cuenca hidrográfica como una unidad de gestión, donde debe optimizarse a toda costa el proceso de recarga potencial, con el cual se asegura el tener un flujo base que satisfaga las necesidades de uso del agua (Zafra) en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril.

6

6 Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones son con el objetivo de optimizar y maximizar el uso del agua superficial de la concesión 7397A dentro de la cuenca del río Peñas Blancas:

Reutilización del agua (en el sistema de la planta de tratamiento) como medio seguro de poseer agua y optimizar el caudal otorgado en la concesión, inclusive esto puede ser un aspecto muy positivo como medio de certificación y obtención de normas ISO.

Realizar ya sea a nivel interno o en coordinación con el Departamento de Aguas un control de todas las concesiones y extracciones de agua superficial (legales e ilegales) en la cuenca del río Peñas Blancas; es decir realizar un levantamiento de todas las tomas de agua en la cuenca para estimar un volumen de extracción y cotejarlo con las mediciones del flujo base en la época seca; especialmente para un periodo crítico con déficit de precipitaciones con influencia del fenómeno del Enos.

Iniciar una campaña de mediciones de los caudales de agua en el río Peñas Blancas; específicamente en el sitio de la concesión 7397A con el objetivo de tener un control del flujo base del río en la época seca (enero-marzo).

Es muy importante el cálculo de la demanda real de agua y la demanda proyectada en todo el proceso productivo del ingenio; así como también la medición del caudal real que están utilizando y lo que no se está utilizando en la concesión.

Con base en el cálculo de la demanda de agua proyectada se podría analizar la posibilidad de la construcción de embalses para captar el agua que no utilizan

cuando no hay zafra (época lluviosa) y que siempre pagan en el canon de la concesión.

Para contar con más información y de mayor calidad se recomienda la instalación de una estación meteorológica en la parte media de la cuenca del río Peñas Blancas; con el fin de alimentar el modelo de balance hídrico planteado en el presente informe.

Es importante la sistematización en bases de datos de la información generada y la recolectada; la cual es la base para contar con criterios por parte del Departamento de Aguas del MINAE para regular el uso del agua en la cuenca, aumentos de caudales en las concesiones y el otorgamiento de nuevas concesiones.

En caso de que la demanda de agua proyectada en los procesos del ingenio sea mayor al caudal otorgado en la concesión 7397A; especialmente en la época, seca se puede valorar la opción de realizar estudios de potencial acuífero para perforar pozos profundos y alimentar el sistema en los canales de conducción o eventualmente los embalses de almacenamiento.

Se recomienda enfocar los pagos de servicios ambientales en fincas que se localicen dentro de las zonas preferenciales de recarga generados en el presente estudio.

Continuar con los esfuerzos de manejo y protección de la cuenca del río Peñas Blancas; de ser posible con los otros usuarios del recurso hídrico y continuar con el Pago de Servicios Ambientales, para lo cual se propone una nueva modalidad la cual consiste en.....

ACTUALMENTE EL ESQUEMA DEL FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO FORESTAL NO ES EL MÁS ADECUADO ...

6 Referencias Bibliográficas

- ACON & ASOCIADOS., 1991: Mapa de grupos y subgrupos de suelos de Costa Rica, escala 1:200.000
- BARRANTES, G, & VEGA, M., 2002: Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del Río Tempisque y su aplicación al ajuste de tarifas. Documento preparado para la Asociación para desarrollo del Área de Conservación Tempisque (ASOTEMPISQUE). 102 pp.
- BERGOEING, J.P., 1998: Geomorfología de Costa Rica. IGN. San José. 409 p.
- BAIGORRIA, G; BOWEN, W; STOOORVOGEL, J. Estimating the Spatial Variability of Weather in Mountain Environments. Natural Resource Management. Pp 371-378.
<http://www.tradeoffs.montana.edu/pdf/46weather.pdf>
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R., 1983: Hidrología subterránea. Tomo I. -1157 págs. Ed. Omega, Barcelona.
- EASTMAN, R. 1995. Idrisi for Windows. Clark University. Worcester MA, E.E.U.U. 540p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (Esri). Copyright ©1992-2002 (a). Arc View GIS 3.2. Redlands, CA.USA.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (Esri).1996 (b). Arc View Spatial Analyst 1.0. Redlands, CA.USA.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (Esri).1996 (c). Arc View 3D Analyst 1.0. Redlands, CA.USA.
- FORSYTHE, W., 1985: Física de Suelos, Manual de Laboratorio. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Editorial IICA. San José, Costa Rica. 214p.
- HARGREAVES, G.H. 1981: Climate and Third World Agricultural. Revista Interciencia. Vol. 6, pp 234-238. Julio-Agosto, Caracas, Venezuela.
- HANCOCK P.A; HUTCHINSON M.F; TURTON; S.M LEWIS A.L. Thin Plate Smoothing Spline Interpolation of Long Term Monthly Mean Rainfall for the Wet Tropics Region of North-Eastern Australia.
<http://cres.anu.edu.au/publications/paper3.pdf>

