

UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA  
VICERRECTORIA ACADEMICA  
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
Programa de Maestría en Manejo de Recursos Naturales

**Identificación y manejo de las áreas de recarga hídrica en la parte  
media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito  
San Carlos, Costa Rica.**

Tesis sometida a la consideración del Tribunal Examinador del Programa  
de Maestría en Manejo de Recursos Naturales de la Escuela de  
Ciencias Exactas y Naturales para optar al grado académico de:

Magister Scientiae en Manejo de Recursos Naturales con Mención en  
Gestión Ambiental

Harold Blanco Rojas

San José, Costa Rica

2009

Esta tesis ha sido aceptada y aprobada, en su forma presente, por el Tribunal Examinador del Programa de Estudios de la Maestría Académica respectiva de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Estatal a Distancia (UNED), como requisito parcial para optar al grado de:

**Magister Scientiae en Manejo de Recursos Naturales  
con Mención en Gestión Ambiental**

*p/*

Nidia Lobo, Ph.D.  
Directora del Sistema de Estudios de  
Posgrado

Jorge Faustino, Ph.D.  
Director de tesis

Olman Díaz, M.Sc.  
Director de la Escuela de Ciencias  
Exactas y Naturales

Arnulfo Díaz, M.Sc.  
Lector

Zaidett Barrientos, M.Sc.  
Coordinadora del Programa de Maestría  
en Manejo de Recursos Naturales

Pablo Ramírez, M.Sc.  
Lector

Harold Blanco Rojas  
Estudiante

## **Dedicatoria**

A mis padres:  
Guillermo Blanco Castro y Aurora Rojas Benavides

## **Agradecimientos**

A Dios, por permitirme la vida y la oportunidad de llevar a cabo esta investigación.

A mis padres, por el apoyo brindado durante los años de estudio académico.

Al comité de tesis liderado por: Jorge Faustino, Ph.D. Arnulfo Días, M.Sc y Pablo Ramírez, M.Sc, quienes con tanto profesionalismo guiaron el desarrollo de esta investigación.

A la Junta Directiva de la Asociación Administradora de Acueducto Rural de San Juan (*ASADA*), por su interés y disposición a colaborar con esta investigación.

A la gerencia de la Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos (*COOPELESCA R.L*), por su aporte económico y por reconocer el presente trabajo como complemento importante del Plan de Restauración de la Gran Cuenca del Río San Carlos.

A la gerencia de la empresa hidroeléctrica El Embalse S.A, por su dedicación y aporte económico brindado en beneficio de esta investigación.

A los finqueros residentes dentro del área de estudio, quienes me autorizaron el ingreso a sus fincas para realizar el trabajo de campo.

A la Coordinación de la Maestría en Manejo de Recursos Naturales de la Universidad Estatal a Distancia (*UNED*), por la atención y dedicación brindada a este estudio.

## Titulo

Identificación y manejo las Áreas de Recarga Hídrica en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito. San Carlos, Costa Rica.

## Dirección del Autor

Harold Blanco Rojas, Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales, Universidad Estatal a Distancia (UNED), Costa Rica. Correo electrónico [harilllob@gmail.com](mailto:harilllob@gmail.com)

## Resumen en Español

El uso inadecuado de la tierra dentro de las Áreas de Recarga Hídrica (*ARH*), no es compatible con los fines de protección y conservación del recurso hídrico subterráneo. Reconociendo tal hecho, se realizó un estudio que permitió identificar las *ARH* en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, en San Carlos, Costa Rica. Para determinar cuáles son los sitios con mayor potencial de recarga de agua subterránea, se realizó un balance hídrico de suelos. Los datos que se generaron responden a los coeficientes de las variables: textura del suelo (*kfc*), pendiente (*Kp*) y tipo de cobertura vegetal (*Kv*). Con el uso de la cartografía en forma digital, por medio de un Sistema de Información Geográfica (*SIG*), se generaron mapas digitales que representan la textura del suelo, la pendiente, el tipo de cobertura vegetal del suelo y la precipitación en el área de estudio. Los mapas se superpusieron para identificar 25 *ARH*, para las cuales se determinó: evapotranspiración potencial (*ETP*), humedad inicial (*Hsi*), retención de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente), densidad aparente ( $\rho_a$ ), infiltración básica del suelo (*fc*), intercepción de la lluvia y profundidad de las raíces extractoras de agua. La información generada para cada *ARH*, se ingresó a la ecuación general del balance hídrico de suelos a través del uso de una hoja de cálculo electrónica. Los resultados muestran que en las 25 *ARH* se da una importante recarga potencial del acuífero (*Rp*), ello debido en gran medida a las características físicas del suelo, las cuales favorecen la retención de humedad y la percolación directa del agua hacia un posible acuífero existente en la zona. No obstante, las *ARH* con ausencia de cobertura boscosa, presentan una menor capacidad para

almacenar humedad y su aporte se da debido a la percolación del agua, que en gran parte se presenta cuando ocurren las precipitaciones, además, de continuar con el uso actual de la tierra, las áreas cubiertas por caña, zacates y pastizal, es posible que lleguen a experimentar altos índices de compactación y erosión, lo que sin duda contradice el principio de proteger y conservar el recurso hídrico disponible en la zona. En las *ARH* cubiertas por bosque, se presenta una mayor capacidad para almacenar humedad. Por consiguiente, tanto la retención de humedad como la percolación, hacen posible el flujo de agua superficial y subterránea a lo largo de todo el año, aun cuando no ocurren precipitaciones. Aunque la *fc* fue mayor en bosque y menor en caña, zacates y pastizal, los resultados de *Rp* en todas las *ARH* tienden a ser moderadamente uniformes con valores que van desde los 1064 hasta los 2073 mm/año, esto ocurrió debido principalmente a que la evapotranspiración real también es mayor en bosque y menor en caña, zacates y pastizal, provocando cierta homogeneidad en la *Rp*. En general, en el área de estudio recargan más de 23 millones de m<sup>3</sup> de agua anualmente, información congruente con los resultados obtenidos por el Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (*IPS*) en la zona. Ahora bien, los valores de *Rp* se han obtenido en un momento y espacio dado y en realidad, es el cambio en las propiedades físicas del suelo, la erosión, la compactación del suelo y una mayor escorrentía, las que pueden provocar a futuro una disminución de la *Rp*, especialmente en aquellas *ARH* con una cobertura distinta a la boscosa. Según la *Rp*, las *ARH* se clasificaron en categoría baja, media y alta y para cada una de éstas, se definieron acciones de manejo que consideran lineamientos legales, técnicos y administrativos. Esto último se determinó con el fin de mantener o aumentar el flujo de agua subterránea a corto, mediano y largo plazo.

## **Palabras Clave**

Recurso hídrico, recarga hídrica, acuífero, infiltración, balance hídrico, agua subterránea, manejo, conservación.

## Abstract

The inappropriate use of the earth inside the Water Recharge Areas (*WRA*) directly opposes the objectives to protect and conserve the groundwater resource. A study was done concerning this conflict. This study identified the *WRA* in half of the high part of the micro watersheds in Palo, Marín and San Rafaelito in San Carlos, Costa Rica. The study determined all of the locations with potential for groundwater recharge through soil water balance. The information gathered was used to determine the coefficients of the variables: soil texture (*kfc*), slope (*Kp*) and type of vegetal coverage (*Kv*). With the use of the cartography in digital form, a Geographic Information System (*GIS*) has generated digital maps that represent the soil texture, slope, the type of vegetal coverage of the soil and the precipitation in the studied area. The superimposed maps identified 25 Water Recharge Areas and their potential evapotranspiration (*PET*), initial humidity (*Sih*), humidity retention of the soil (field capacity and permanent wither point), apparent density ( $\rho_a$ ), basic infiltration of the soil (*fc*), interception of the rain and depth of the roots that extract water. The information generated for each *WRA*, was electronically calculated in a soil water balance equation. The results show that the 25 *WRA* have an important potential recharge of the aquifer (*Rp*). This is largely due to the physical characteristics of the soil, which favor the humidity retention and the direct percolation of water to a possible aquifer existent in the zone. However, the *WRA* that lack forest coverage have little ability to store humidity and his contribution is given through the percolation of the water, which largely gives when the precipitations occur. With the current treatment of the earth, it is possible for the areas covered by sugar cane, grass and pastures to experience high indexes of compactness, resulting from major soil erosion. This contradicts the principle to protect and conserve the groundwater resource available in the zone. The Water Recharge Areas covered by forest have a major capacity to store humidity, therefore it is possible the flow of superficial and groundwater is through the whole year, even if no precipitations occur. Although the *fc* was major in the forest areas and minor in sugar cane, grass and pastures, the results of *Rp* in all the *WRA* tended to be moderately uniform with values from 1064 to 2073 mm/year. This occurred mainly because the real evapotranspiration (*RET*) is major in the forest areas and minor in sugar cane, grass and pastures, generating some homogeneity in the *Rp*. More than 23 million of m<sup>3</sup> the water is recharged in the studied area annually. This information is congruent with the results obtained by the Sustainable Politics Institute (*SPI*) for the same area. The values of *Rp* have been obtained in a moment and given space, but the change in the physical

properties of the soil, the erosion, the compactness of the soil and a major runoff, can cause a decrease of the  $R_p$  in the future, especially in the *WRA* with coverage distinct to forest. Like the  $R_p$ , the *WRA* is classified in low, medium, and high categories. For each one of these categories, manage actions are defined, considering legal, technical, and administrative aspects. This last promote the maintaining or increasing of the flow of groundwater in short, average and long term.

## **Keywords**

Water resource, water recharge, aquifer, infiltration, water balance, groundwater, manage, conservation.



# Índice de Contenido

Hoja Tribunal Examinador.....	II
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos.....	IV
Título.....	V
Dirección del Autor.....	V
Resumen en Español.....	V
Palabras Clave.....	VI
Abstract.....	VII
Keywords.....	VIII
Agradecimientos.....	IV
Título.....	V
Dirección del Autor.....	V
Resumen en Español.....	V
Palabras Clave.....	VI
Abstract.....	VII
Keywords.....	VIII
Índice de Contenido.....	1
Índice de Cuadros.....	3
Índice de Figuras.....	4
<u>1-Introducción.....</u>	<u>4</u>
1.1-Antecedentes.....	5
1.2- Justificación.....	6
1.3-Objetivos .....	11
<u>1.3.1-Objetivo general.....</u>	<u>11</u>
<u>1.3.2-Objetivos específicos.....</u>	<u>11</u>
1.4-Hipótesis.....	12
<u>2-Marco Teórico.....</u>	<u>12</u>
2.1-El ciclo hidrológico .....	12
2.2-Hidrología e hidrogeología .....	14
<u>2.2.1-Balance hidrológico .....</u>	<u>15</u>
<u>2.2.2-Aguas subterráneas.....</u>	<u>15</u>
<u>2.2.3-Acuífero.....</u>	<u>19</u>
2.3-El agua en el suelo.....	21
<u>2.3.1-Agua superficial y subsuperficial.....</u>	<u>22</u>
<u>2.3.2-Características del suelo.....</u>	<u>23</u>
<u>2.3.3-Fases del agua en el suelo .....</u>	<u>23</u>
<u>2.3.4-Movimiento del agua en el suelo.....</u>	<u>25</u>
<u>2.3.5-Infiltración.....</u>	<u>26</u>
<u>2.3.6-Cantidad de agua en el suelo según la vegetación.....</u>	<u>30</u>
2.4-Áreas de recarga hídrica.....	34
<u>2.4.1-Metodologías para determinar áreas de recarga hídrica.....</u>	<u>36</u>
<u>2.4.2-Manejo de áreas de recarga hídrica.....</u>	<u>37</u>
<u>3-Metodología.....</u>	<u>39</u>
3.1- Área de estudio.....	39
3.2-Método.....	41
<u>3.2.1-Primer paso: Delimitar el área de estudio.....</u>	<u>42</u>
<u>3.2.2-Segundo paso: Determinar la distribución de las precipitaciones.....</u>	<u>42</u>
<u>3.2.3-Tercer paso: Determinar la Evapotranspiración Potencial (ETP).....</u>	<u>43</u>
<u>3.2.4-Cuarto paso: Determinar el tipo de suelo.....</u>	<u>44</u>
<u>3.2.5-Quinto paso: Determinar el tipo de cobertura vegetal del suelo.....</u>	<u>45</u>
<u>3.2.6-Sexto paso: Determinar los rangos de pendientes .....</u>	<u>46</u>

3.2.7-Sétimo paso: Determinar la infiltración básica.....	47
3.2.8-Octavo paso: Determinar la profundidad de las raíces.....	49
3.2.9-Noveno paso: Determinar la intercepción de la lluvia en el follaje.....	49
3.2.10-Décimo paso: Determinar la humedad inicial del suelo.....	50
3.2.11-Décimo primer paso: Identificación de las ARH.....	50
3.2.12-Décimo segundo paso: Balance hídrico de suelos para cada ARH.....	51
3.2.13-Décimo tercer paso: Determinar el volumen de recarga en cada ARH.....	58
3.2.14-Décimo cuarto paso: Categorización de las ARH.....	58
3.2.15-Décimo quinto paso: Definir acciones de manejo para las ARH.....	58
3.2.16-Décimo sexto paso: Determinar el conflicto de uso del suelo en las ARH.....	60
4-Resultados.....	61
4.1-Caracterización de variables biofísicas para identificar ARH.....	61
4.1.1- Distribución de la Precipitación, Temperatura y Evapotranspiración Potencial (ETP).....	61
4.1.2- Determinación del tipo de suelo.....	66
4.1.3- Determinación del tipo de cobertura vegetal del suelo.....	69
4.1.4- Determinación de la pendiente en porcentaje.....	71
4.1.5- Determinación de la infiltración básica (fc).....	72
4.1.6- Determinación de la profundidad de las raíces extractoras de agua.....	74
4.1.7- Determinación de la intercepción de lluvia en el follaje.....	74
4.1.8-Determinación de la humedad inicial del suelo en un mes determinado.....	75
4.2-Modelo biofísico conceptual y balance hídrico de suelos para las ARH.....	75
4.2.1- Identificación de las ARH.....	76
4.2.2- Determinación de la Rp.....	76
4.2.3- Determinación del volumen de Rp para cada ARH.....	79
4.2.4-Categorización de las ARH.....	81
4.3-Acciones de manejo sugeridas para las ARH.....	85
4.3.1-Determinación de acciones para el manejo de las ARH.....	85
4.3.2-Determinación del conflicto de uso del suelo en las ARH.....	93
5-discusión.....	96
6-Conclusiones y recomendaciones.....	101
7-Referencias citadas.....	105
8-Comunicaciones personales.....	111
9-Anexos.....	113
9.1- Balance Hídrico de Suelos en 25 ARH.....	113
9.2- Resultado del análisis de suelos realizado en el laboratorio del CIA.....	139
.....	140
.....	141
9.3- Resultado del análisis de suelos realizado en el laboratorio del INTA.....	142
.....	143
9.4- Justificación de resultados de análisis de suelo obtenidos en el laboratorio del CIA .....	144

## Índice de Cuadros

Cuadro N° 1: Porcentaje de horas de sol mensual, respecto al año, en la latitud 10° del hemisferio norte.....	47
Cuadro N° 2: Coeficientes sugeridos para los diferentes tipos de cobertura vegetal del suelo.....	49
Cuadro N° 3: Coeficientes de pendientes asignados según la pendiente que predomina en el área de estudio.....	50
Cuadro N° 4: Plantilla de datos con información requerida para determinar la infiltración básica del suelo ( <i>fc</i> ).....	52
Cuadro N° 5: Profundidad de las raíces según el tipo de cobertura vegetal del suelo.....	53
Cuadro N° 6: Retención de lluvia en el follaje según tipo de cobertura vegetal del suelo.....	54
Cuadro N° 7: Simbología del contenido de la Ecuación del Balance Hídrico de Suelo aplicado a cada <i>ARH</i> .....	56
Cuadro N° 8: Ecuación del Balance Hídrico de Suelo aplicado a cada <i>ARH</i> .....	57
Cuadro N° 9: Categorización de las <i>ARH</i> , según valores de <i>R<sub>p</sub></i> obtenidos en el balance hídrico de suelos.....	58
Cuadro N° 10: Precipitación promedio mensual y anual para las estaciones meteorológicas de la Marina, COOPELESCA y San Vicente.....	62
Cuadro N° 11: Temperatura promedio mensual y anual para las estaciones meteorológicas de la Marina, COOPELESCA y San Vicente.....	62
Cuadro N° 12: ETP promedio mensual y anual para las estaciones meteorológicas de la Marina, COOPELESCA y San Vicente.....	63
Cuadro N° 13: Resultado de los análisis físicos de suelo en relación a su Densidad Aparente y su Capacidad de Retener Agua.....	68
Cuadro N° 14: Coeficientes sugeridos para los diferentes tipos de cobertura vegetal presentes en el área de estudio.....	70
Cuadro N° 15: Extensión de los tipos de cobertura vegetal del suelo.....	71
Cuadro N° 16: Coeficiente de pendiente asignado al área de estudio.....	72
Cuadro N° 17: Velocidad de infiltración del agua según la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura vegetal del suelo.....	73

Cuadro N° 18: Profundidad de las raíces extractoras de agua según el tipo de cobertura vegetal del suelo.....	74
Cuadro N° 19: Porcentaje de retención de lluvia en el follaje según el tipo de cobertura vegetal del suelo.....	75
Cuadro N° 20: <i>Rp</i> en las 25 <i>ARH</i> .....	77
Cuadro N° 21: Resumen del total de resultados obtenidos en el balance hídrico de suelos aplicado a cada <i>ARH</i> .....	78
Cuadro N° 22: Volumen de <i>Rp</i> en las <i>ARH</i> .....	80
Cuadro N° 23: Volumen de recarga hídrica dado en las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito.....	81
Cuadro N° 24: Categorización de las <i>ARH</i> según los resultados de <i>Rp</i> .....	82
Cuadro N° 25: <i>Rp</i> y extensión de las categorías a las que pertenece cada <i>ARH</i> .....	83
Cuadro N° 26: Acciones de manejo sugeridas para las <i>ARH</i> .....	86
Cuadro N° 27: Uso del suelo en cada categoría de <i>Rp</i> y acciones de manejo sugeridas.....	94

## Índice de Figuras

Figura N° 1: Fases del ciclo hidrológico.....	15
Figura N° 2: El principio de la recarga-infiltración-flujo subterráneo.....	19
Figura N° 3: Ubicación de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito.....	42
Figura N° 4: Ubicación del área de estudio, poblados, manantiales y captación de agua para generación hidroeléctrica.....	43
Figura N° 5: Precipitación media del área de estudio según registros de las estaciones meteorológicas de La Marina, COOPELESCA y San Vicente.....	65
Figura N° 6: Tipos de suelo identificados dentro del área de estudio.....	67
Figura N° 7: Tipo de cobertura vegetal del suelo dada en el área de estudio.....	70
Figura N° 8: <i>ARH</i> que compartieron las variables de precipitación, tipo de suelo, pendiente y cobertura vegetal del suelo.....	76
Figura N° 9: Categorización de <i>ARH</i> .....	84
Figura N° 10: Conflicto por uso del suelo en las <i>ARH</i> .....	93

## 1-INTRODUCCIÓN

## 1.1-Antecedentes

El recurso hídrico permite el sostenimiento de las relaciones ecológicas así como sus funciones, el desarrollo de actividades productivas y la atención de las necesidades sociales como consumo, energía, entre otras (Barrantes y Vega 2004).