- HERRERA W. & GÓMEZ L. D., 1993: Mapa de Unidades Bióticas de Costa Rica. Escala 1:685.000.
- HERRERA, W., 1985: Clima de Costa Rica. EUNED. Volumen 2. San José, Costa Rica. 118 pp.
- HEUVELDOP MOCHEN, PARDO JORGE, QUIRÓS SALVADOR, ESPINOZA LEONARDO., 1986: Agro climatología tropical. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 378p.
- HEVESI JOSEPH A., FLINT, ALAN L. Y FLINT LORRAINE E., 2003: Simulation of Net Infiltration and Potential Recharge Using a Distributed-Parameter Watershed Model of the Death Valley Region, Nevada and California. Water-Resources Investigations Report 03-4090. U.S. Geological Survey. Sacramento, California. 171p.
- HOLDRIDGE. L. R., 1978: El diagrama de las zonas de vida. En ecología basada en zonas de vida. San José, IICA. p. 13-28.
<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDES.HTM>
- HUSDAL, JAN. 1999., REVISADO 2002: Geographical Decision Makin – Different approaches in IDRISI. <http://husdal.com/mscgis/gdm.htm>.
- KITTREDGE, JOSEPH., 1948: Forest Influences. illus McGraw-Hill Book Co., Now York-Toronto-London. 394 pp
- KUNST, CARLOS; LEDESMA, ROXANA; BASAN NICKISH, MARIO; ANGELLA, GABRIEL; PRIETO, DANIEL; GODOY, JOSÉ. 2003: Rolado de 'Fachinales' e Infiltración de agua en suelo en El Chaco Occidental (Argentina). INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, Argentina. RIA, 32 (3): 105-126 ISSN 0325 – 8718.
http://www.inta.gov.ar/ediciones/ria/32_3/06.pdf.
- KUSSMAUL, S., 2000: Estratigrafía de las rocas ígneas. - En Denyer, P & Kussmaul, S- (comp): Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica. I ed. Cartago: 63-86.
- LEE, R., 1980: Forest Hidrology. Columbia University Press. New York, Guildford, Surrey. 1980.

- LINKIMER, L., & AGUILAR, T., 2000: Estratigrafía sedimentaria - En Denyer, P & Kussmaul, S- (comp): Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica. I ed. Cartago: 43-62.
- MORA, S. & VALVERDE, R., 2005: Geología; Procesos de la dinámica interna y externa. ITEC. II ed. Cartago. 376 p.
- ODUM, EUGENE., 1993: Ecology and Our Endangered Life-Support Systems. Sinauer Associates Inc. Publishers Sunderland, Massachusetts. Segunda Edición. 301p.
- REYNOLDS, J., 1997: Evaluación de los recursos hídricos en Costa Rica: Disponibilidad y utilización. Proyecto de Cuentas Ambientales. CINPE-UNA-CCT. 161p.
- RONALD L. HANSON., 1991: Evapotranspiration and Droughts; National Water Summary 1988-89. En Hydrologic Events and Floods and Droughts.. Paulson, R.W., Chase, E.B., Roberts, R.S., and Moody, D.W., Recopiladores. U. S. Geological Survey. Artículo 2375, p. 99-104.
- SABORIO, FREDDY; BRENES, ALVARO., 1995. Elementos de Climatología, Su aplicación Didáctica a Costa Rica. EUNED. San José, Costa Rica. 93p.
- SALAZAR, L. G. & Madrigal, R., 1993: Unidades geomorfológicos y su relación directa con la litología. - En Denyer, P & Kussmaul, S., (1994) - (comp): Atlas Geológico Gran Área Metropolitana. Editorial Tecnológica. I ed. Cartago. 111-129.
- SALAZAR, L. G., 2000: Geomorfología. - En Denyer, P & Kussmaul, S- (comp): Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica. I ed. Cartago. 171-184.
- SAXTON K. E., RAWLS W.J., ROMBERGER J.S., Y PAPENDICK R. I. 2004: febrero última revisión. Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture. Contribución de Agric. Res. Serv., USDA, in cooperation with the College of Agric. and Home Economics, Agric. Res. Center, Washington State Univ., Pullman, WA 99164. Artículo Científico nº Paper no. 6911. <http://www.bsyste.wsu.edu/saxton/soilwater/Article.htm>
- SCURLOCK, J. M. O., G. P. ASNER, AND S. T. GOWER. 2001: Global Leaf Area Index Data from Field Measurements, 1932-2000. Data set. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from the Oak Ridge National Laboratory

- Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- SCHOSINSKY, G. & LOSILLA, M., 2000: Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual.- En: Revista Geológica de América Central. N° 23. 43-55.
- SCHOSINSKY, G., 2007: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.- En: Revista Geológica de América Central. N° 34-35. 13-30.
- SENARA., 2007: Archivo Nacional de Pozos y Manantiales.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. 2001: Internet Glossary of Soil Science Terms.. <http://www.soils.org/sssagloss/>
- STRAHLER, A. 1977: Geografía Física. Universidad de Columbia. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España.
- STRALER, ARTHUR &, STRALER, ALAN. 1997, 2002: Physical Geography, Science and Systems of the Human Environment. John Wiley & Sons, Inc. Segunda Edición. 748p.
- SUMIOKA S.S. & BAUER H.H. 2003: Estimating Ground-Water Recharge from Precipitation on Whidbey and Camano Islands, Island County, Washington, Water Years 1998 and 1999. Prepared in cooperation with the Island County Health Department Water-Resources Investigations Report 03-4101 U.S. Geological Survey. Tacoma, Washington. 57p.
- TOURNON, J. & ALVARADO, G.E., 1995: Mapa Geológico de Costa Rica.- Escala 1:500.000, Coop. Cient. Tecnol. De Francia – ICE, París.
- THORNTHWAITE .W. Y MATHER J.R.. 1955: The Water Balance. Climatology, 8(1). Laboratorio de Climatología. Centeron, N.Y. 104 p.
- U.S.D.A. NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. 1998: Keys to Soil Taxonomy. Soil Survey Staff. Eight editions 326 p.
- UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO), PNUD-WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1992. Glosario Hidrológico Internacional. Segunda Edición.
- VARGAS, A., 2000: Acuíferos. - En Denyer, P & Kussmaul, S- (comp): Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica. I ed. Cartago. 425-442.

VILLÓN, M., 2002: Hidrología. ITEC. Cartago. 433 p.

WEBER JERZY., 2004: Soil Humic Substances. Department of Soil Science & Agricultural Environment Protection, of the Agricultural University of Wroclaw, Poland. <http://www.ar.wroc.pl/~weber/humic.htm#start>

WERNER, STOLZ., 2004: EL Fenómeno Enos (El Niño/Oscilación Del Sur). Departamento de Gestión de Análisis y Predicción. Encargado Gestión de Análisis y Predicción. Instituto Meteorológico Nacional. Ministerio del Ambiente y Energía, Costa Rica. <http://www.imn.ac.cr/> acutalizado a mayo 2004.

6 Anexos

Anexo 1. Mapa de estaciones y modelo de elevación, área para interpolación

Anexo 1. Cuadro con los datos de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura

Anexo 3. Ecuaciones de regresión para estimar las temperaturas medias mensuales en la Cuenca del Río Peñas Blancas, Vertiente Pacífica de Costa Rica. Basado en Herrera, 1988.

MES	ECUACIÓN
Enero	$T_{med}=27,37727-0.00588400*Elev$
Febrero	$T_{med}=27,93300-0.00600050*Elev$
Marzo	$T_{med}=28,69708-0.00606310*Elev$
Abril	$T_{med}=28,83860-0.00596630*Elev$
Mayo	$T_{med}=28,24620-0.00561773*Elev$
Junio	$T_{med}=27,47970-0.00544700*Elev$
Julio	$T_{med}=27,47970-0.00551150*Elev$
Agosto	$T_{med}=27,48557-0.00555740*Elev$
Setiembre	$T_{med}=27,27400-0.00545065*Elev$
Octubre	$T_{med}=27,00000-0.00537740*Elev$
Noviembre	$T_{med}=26,96660-0.00546615*Elev$
Diciembre	$T_{med}=27,06410-0.00572030*Elev$

Donde:

T_{med} , es la temperatura media estimada para el mes

Elev, es la elevación tomada a partir del modelo de elevación digital.

Anexo 4. Geomorfología de la Cuenca del Río Peñas Blancas

Anexo 5. Geología de la Cuenca del Río Peñas Blancas

Anexo 6. Hidrogeología de la Cuenca del Río Peñas Blancas

Anexo 7. Mapas mensuales de precipitación, evapotranspiración real, escorrentía superficial y recarga potencial media mensual, cuenca del Río Peñas Blancas

Anexo 8. Fotografías ilustrativas del trabajo de campo realizado

Anexo 9. Datos principales del balance hídrico se suelos, cuenca del río Peñas Blancas, Pérez Zeledon