En Costa Rica, el marco legal e institucional respalda el deber estatal de velar por la captación, tratamiento, distribución, protección y conservación del recurso hídrico disponible. Según la actualización del plan estratégico del Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados (AyA) 2003-2020 (AyA 2004), el abastecimiento de agua para consumo humano y el desarrollo de actividades productivas es prioritario para cualquier nación. Según AyA (2004), hace algún tiempo en Costa Rica, las acciones de abastecimiento se daban de manera muy tradicional, bajo una limitada intervención tecnológica y poca preocupación por la cantidad y calidad del agua. La cantidad de agua disponible para consumo era suficiente aun cuando no se contaba con presupuesto para garantizar la captación, tratamiento y distribución del agua. El problema empezó a agravarse con el crecimiento urbano, haciéndose necesario abastecer de agua a una población demandante del recurso hídrico, al que, la Ley de Aguas N° 276 en su artículo 1, definió como bien de dominio público, respaldando el derecho de las personas de acceder al agua como un producto ambiental indispensable para la supervivencia (Asamblea legislativa 2004).

Ante la necesidad de abastecer de agua potable a una población creciente, mediante el sistema de administración contratada, el poder ejecutivo ha autorizado a algunas organizaciones como las Asociaciones Administradoras del Acueductos Rurales (ASADAS) para que ejerzan labores de captación, tratamiento, distribución y protección del recurso hídrico (Poder Ejecutivo 1965). Otras instituciones que se han encargado de ejecutar y controlar la legislación creada en materia de aguas, son el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), ente rector del aprovechamiento y conservación de los recursos naturales, el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA), el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y las Municipalidades. Según Solano (2002), la institucionalidad vigente en cada Cantón costarricense, a de velar por la conservación del recurso hídrico, siendo indispensable la protección de las áreas de recarga acuífera. Esta mención se regula claramente en la Ley Forestal N° 7575, en su artículo 33, inciso d (Asamblea legislativa 1996).

La Ley de Aguas N° 276, permite bajo concesión, que el agua como fuente de desarrollo sea utilizada para múltiples actividades productivas, entre ellas, el riego, la hidroenergía, y el

desarrollo agropecuario. Según ésta Ley, en su artículo 17, es prioridad abastecer a la población de agua para consumo, antes de destinar caudales de agua a otras actividades productivas.

Para Calvo (1996), en los últimos años ha crecido la preocupación por el manejo adecuado del recurso hídrico, su persistencia depende de las medidas políticas, legales, administrativas y técnicas que se adopten. La institucionalidad y los civiles, fundamentados en la ciencia y la tecnología, deben velar y controlar la justa protección, conservación y distribución del recurso hídrico.

Siendo congruente con lo mencionado por Calvo (1996) en el párrafo anterior, es objeto de esta investigación la identificación, protección y conservación de aquellas áreas donde es mayormente favorable la infiltración de agua que percola y llega a ser parte de la recarga de los acuíferos. La inexistencia de estudios relacionados con la protección del agua, la presencia de ASADAS, asociaciones ambientalistas y otros grupos organizados preocupados por la persistencia de este importante recurso, así como el apoyo técnico, legal y logístico que estas organizaciones deben recibir de parte de instituciones gubernamentales, crean un ambiente propicio para determinar y manejar adecuadamente las Áreas de Recarga (*ARH*) en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito.

## **1.2- Justificación**

Según Ward y Trimble (2004), el agua es esencial para la existencia de cualquier tipo de vida, juega un papel destacado en muchas actividades propias de los seres humanos, como lo son, el abastecimiento de agua potable, la agricultura, la industria, el comercio y la recreación. El agua es la sustancia más abundante en la tierra, es el principal constituyente de todos los seres vivos y es una fuerza importante que constantemente está cambiando la superficie terrestre.

También es un factor clave en la aclimatación de nuestro planeta que permite la existencia humana. Sin duda, el agua es un elemento esencial para la vida y se es consciente, que es un recurso necesario para la supervivencia de todos los seres vivos, para la producción de alimentos, electricidad y el mantenimiento de la salud. El agua también es requerida en el proceso de elaboración de muchos productos industriales, medios de transporte y es esencial para asegurar la sostenibilidad de los ecosistemas de la tierra (Chow *et al* 1994).

El agua forma parte de todos los procesos naturales de la tierra, por lo que tiene un impacto en todos los aspectos de la vida. Debido a que cada organismo depende del agua, ésta se ha convertido en el eje primordial del desarrollo de la sociedad a través de la historia, pero también, el agua es un recurso limitado, muy vulnerable y escaso en los últimos años y no existe una conciencia globalizada sobre el manejo razonable que se debe ejercer sobre el mismo (Mejía 2005).

El recurso hídrico subterráneo y superficial se encuentra amenazado, los sitios más importantes y estratégicos de recarga hídrica están sometidos a un alto grado de vulnerabilidad, ello debido a la negligencia, falta de conciencia y desconocimiento de la población acerca de la obligación de protegerlo y a la carencia de autoridades e interés de profesionales y técnicos, a los que les corresponde cuidarlo y utilizarlo sosteniblemente (Reynolds y Fraile 2002). El deterioro de las áreas de recarga hídrica, la baja eficiencia en el uso del agua y la contaminación de ríos, manantiales y otros reservorios, están causando una acelerada reducción de la disponibilidad de las fuentes de agua para distintos usos. El grado de deterioro de las áreas de recarga está determinado por el grado de erosión y compactación de los suelos y la deforestación que acelera estos procesos de degradación, sobre todo en zonas con pendientes muy inclinadas. Esta situación está siendo causada por la intervención del ser humano para desarrollar actividades agropecuarias, industriales, turísticas y urbanísticas (FONAES 2002).

A medida que la civilización crece, las actividades humanas invaden gradualmente el ambiente natural del agua, alterando el equilibrio dinámico del ciclo hidrológico e iniciando nuevos procesos y eventos, muchas veces inesperados (Chow *et al* 1994). El cambio de uso de la tierra tiene influencia directa en la reducción de la recarga de los acuíferos, esa reducción se da debido a la compactación o impermeabilización de las áreas de recarga hídrica, provocada por la actividad agropecuaria y urbanística (Astorga y Arias 2003).

Costa Rica, al igual que muchos países de América Latina, es altamente dependiente del agua subterránea para el abastecimiento poblacional y desarrollo de actividades productivas, por tanto, es evidente la necesidad de conocer la naturaleza del agua subterránea y la manera de

protegerla (Reynolds 2002). Se estima que en Costa Rica, más del 80% del agua disponible para ser captada y distribuida a la población, proviene de las aguas subterráneas (Reynolds y Fraile 2002). Lo anterior se ve favorecido por el régimen de precipitación dominante y la composición geológica de los suelos que permiten la infiltración del agua y la consecuente recarga de los acuíferos. Las aguas subterráneas están adquiriendo una importancia estratégica para atender la demanda del recurso hídrico, sin embargo, no siempre se tiene información de donde es mayormente favorable la infiltración y consecuente recarga de los acuíferos. Se debe agregar, que las áreas de mayor recarga hídrica son las más importantes de conservar, pues son las que garantizan en mayor medida los flujos de agua en los acuíferos y a su vez, debido a su importante función, son las más susceptibles de recibir contaminación que pueda afectar la calidad de las aguas subterráneas (Faustino 2007).

Las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, se encuentran en la falda noreste del Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco (*PNAJCB*), el cual, es un punto importante de recarga hídrica que permite la emergencia de manantiales importantes en la parte media y baja de estas microcuencas (Guzmán 2004). El Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (*IPS*), realizó un balance hídrico con el fin de generar información base para la implementación del Servicio Ambiental Hídrico (*SAH*) en cuatro cantones de la región. Este estudio reconoce que todo el flanco noroeste del *PNAJCB*, es una gran área de recarga hídrica, favorecida por la precipitación de tipo orográfica y por una geología de origen volcánico predominante en la zona (Barrantes y Vega 2004). Aun así, en la zona no existe ningún estudio detallado que identifique las áreas más importantes de recarga hídrica y mucho menos, se han propuesto acciones ágiles y pertinentes para su manejo.

La parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito comprende la mayor parte del territorio de la comunidad de San Juan, en esta comunidad, la distribución de agua para consumo humano se da mediante la Asociación Administradora de Acueductos Rurales (*ASADA*). Igualmente, en la parte media de estas microcuencas, emergen manantiales que abastecen de agua potable a las comunidades de San Luís, El Quiosco, Monte Oreb y Linda Vista. Todas estas *ASADAS*, en su afán de proveer agua en cantidad y calidad potable, deben realizar una serie de acciones administrativas que favorezcan la conservación del recurso hídrico disponible para consumo. Entre los deberes de las *ASADAS*, la protección de las áreas importantes de recarga de los acuíferos, prevalece, pues es su deber garantizar el flujo y el aprovechamiento racional del agua a perpetuidad (AyA 2004). A la fecha, este deber no se ha cumplido, pues no se conocen los sitios más importantes de recarga de los manantiales que actualmente se utilizan para abastecimiento poblacional (Ochoa 2007).



El área de estudio se caracteriza por presentar una reducida cobertura boscosa y una inminente amenaza por contaminación del agua debido al incremento desordenado e insostenible de la actividad bovina, agrícola, turística y demográfica, la plusvalía de las tierras, así como el clima favorable que impera en la zona, contribuyen con lo anterior. Estos hechos evidencian la necesidad de identificar las áreas donde es favorable la recarga de acuíferos con el fin proteger los reservorios de agua subterránea y superficial, que se encuentran en el territorio que comprende la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito.

Al identificar las Áreas de Recarga Hídrica (*ARH*), es indispensable definir acciones para su manejo. Con ese fin, se sugieren lineamientos legales (indemnización de tierras, respeto a las áreas de protección, impacto de actividades productivas, acato de la legislación vigente), técnicas (capacidad de uso del suelo, conservación del suelo, producción sostenible, recarga hídrica artificial, pago por servicios ambientales, valoración económica del agua, suelo y de las actividades productivas) y administrativas (medidas de prevención, control y protección, asignación de caudales, uso racional del agua, educación ambiental y compra de tierras), que favorecen la protección y conservación del recurso hídrico a largo plazo.

Con la identificación de las *ARH*, se genera información novedosa que puede ser utilizada como insumo o complemento en la realización de otros estudios similares o con cierta relación.

El estudio podría ser fuente de consulta ante el Plan Regulador y de Ordenamiento Territorial, que en la etapa de elaboración ha integrado actores importantes como la Cámara de Turismo de la Zona Norte (*CATUZON*), la Cámara de Industria y Comercio, el Área de Conservación Arenal Huetar Norte (*ACAHN*), la Municipalidad de San Carlos, sectores productivos y sociedad en general. Los resultados del estudio pueden servir de base para la toma de decisiones y enfoque de los planes de acción, en asociaciones conservacionistas, empresas hidroeléctricas, *ASADAS*, Área de Conservación Arenal Huetar Norte (*ACAHN*) y Municipalidad de San Carlos. Además, el estudio es de consulta y utilidad, para la aprobación o prohibición de ciertas actividades que atentan con el uso indebido de aquellas áreas favorables de recarga hídrica, contribuyendo así, a la planificación del crecimiento urbano y el desarrollo tanto en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, como de todas aquellas comunidades beneficiadas con el recurso hídrico en la parte baja de estas microcuencas, las

cuales, irrigan la gran cuenca del río San Carlos.

Para determinar cuál es el área de interés donde desarrollar la presente investigación, se consideran algunos criterios:

a) La comunidad de San Juan se localiza en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito. En esta comunidad es común la preocupación por preservar y dar manejo adecuado al recurso hídrico, sentimiento que comparte profundamente el autor de esta investigación, al residir en San Juan.

b) Las *ASADAS* o comités del agua de los poblados de San Juan, San Luís, El Quisco, Monte Oreb y Linda Vista, aprovechan manantiales ubicados en la parte media de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, para abastecer de agua por gravedad a aproximadamente 6500 habitantes que residen en la parte media-baja de las mismas microcuencas. Por lo tanto, es de mucha utilidad para estas organizaciones conocer y manejar las áreas con potencial de recarga hídrica que muy probablemente están alimentando los manantiales de interés. Es importante mencionar el acelerado crecimiento poblacional que están experimentado estas comunidades debido a su cercanía con Ciudad Quesada, principal centro económico del Cantón de San Carlos.

c) Muy cerca del límite inferior del área de estudio, en la microcuenca Palo, se encuentra la captación de agua de la empresa hidroeléctrica El Embalse S.A. Esto deja claro la necesidad de mantener y manejar adecuadamente la disponibilidad de agua para cumplir con los distintos fines productivos en la zona.

d) En cuanto al manejo del recurso hídrico, sobra reconocer la importancia de proteger y conservar la parte alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, pues aquí es donde inicia la irrigación de las subcuencas Platanar y San Rafael, las cuales a su vez son influente de la gran cuenca del río San Carlos. En este caso la investigación es complementaria al "Plan de Rehabilitación de la Gran Cuenca del Río San Carlos", implementado por la Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos (*COOPELESCA*).

Tanto las *ASADAS* como la empresa hidroeléctrica El Embalse S.A y *COOPELESCA*, son impulsores de la presente investigación, pues dentro de sus objetivos, destaca la conservación y el aprovechamiento racional del recurso hídrico. La consideración de la propuesta de manejo para las Áreas de Recarga Hídrica (*ARH*) que a partir de este trabajo se sugiera, podrán incluirse en la

“agenda hídrica” de estas organizaciones, las cuales tendrán información base para facilitar la concertación, priorización y la ejecución de acciones.

La aplicación práctica de la metodología utilizada y su relativo bajo costo, hacen posible la réplica de esta investigación por parte de organizaciones como ASADAS, comunidades u otros entes interesados en el manejo y conservación del recurso hídrico.

## **1.3-Objetivos**

### ***1.3.1-Objetivo general***

Identificar las Áreas de Recarga Hídrica y determinar acciones para su manejo en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito. San Carlos, Costa Rica.

### ***1.3.2-Objetivos específicos***

- a)-Caracterizar variables biofísicas del área de estudio para identificar Áreas de Recarga Hídrica.
- b)-Crear un modelo biofísico conceptual del área de estudio para identificar las Áreas de Recarga Hídrica mediante Sistemas de Información Geográfica.

c)-Plantear acciones de manejo para las Áreas de Recarga Hídrica, según la problemática e intereses de las Asociaciones Administradoras de Acueductos Rurales, hidroeléctricas y civiles, que contribuyan con la protección y conservación del recurso hídrico en el área de estudio.

## **1.4-Hipótesis**

En la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito no se identifican Áreas de Recarga Hídrica (ARH) que sean relevantes para su conservación.

## **2-MARCO TEÓRICO**

### **2.1-El ciclo hidrológico**

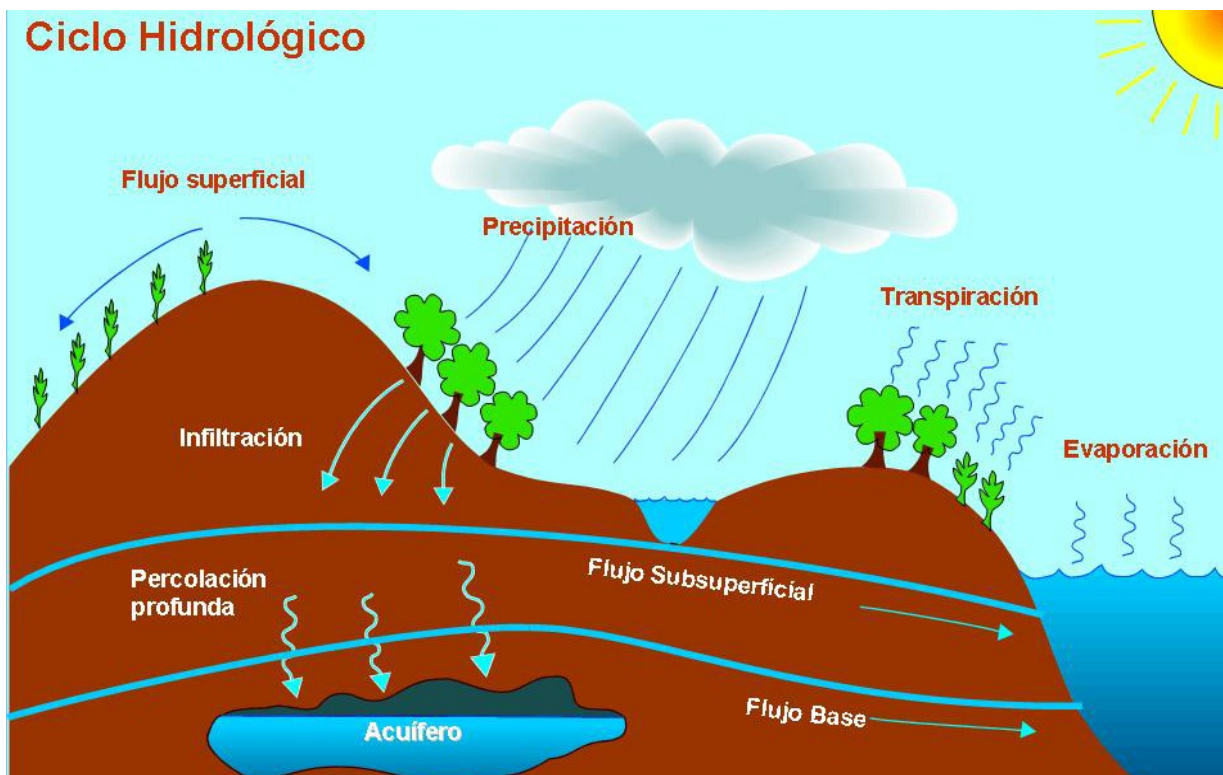
En la tierra el agua existe en un espacio llamado hidrosfera que se extiende desde unos 15km arriba en la atmósfera hasta un kilómetro por debajo de la litosfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrosfera a través de un laberinto de caminos que constituyen el ciclo hidrológico (Chow *et al.* 1994).

El ciclo del agua, se da en forma constante entre la atmósfera y la tierra, pasando por los ecosistemas (vegetación, animales y suelo) y por la corteza terrestre a los océanos para luego regresar a la atmósfera. En resumen, el ciclo hidrológico es el movimiento general del agua que asciende por evaporación y desciende por medio de la precipitación, para después ser parte de la escorrentía superficial o subterránea (Sánchez 2004). Este ciclo en la naturaleza se debe a flujos positivos y negativos, los positivos o de ingreso de agua al sistema vienen a ser: precipitación, agua almacenada, condensación, escurrimiento superficial, escurrimiento subterráneo, infiltración y agua freática. Los flujos negativos o egresos de agua en el sistema son: escorrentía superficial, escorrentía subterránea, evapotranspiración y percolación (Faustino 2007).

La fuente principal de agua que alimenta el ciclo hidrológico de una cuenca es la precipitación, la cantidad de precipitación que se infiltra en el suelo depende de varios factores: la cantidad y la intensidad de la precipitación, la condición física del suelo, la inclinación del terreno y la presencia de vegetación. Así, muchas veces una intensa lluvia no se infiltra en el suelo y crea inundaciones instantáneas. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada casi en su totalidad hacia la atmósfera, igualmente otra parte es extraída del suelo para evaporarse. La evaporación del agua en el suelo y la transpiración ejercida por las plantas, conforman lo que se conoce como evapotranspiración (Aparicio 1989). El agua que no se evapotranspira puede seguir absorbiéndose a través del suelo hacia las reservas terrestres llamadas acuíferos. De manera errónea, se visualiza a los acuíferos como unos lagos subterráneos, en realidad es que el agua del suelo terrestre llena los espacios porosos existentes entre los sedimentos o rocas. El agua que no penetra en el suelo se une y viaja a través de la superficie hasta desembocar en lagos, arroyos y ríos que, a su vez, desembocan en el océano (Anne y Egger 2003).

Según Chow *et al.* (1994), las cantidades estimadas de agua en las diferentes formas que se presenta sobre la tierra, hacen ver que un 95.5% del agua del planeta se encuentra en los océanos, del resto, el 1.7% se encuentra en los hielos polares, el 1.7% forma parte de las aguas subterráneas y solamente el 0.1% se encuentra en los sistemas de agua superficial y atmosférica. Cerca de dos terceras partes del agua dulce de la tierra es hielo polar y la mayoría de la restante es agua subterránea que va desde los 200 hasta los 600m de profundidad. La mayor parte del agua subterránea por debajo de esta profundidad es salina. Solamente el 0.006% del agua dulce esta en los ríos. El agua biológica, fijada en los tejidos de plantas y animales, representa cerca del 0.003% de toda el agua dulce, equivalente a la mitad del volumen contenido en los ríos. Debido a la distinta y desproporcional distribución del agua en el planeta, han surgido distintas disciplinas científicas con el fin de conocer, en sus diferentes estados, la composición y el comportamiento del agua, todo con el fin de sugerir y ejecutar medidas tendientes a su protección y conservación (Baker 1994).

Aunque el agua se encuentra en algún estado de la materia, ya sea sólida, líquida o gaseosa, el ciclo hidrológico es muy irregular y contra ello debe luchar el ser humano. El volumen total de agua en el ciclo hidrológico global permanece esencialmente constante, la distribución de esta agua está cambiando continuamente en continentes, regiones y cuencas locales. La oportunidad de satisfacer las necesidades de agua en un periodo y su escasez en otro, son claro ejemplo de esa irregularidad dependiente del régimen climático que predomina (Villón 2004). Las fases del ciclo hidrológico se muestran en la Figura N° 1.



**Figura N° 1: Fases del ciclo hidrológico.**

Fuente: Faustino (2007).

## 2.2-Hidrología e hidrogeología

La hidrología es la ciencia que trata de las aguas terrestres, de sus maneras de aparecer, de su circulación y distribución en la tierra, de sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico y biológico, sin olvidar las reacciones a la acción del hombre (Devie 2002). Según Chow *et al.* (1994), la hidrología de una región está determinada por sus patrones de clima, tales como la topografía, la geología y la vegetación. La hidrología se ocupa del estudio del ciclo completo del agua, desde el momento en que ésta cae a la tierra, hasta que desemboca en el mar o vuelve a la atmósfera. El ciclo del agua se desarrolla en tres medios distintos: la atmósfera, la superficie del suelo y el subsuelo. Por tanto, la hidrología comprende dos ramas: a) *hidrología de superficie* y b) *hidrología subterránea o hidrogeología*.

La hidrogeología o estudio de las aguas subterráneas es parte de la hidrología que estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico, biológico y el ser humano. La hidrogeología comenzó apenas

hace tres o cuatro decenios, debido a la importancia que el agua subterránea tiene en relación con el abastecimiento de agua a gran parte de la humanidad (Custodio y Llamas 1983).

### **2.2.1-Balance hidrológico**

El concepto de balance hídrico es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmósfera, permitiendo hacer una cuantificación del recurso hídrico a diferente escala, ya sea una parcela, finca, cuenca o región, considerando las modificaciones del mismo por influencia de las actividades del ser humano en general (Jiménez 2005). El balance hidrológico ayuda a determinar la disponibilidad de agua en el tiempo y espacio, se utiliza para identificar el conflicto de déficit de agua ante la necesidad que tiene el ser humano de utilizarla (Faustino 2007).

Según Devie (2002), el propósito de la determinación de un balance hídrico es establecer y analizar las entradas, salidas y cambios de humedad dentro de un área determinada. La recarga del acuífero es una de las salidas de humedad del suelo que se analiza por medio del balance hídrico, el cual involucra para su determinación los componentes básicos del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración).

Al realizar el balance hidrológico, los factores de análisis determinarán si existe o no la posibilidad de almacenar agua en el suelo y su medio interno. Si la evapotranspiración es equivalente a la precipitación, se deduce que no quedará la posibilidad de escorrentía e infiltración. Si entre evapotranspiración y escorrentía se tiene una dimensión equivalente a la precipitación, no habrá posibilidad de almacenar agua en alguna zona subterránea (Jiménez 2005). Esto no quiere decir que en dicha zona no exista un acuífero con potencial importante de agua, este podría derivarse de otra fuente externa a la cuenca o ser parte de una reserva muy antigua (Vargas 1998).

### **2.2.2-Aguas subterráneas**

Se define el agua subterránea como aquella que se encuentra naturalmente por debajo de la superficie de la tierra, ocupando espacios vacíos de la roca o suelo (Jones 1997).

La capacidad del suelo o roca para retener agua depende de su porosidad y permeabilidad. Las capas porosas y saturadas con agua, arena, grava o lecho de roca, que pueden rendir una cantidad de agua significativa, se conocen como mantos freáticos o mantos acuíferos. La permeabilidad ó conductividad hidráulica de una roca, es su capacidad de permitir un flujo de agua a través de si (Jones 1997). La permeabilidad depende de los tipos de vacíos y las propiedades específicas de ellos, por ejemplo, los vacíos pueden ser poros o grietas, conectados entre sí o no (Sánchez 2004).

Según Astorga y Arias (2003), parte de la precipitación se infiltra en el suelo y llena los poros que hay en éste y en las rocas de la corteza terrestre, abasteciendo así la demanda de humedad del suelo (capacidad de campo), cuando esto ocurre se da la percolación del agua hacia capas más profundas llegando a ser parte de la recarga de los acuíferos (Ward y Trimble 2004). El agua que se mueve lentamente en un acuífero, forma el flujo base que viene a ser el nivel mínimo de agua no vinculado a un evento específico de lluvia. Es por ello que aun sin precipitación, podemos encontrar flujos de agua en manantiales, ríos y lagos (Davie 2002).

A la superficie bajo la tierra en donde todo el suelo y las rocas están llenos de agua se le denomina zona de saturación y al agua que llena esos poros se le conoce como agua freática (Faustino 2007). El nivel de agua freática es la superficie superior de la zona de saturación, es la línea divisoria entre el suelo, la roca saturada y la roca no saturada, en donde los poros todavía pueden absorber más agua (Bras 1990).

El nivel que alcanzan las aguas subterráneas se conoce como nivel piezométrico, estos niveles presentan variaciones muy pequeñas en acuíferos no explotados. En general, el nivel piezométrico medio de los acuíferos en un periodo grande de tiempo, es constante, excepto que el ser humano haya cambiado sustancialmente sus condiciones de recarga y descarga (Custodio y Llamas 1983).

El nivel freático puede encontrarse a diferentes profundidades, dependiendo de las circunstancias geológicas y climáticas, desde sólo unos [centímetros](#) hasta centenas de [metros](#) por debajo de la superficie, en la mayoría de los casos la profundidad varía con las circunstancias meteorológicas de las que depende la recarga de los acuíferos (Custodio y Llamas 1983). El nivel freático no es horizontal, sino que es irregular, con pendiente decreciente desde el nivel fijo superior al nivel fijo inferior. Desde el nivel freático hasta la superficie se encuentra la zona no saturada o zona vadosa donde la circulación del agua es básicamente vertical, representada por la percolación que es la circulación del agua movida por gravedad (Jones 1997). No obstante, Bras (1990) menciona que la zona no saturada o vadosa, será tal siempre y cuando no se



presenten periodos extremos de precipitación. La zona freática puede extenderse a una profundidad considerable, pero a medida que aumenta la profundidad, el peso de la sobrecarga tiende a cerrar los poros de manera que es poca el agua que se encuentra a profundidades superiores a los tres kilómetros (Linsley *et al.* 1977). Para Maidment (1993), en la zona vadosa, la presión atmosférica es mayor que la fuerza o tensión causada por la capilaridad y en la zona saturada, la tensión capilar es mucho mayor que la presión atmosférica.

La composición geológica puede limitar o favorecer la infiltración de agua en el suelo, si el material que conforma el subsuelo es permeable será más favorable la infiltración, pero, si el material es impermeable se induce al escurrimiento superficial del agua, ejemplo de ello es la construcción de carreteras, aceras, urbanizaciones y edificios que cubren el suelo con material impermeable y hacen menos favorable la infiltración del agua precipitada, este hecho lleva a la acumulación de aguas superficiales que se desbordan de las cuencas y de las estructuras ingenieriles para inducir la escorrentía, causando catástrofes de gran impacto socioeconómico debido a las inundaciones (Marsalek *et al.* 2006).

El agua subterránea llena cavidades y circula por galerías, sin embargo, se encuentra ocupando los intersticios (poros y grietas) del [suelo](#), del [sustrato rocoso](#) o del [sedimento](#) sin consolidar, los cuales la contienen como una esponja. La única excepción significativa la ofrecen las rocas solubles como las [calizas](#) y los [yesos](#), susceptibles de sufrir el proceso llamado [karstificación](#), en el que el agua excava simas, cavernas y otras vías de circulación (Custodio y Llamas 1983). Dado que el estado y movimiento del agua subterránea está íntimamente ligado con la estructura geológica del terreno, la comprensión de las características geológicas persistentes, es un prerrequisito para el entendimiento de los procesos hidrogeológicos (Brake 1994).

Si el nivel del agua superficial (ríos, riachuelos, lagos) está por encima del nivel freático, se produce un aporte a las aguas subterráneas y por lo tanto se le llama corrientes influentes, por el contrario, si el nivel de las aguas superficiales está por debajo del nivel freático, se produce un aporte a las aguas superficiales y por lo tanto se le llama corrientes efluentes, es por esto que se tienen las corrientes perennes, a pesar de que no se produzca precipitación (Jones 1997). El flujo del agua subterránea se muestra en la figura N° 2.



**Figura N° 2: El principio de la infiltración-flujo subterráneo-recarga.**

Fuente: Faustino (2007).

Casi toda el agua subterránea es agua proveniente de la precipitación. En algunos sitios se encuentra agua de formación, presente en la roca durante su formación o deposición y generalmente de alto contenido salino. En menores cantidades existe también el agua juvenil, formada químicamente dentro del subsuelo y traída a la superficie por rocas intrusivas. Tanto el agua de formación como el agua juvenil, con frecuencia son la fuente de minerales indeseables en el agua subterránea (Linsley *et al.* 1977).

Para Reynolds (2002), el agua subterránea representa una fracción importante del [agua](#) presente en los [continentes](#), con un volumen mucho más importante que el del agua retenida en lagos o circulante, aunque menor que el de los glaciares. El agua del subsuelo es un recurso importante, pero de difícil gestión, debido a su sensibilidad a la contaminación y a la sobreexplotación. Dentro del ciclo hidrológico, las aguas subterráneas son fundamentales tanto como fuente de agua potable para la sociedad, como para el mantenimiento de muchos ecosistemas acuáticos. La mayor parte del flujo en corrientes permanentes de agua, proviene del agua subterránea, mientras que una gran parte del flujo en corrientes intermitentes puede infiltrarse bajo la superficie (Linsley *et al.* 1977).

La importancia económica que supone el aprovechamiento del agua subterránea en el mundo es enorme, pues el agua subterránea es preferida generalmente al agua superficial por las siguientes razones (Reynolds 2002):

- a) El agua subterránea no posee organismos patógenos y por ello no necesita ser tratada previamente, con el consiguiente menor coste al no pasar por depuradores.
- b) Su temperatura es constante, lo cual es una gran ventaja si se ha de utilizar para intercambios térmicos o como termorregulador.
- c) No posee turbidez ni color.
- d) La calidad físico-química natural del agua subterránea es mucho más constante que la del agua superficial.
- e) Los volúmenes de agua subterránea almacenada son por lo general mayores que los volúmenes almacenados en superficie, por lo que el abastecimiento a partir de aguas subterráneas no suele verse afectado por las sequías prolongadas.
- f) Por la existencia de suelo o roca arriba del reservorio de aguas subterráneas, el agua ésta más protegida de la contaminación (natural y antrópica) en comparación con las aguas superficiales.
- g) El agua subterránea acumulada durante varios años, constituye el único recurso en muchas regiones donde no es posible asegurar su abastecimiento a partir de la explotación de las aguas superficiales.

### **2.2.3-Acuífero**

Una formación geológica que contiene agua y que la transmite de un punto a otro recibe el nombre de acuífero (Linsley *et al.* 1977). Según Obando (2005), con la fuerza de gravedad, una parte muy importante de la precipitación que cae sobre la tierra y el agua sobrante de las aguas superficiales, penetra en la capa vegetal, pasa a través de partículas de tierra, arena, grava o por las grietas de las rocas, hasta una zona en la que el suelo está lleno de agua, alimentando así las corrientes subterráneas y formando un acuífero. Bras (1990) define acuífero como aquellas formaciones rocosas que contienen la cantidad de agua suficiente para ser explotada.

La velocidad con la que el agua puede viajar hacia el interior del suelo, depende del tipo de materiales geológicos que lo conformen. Aquellos materiales que permiten que el agua pase a través de ellos se llaman permeables, pero los suelos de barro o arcilla, crean fricción que efectivamente frena el movimiento del agua (Sanchez 2005 b).

Para Davies (2002), el acuífero es una estructura que contiene el agua existente en el interior de la corteza terrestre debido a la existencia de una formación geológica que es capaz de almacenar y transmitir el agua en cantidades significativas. Normalmente los acuíferos se van recargando de forma natural con la precipitación que se infiltra en el suelo. El perfil del suelo está formado por sedimentos no consolidados o débilmente consolidados depositados horizontalmente o simplemente estructurados, en capas mejor o peor definidas. Las capas pueden ser: *a) permeables, b) semipermeables o c) impermeables* (Custodio y Llamas 1983).

*a)* Se dice que una capa es permeable cuando sus propiedades transmisoras de agua son favorables o al menos favorables en comparación con los estratos superiores o inferiores. En una capa de este tipo, la resistencia al flujo vertical es pequeña y puede ser generalmente despreciada de forma que únicamente deben tenerse en cuenta las pérdidas de energía causadas por el flujo horizontal.

*b)* Una capa es semipermeable si sus propiedades transmisoras de agua son relativamente desfavorables. El flujo horizontal a lo largo de una distancia significativa es despreciable, pero el flujo vertical no puede despreciarse ya que la resistencia hidráulica del flujo es pequeña debido al espesor relativamente pequeño de las capas, por consiguiente, el flujo de agua en las capas semipermeables se considera esencialmente vertical.

*c)* Una capa es impermeable cuando sus propiedades transmisoras de agua son tan desfavorables que solamente fluyen a través de ella, sea vertical u horizontalmente, cantidades de agua despreciables. Capas completamente impermeables son poco frecuentes cerca de la superficie del suelo, pero son comunes a mayores profundidades donde ha tenido lugar la compactación, cementación y otros procesos de consolidación.

Las capas que contienen agua subterránea se combinan en sistemas de acuíferos. Un sistema de acuífero debe ser relativamente simple y pertenecer a la siguiente clasificación (Faustino 2007):

*a)* Acuífero libre: Llamado también acuífero freático o capa freática. Es una formación permeable saturada limitada en su parte inferior por una capa impermeable. El límite superior está formado por la tabla de agua o nivel freático, que se encuentra en equilibrio con la presión atmosférica. El nivel del agua producido por la instalación de un pozo de observación o de un agujero que penetra en dicha formación por lo general no se eleva más arriba del nivel freático. El agua en un acuífero libre se llama agua freática o libre.

b) Acuífero semilibre: Es en realidad una formación casi semiconfinada, en la cual la conductividad hidráulica de la capa semipermeable (grano fino) es tan grande que el componente horizontal de flujo de esta capa no puede ser despreciado. Este tipo de acuífero es una forma intermedia entre el tradicional acuífero semiconfinado y el acuífero libre.

c) Acuífero confinado o artesiano: Es una formación permeable completamente saturada de agua y cuyos límites superior e inferior, son capas impermeables. En los acuíferos confinados, la presión del agua es generalmente mayor que la atmosférica, por tal razón, el agua en pozos que penetran en tales acuíferos permanecen por encima del nivel superior de las capas permeables. El agua de un acuífero confinado se denomina agua confinada o agua artesiana.

d) Acuífero semiconfinado: Es una formación permeable saturada, cuyo límite superior está constituido por una capa semipermeable y cuyo límite inferior puede ser una capa impermeable o semipermeable. El agua de un acuífero semiconfinado se llama agua semiconfinada.

En el ciclo hidrológico el agua suele entrar al acuífero en las llamadas áreas de recarga, atraviesa muy lentamente el manto freático y acaba saliendo por los sitios de descarga, dando lugar a manantiales y brotes que devuelven el agua a la superficie. No existe agua subterránea a más de 16 km de profundidad porque allí las rocas fluyen debido a la presión, a 6km es escasa, pues los poros son pequeños y los intersticios no siempre están intercomunicados, razón por la cual no se establece el flujo, a 600m de profundidad, el agua ya resulta susceptible de recuperarse (Faustino 2007).

Para Linsley *et al.* (1977), las velocidades de flujo de las aguas subterráneas son normalmente muy bajas, por lo tanto, el ritmo de renovación del agua subterránea es también muy lento, por ejemplo, el agua subterránea puede fluir entre 1 y 100m al año, es por ello que cuando a un acuífero se le extrae en un período largo de tiempo más agua de la que se recarga, el nivel freático empieza a disminuir y con el paso del tiempo el acuífero se irá vaciando hasta provocar desabastecimiento. Desde el punto de vista de la hidrología, el fenómeno más importante relacionado con los acuíferos, es la recarga y descarga de los mismos (Faustino 2007).

## **2.3-El agua en el suelo**

En la parte continental, en algún momento dentro del ciclo hidrológico, el agua tiene contacto con el suelo. Según sean las características del suelo, el agua puede escurrir superficialmente o infiltrarse a través de este (Custodio y Llamas 1983).

### **2.3.1-Agua superficial y subsuperficial**

Gran parte del agua que cae al suelo durante la primera parte de un aguacero, es depositada en la cobertura vegetal como intercepción y en las depresiones del terreno como almacenamiento superficial (Davie 2002). Para Starosolszky (1987), la intercepción de la precipitación es influenciada por la temperatura, humedad y velocidad del aire y una vez que ésta se da, a medida que continúa la precipitación, la superficie del suelo se cubre de una capa delgada de agua conocida como detención superficial y el flujo comienza a correr hacia los canales superficiales.

Aquella parte de la precipitación que no aparece como infiltración o como escorrentía superficial durante la tormenta o inmediatamente después de la misma, constituye la retención superficial. En otras palabras, la retención superficial incluye la intercepción, el almacenamiento superficial y la evaporación que ocurre durante el aguacero, pero no incluye al agua almacenada temporalmente que va en camino hacia los lagos o ríos (Linsley *et al.* 1977).

El porcentaje de intercepción de la lluvia debido a los tipos de vegetación, puede llegar a representar una porción considerable de la lluvia anual. La capacidad de almacenamiento por intercepción es por lo general satisfecha en las primeras horas del aguacero, de manera que un alto porcentaje de las lluvias durante un aguacero de corta duración, es interceptada. Después de que la vegetación esta saturada, la intercepción cesa, a no ser de que una cantidad apreciable de agua pueda evaporarse a partir de una enorme superficie mojada de vegetación. Una vez que el almacenamiento por intercepción se completa, la cantidad de agua que alcanza el suelo es igual a la lluvia, menos la evaporación a partir de la vegetación (Jones 1997).

Por otro lado, el agua subsuperficial se infiltra y fluye cerca de la superficie del suelo, por encima de la zona freática, a través de la zona no saturada o zona vadosa, donde, gracias a la gravedad, la circulación del agua es básicamente vertical (Maidment 1992). Debido a la compactación causada por actividades humanas, o a capas de arcilla o roca sólida presente de manera natural, al agua subsuperficial no alcanza la zona freática y comienza a correr por debajo de la superficie terrestre hasta alcanzar manantiales y cauces de agua superficial (Ward y Trimble 2004).

### **2.3.2-Características del suelo**

Las plantas por medio de las raíces absorben el agua del suelo. La cantidad de agua contenida en el suelo y su absorción por medio de la planta dependen mucho de algunas características de ese suelo, por lo que resulta necesario conocerlas (Maidment 1992):

a) La porosidad: El suelo está constituido por partículas sólidas de distinto tamaño que dejan entre si unos espacios o poros ocupados por aire y agua. Por lo general, el aire ocupa una gran parte del espacio de los poros grandes, mientras que el agua ocupa poros más pequeños. El volumen de estos espacios suele oscilar entre el 40 y el 60% del volumen total del suelo. La porosidad es la relación entre el volumen de espacios y el volumen total del suelo que lo contiene y ésta depende de un gran número de factores, entre ellos la naturaleza fisicoquímica del suelo, granulometría de sus componentes, grado de cementación o compactación y efectos de disolución, meteorización y figuración (Benitez 1972). Para Ward y Trimble (2004), la retención y el movimiento del agua en el suelo durante un periodo de precipitaciones o sequedad, se da en función de la forma y el tamaño de los espacios porosos existentes.

b) La textura: Es la proporción que tiene el suelo de arena, limo y arcilla. Un suelo franco es aquel que está formado por una mezcla de estos tres elementos en proporciones equilibradas, es decir no predomina una partícula sobre la otra.

c) La estructura: Es la forma como se unen las partículas de arena, limo y arcilla en el suelo. Un suelo con buena estructura contiene abundancia de poros grandes y pequeños, con lo cual el agua, aire y las raíces se mueven libremente, permitiendo que una apreciable cantidad de agua quede retenida en las partículas sólidas.

d) La profundidad: Es la parte del suelo explorada por las raíces que varía cuando existen capas permeables o impermeables. Es el espacio en el perfil del suelo, donde las plantas pueden extraer agua.

### **2.3.3-Fases del agua en el suelo**

Con respecto a la cantidad de agua almacenada en el suelo, que varía de una forma constante, se pueden distinguir las siguientes fases (Custodio y Llamas 1983):

a) Grado de saturación: Después de una lluvia fuerte y constante, el agua ocupa todos los poros del suelo, tanto los grandes como los pequeños; se dice entonces que el suelo está saturado.

b) Capacidad de campo (CC): En un suelo saturado el exceso de agua se elimina por gravedad, es decir, el agua que ocupa una gran parte de los poros grandes cae al subsuelo por su propio peso. A partir del momento de la saturación y al cabo de un tiempo que dura dos o tres días, el suelo ha eliminado por gravedad la mayor parte del agua sobrante, cuando esto ocurre se dice entonces que el suelo se encuentra a CC. Según Bras (1990), la CC equivale al contenido de humedad que persiste a una tensión de 0.33 atmósferas (bares de presión).

c) Punto de marchitez permanente (PMP): A partir de la capacidad de campo, el agua del suelo se va perdiendo progresivamente por evaporación y por absorción de las plantas, hasta que llega un momento en el que las plantas ya no pueden absorber más agua y se marchitan. El suelo contiene todavía una cierta cantidad de agua que la planta no puede utilizar. Se supone comúnmente que el PMP equivale al contenido de humedad que persiste a una tensión de 15 atmósferas (bares de presión) (Bras 1990).

d) Suelo seco: A partir del punto de marchitamiento, el suelo pierde agua por evaporación cuando se le deja secar al aire pero todavía queda cierta cantidad de agua que sólo se puede eliminar sometiendo el suelo a un secado de varias horas en una estufa (Reyes 2006).

A su vez, según la utilización que las plantas den al agua, ésta puede ser: (Custodio y Llamas 1983):

a) Agua sobrante: Es el agua que no puede ser retenida por el suelo y cae por su propio peso hacia las capas más bajas de éste. Esta agua no puede ser utilizada por las plantas porque está situada en una región del suelo fuera del alcance de las raíces.

b) Agua disponible: Es el agua retenida por el suelo y puede ser absorbida por las plantas. El agua disponible es igual a la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP).



c) El agua que puede ser utilizada por las plantas: Depende del tipo de planta y del agua disponible que está contenida en el volumen de tierra ocupado por las raíces.

La humedad del suelo se encuentra estrechamente relacionada con las condiciones climatológicas, durante las épocas lluviosas la humedad se acumula en el suelo y en las épocas secas ésta se pierde por evapotranspiración (Wiley 1959). Las mayores variaciones en las reservas de agua se dan en la capa del suelo de un metro o metro y medio de espesor y puede admitirse que hasta los dos metros es donde se concentra la mayor parte de humedad del subsuelo (UNESCO 1980).

### **2.3.4-Movimiento del agua en el suelo**

El contenido de agua en el suelo cambia continuamente como consecuencia de los movimientos de agua que ocurren en él. Según Custodio y Llamas (1983), las principales causas por las cuales se producen estos movimientos, son las siguientes:

a) La gravedad: Parte del agua que recibe el suelo, penetra y desciende a través de los poros más grandes del suelo sometida fundamentalmente a la acción de la gravedad. El propio peso del agua hace que ésta tienda a caer hacia las capas inferiores del suelo. A esta agua se le conoce como agua gravitacional.

b) La capilaridad: Una vez que el agua infiltra y llega a las capas inferiores del suelo, ésta tiende a desplazarse por espacios muy pequeños (intersticios) que forman los poros del suelo. Estos desplazamientos ocurren desde abajo hacia arriba y en todas las direcciones posibles. El contacto del agua con el aire produce una succión o atracción entre sus moléculas que se llama tensión superficial, esto unido a la tendencia de las moléculas de agua de adherirse a los sólidos, hace que el agua sea retenida por finos canales llenos de aire que hay en el suelo y no pueda ser removida del suelo bajo condiciones climáticas normales (Ward y Trimble 2004). Por esta razón, el elemento variable más importante de la humedad del suelo es el agua capilar o higroscópica. Según Maidment (1993), la influencia de las fuerzas capilares tienen mayor efecto en suelos con alto contenido de arcillas, por lo tanto es en este tipo de suelos donde se da mayor retención de humedad.

Para Davies (2002), existe un constante enfrentamiento entre las fuerzas gravitacionales y las fuerzas capilares, donde debido a la capilaridad se da un fenómeno conocido como succión (atracción o adherencia de las partículas de agua al suelo) el cual evita que el agua fluya

subterráneamente a gran velocidad y únicamente durante los periodos donde se presentan precipitaciones. Por lo anterior, es posible que sea gracias a las fuerzas capilares que podemos encontrar parte de la descarga de aguas subterráneas en periodos secos o con muy baja precipitación.

Para Duke (1974), si el agua es atraída por tensión o presión de un suelo arenoso, el agua debe remplazar al aire en el espacio poroso. Como resultado, se forman superficies de contacto aire-agua, las cuales forman superficies curvas de agua entre partículas contiguas de suelo. La tensión superficial que actúa sobre esas superficies curvas de contacto equilibra la tensión o presión ejercida por el agua y constituye un mecanismo por el cual el agua es retenida en el suelo. Por otra parte, un suelo arcilloso se contrae progresivamente a medida que el agua se retira, de modo que no puede entrar aire en el espacio poroso y las partículas de suelo se unen más y más. Como estas partículas tienen una carga superficial negativa, se repelen unas a otras y al ser aproximadas, la fuerza de repulsión aumenta. El encogimiento y formación correspondiente de fuerzas repelentes equilibra la tensión o presión aplicada para quitar el agua, algo que constituye otro fenómeno por el cual, el agua queda retenida en el suelo. Otro mecanismo que incrementa la retención de humedad, es la presencia de solutos osmóticamente activos, principalmente sales en la disolución del suelo. Los solutos reducen la presión del vapor de agua del suelo y aminoran su energía libre o potencial hídrico, quedando espacio que puede ser ocupado por el agua.

Para Linsley *et al.* (1977), la región de humedad del suelo comprende desde los 0 hasta los 10m de profundidad, en esta zona el agua fluctúa de acuerdo con la tasa de extracción de agua ejercida por las plantas. El autor también describe la zona o franja capilar como aquella que se encuentra por encima del nivel freático, donde impera la tensión capilar que obliga al ascenso del agua, esta franja varía en espesor, desde unos centímetros hasta algunos metros, dependiendo del tamaño de los poros del suelo.

### **2.3.5-Infiltración**

El agua precipitada sobre la superficie de la tierra, queda detenida, discurre por ella, o bien penetra hacia su interior, esta última fracción se dice que se ha infiltrado (Wiley 1959). La infiltración es el movimiento de agua desde la superficie del suelo hacia abajo, que tiene lugar después de una lluvia o de un riego y es favorecida por la permeabilidad del suelo. Para Aparicio (1989), la permeabilidad es la capacidad que tiene un suelo para permitir el paso de agua a través suyo, la define como el caudal de agua que se infiltra a través de una sección de suelo, debido a la fuerza gravitacional del agua.

El agua de infiltración se mueve con rapidez en los suelos más permeables, que tienen los poros grandes y continuos y con más lentitud en los suelos menos permeables, en donde se reduce el tamaño, la cantidad y la continuidad de los poros (Maidment 1993). La permeabilidad del suelo es activada por medio de canales no capilares, a través de los cuales drena el agua por gravedad, desde la superficie, hasta el nivel del agua subterránea, siguiendo la trayectoria de menor resistencia (Wiley 1959).

Las aguas subterráneas provienen de la infiltración directa en el terreno de las lluvias o nieves, o indirectas de ríos o lagos. La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en las capas superiores del suelo, mientras que la percolación es el movimiento del agua en la capas del subsuelo (Sanchez 2005 b). El agua que se infiltra a través de la superficie del suelo y no es retenida como humedad del suelo, se mueve hacia los manantiales y cauces como corriente subsuperficial o penetra a la capa freática y alcanza eventualmente el cauce como agua subterránea, este fenómeno se conoce como percolación (Ward y Trimble 2004). La percolación directa es el proceso más efectivo en la recarga del agua subterránea donde los suelos son considerablemente permeables o donde la capa freática esta cerca de la superficie del suelo. Según Bras (1990), la recarga directa de las aguas subterránea es común en lavas basálticas presentes en suelos de origen volcánico o áreas kársticas, pues por su origen, en estas es común la transmisión de agua a través de cavidades, fracturas y partículas de suelo de mayor tamaño.

La velocidad de infiltración depende de una serie de factores, entre los que se destacan los siguientes (Aparicio 1989):

a) La estructura del suelo: Los suelos con buena estructura tienen una velocidad de infiltración mayor que los suelos sin estructura o muy compactos. La materia orgánica mejora la estructura del suelo y favorece la infiltración del agua.

b) El apelmazamiento del suelo: El impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo deshace su buena estructura, dando como resultado la ocurrencia de partículas finas que taponan los poros y dificultan la infiltración.

c) Las grietas del suelo: Algunos suelos arcillosos se resquebrajan y forman grietas cuando se secan, lo que facilita la penetración del agua en la fase inicial. Cuando la tierra se ha humedecido de nuevo desaparecen las grietas y se reduce la velocidad de infiltración.

d) La textura: En los suelos con un contenido alto de arena, la velocidad de infiltración es mucho mayor que en los suelos arcillosos, mientras que en los suelos francos se presentan velocidades intermedias de infiltración.

La velocidad de infiltración es máxima al comienzo de la lluvia y va disminuyendo progresivamente al ser interceptada por intersticios capilares. A medida que los poros capilares se llenan de agua, la tasa de infiltración disminuye (Starosolszky 1987). Igualmente, la capacidad de infiltración disminuye cuando las arcillas se expansionan y taponan parcialmente los poros, en este momento la fuerza capilar deja de ser importante y da paso al dominio de la fuerza gravitacional del agua. En suelos homogéneos la infiltración disminuye gradualmente hasta que la zona vadosa es saturada. Normalmente el suelo es estratificado y las capas inferiores son menos permeables que las capas superficiales (Wiley 1959).

La tasa de infiltración básica o también conocida como capacidad de infiltración, es la velocidad con que el agua puede entrar en el suelo en su etapa equilibrada, ósea, cuando el suelo se ha saturado (Davie 2002). Cuando todo el medio está saturado, el movimiento del agua se produce solo por la acción de la gravedad y la capacidad de infiltración se vuelve constante. La tasa de infiltración básica es expresada en unidad de volumen/unidad de tiempo (Hernández y Cabalceta 1999).

Según Wiley (1959), la capacidad de infiltración depende de una serie de factores, tales como el tipo de suelo, el contenido de humedad, el contenido de materia orgánica, el tipo de cobertura vegetal y la estación climática del año. Para Ward y Trimble (2004), de aquellas características del suelo que afectan la infiltración, la porosidad es posiblemente la más importante. La porosidad se define como el espacio que puede ser ocupado por el aire y el agua en el suelo, por lo tanto, ésta depende del tamaño, agregación y la forma de las partículas del suelo. La porosidad no es igual al volumen de humedad que un suelo puede retener, éste volumen es siempre menor debido a la atracción molecular dada entre las partículas del suelo. La porosidad determina la capacidad de almacenamiento y también afecta la resistencia al flujo, de esta manera la infiltración tiende a aumentar con el aumento de la porosidad. Para Maidment (1993), un alto contenido de materia orgánica, una baja densidad aparente y un contenido bajo en arcillas, tiende a aumentar la capacidad de infiltración debido en gran parte al aumento proporcional de la porosidad. Para Ward y Trimble (2004), las anteriores características se presentan en mayor medida en suelos cubiertos por bosque, por lo que el tipo de cobertura vegetal del suelo, influye grandemente en su capacidad de infiltración.

En cuanto al tipo de cobertura vegetal del suelo, ésta favorece la infiltración en comparación con la de un suelo desnudo, esto debido a que se retarda la caída y el flujo de agua sobre la superficie, dando al agua tiempo adicional para penetrar en el suelo, no obstante, una vegetación densa reduce el agua que llega al suelo, pues parte de esta es interceptada, reduciendo así la fracción de escorrentía y aumentando la de infiltración (Reynolds y Thompson 1988). Además, los sistemas radicales hacen el suelo más permeable y el follaje protege el suelo de la erosión causada por el impacto de las gotas de agua, reduciendo así la compactación del suelo (Linsley *et al.* 1977). La cobertura vegetal del suelo no solo protege el suelo de la compactación causada por la lluvia, sino que también mantiene altos contenidos de materia orgánica y facilita la actividad de insectos y microorganismos en el suelo. Dada su importancia en la infiltración, la cobertura del suelo es más importante que el tipo de suelo existente, pues se han hecho estudios donde resulta que en un mismo suelo, distintos tipos de cobertura vegetal presentan diversas tasas de infiltración. Debido a la alta transpiración, poco aporte de materia orgánica y baja protección de la compactación causada por la lluvia, los cultivos anuales poco densos y de porte bajo, no son los más idóneos en términos de infiltración (Wiley 1959).

Otros factores que afectan la capacidad de infiltración de los suelos, son la compactación causada por maquinaria, humanos y animales. Esta compactación puede darse más marcadamente en suelos con alto contenido de arcillas. En ocasiones, debido a la precipitación, partículas muy pequeñas de suelo suelen ser depositadas en los espacios intersticiales, reduciendo la capacidad de infiltración del suelo. En cuanto a la humedad del suelo, es posible que en un suelo seco exista un gran potencial de capilaridad que junto con las fuerzas gravitacionales, hacen posible altas tasas de infiltración al inicio de la época de invierno. Otro factor que afecta negativamente la capacidad de infiltración es la viscosidad del agua provocada por las altas temperaturas, entre mas viscosa sea el agua, menor va a ser la tasa de infiltración (Wiley 1959).

La cantidad de agua que se infiltra en un terreno depende también del tiempo que se dispone para su penetración. En los terrenos arcillosos con poca velocidad de infiltración, una lluvia suave durante mucho tiempo aporta más agua al suelo que una lluvia fuerte que dure poco tiempo. El tiempo de infiltración aumenta cuando de alguna forma se mantiene el agua sobre el terreno, permitiendo que ésta se infiltre poco a poco (Schosinsky y Losilla 2002). Cuando la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración, la tasa de infiltración será igual a la tasa de precipitación (Wiley 1959). Para Duke (1974), la infiltración también se ve afectada por el contenido hídrico inicial, el espacio poroso del suelo, el grado de hinchazón de los coloides y el contenido orgánico del suelo. Según este autor, al aumentar el contenido hídrico inicial del suelo, también se reduce la capacidad de infiltración del mismo, pues la hidratación e hinchazón de las

partículas de arcilla, reduce el espacio disponible para facilitar la entrada de agua. Sobre aquellos suelos difíciles de mojar o muy compactados, Duke (1974) recomienda la adición de agentes humedecedores.

Según Linsley *et al.* (1977), la infiltración de agua permite la formación de capas de agua muy delgadas en la superficie del suelo, que se extienden sobre áreas de considerable magnitud. Las cantidades de agua infiltradas son por lo general muy pequeñas (unos pocos centímetros por día) y raramente son capaces de saturar una profundidad considerable del suelo. Generalmente el agua infiltrada se distribuye dentro de las capas superiores del suelo, aportando muy poco al abastecimiento de agua subterránea, a menos que el suelo sea muy permeable o que la zona vadosa sea muy delgada. En general, el volumen de infiltración es varias veces mayor que el de escorrentía durante un aguacero, especialmente en cuencas con un grado de urbanización relativamente bajo (Aparicio 1989).

### **2.3.6-Cantidad de agua en el suelo según la vegetación**

Para conocer la relación que existe entre la cantidad de agua en el suelo y el tipo de vegetación, primeramente se deben conocer los conceptos de evaporación, transpiración y evapotranspiración.

La evaporación es una etapa permanente del ciclo hidrológico que se da en toda superficie o espacio húmedo. Como fenómeno físico, la evaporación es el paso del estado líquido al estado gaseoso, sin embargo, hay otra evaporación que es provocada por la actividad fisiológica de las plantas que se conoce como transpiración. Parte de la precipitación es interceptada por la vegetación y es evaporada inmediatamente, por lo tanto se debe descartar su contribución a la transpiración. Los conceptos de evaporación y transpiración, conforman la evapotranspiración (Starosolszky 1987).

En el término evaporación se incluye la evaporización de las gotas de lluvia en la superficie de las plantas, así como la evaporación del agua en superficies líquidas libres, mientras que en el término transpiración se incluye, además de la transpiración propiamente dicha, el agua utilizada por las plantas en la formación de la materia seca que la compone (Ward y Trimble 2004).

Algunos elementos meteorológicos que afectan la evaporación son: radiación solar, temperatura del aire, presión de vapor, viento y presión atmosférica. De estos, la radiación solar

es la más influyente. La evaporación varía con la latitud, época del año, hora del día y condición de nubosidad (Aparicio 1989).

En resumen, los factores que condicionan la evapotranspiración se pueden agrupar de la siguiente forma (Reyes 2006):

a) Condiciones dependientes del suelo: En suelos con capacidad para retener gran cantidad de agua, la evapotranspiración es más intensa que en los suelos que presentan menormente esa propiedad.

b) Naturaleza de la vegetación: Las plantas que tienen muchas hojas como es el caso del bosque denso, transpiran más cantidad de agua que aquellas otras que tienen menor cantidad de follaje.

c) La fase vegetativa en que se encuentra el cultivo: La evapotranspiración varía a lo largo del ciclo vegetativo. En las plantas poco desarrolladas la mayor parte del agua se pierde por evaporación en el suelo, pero a medida que el cultivo se desarrolla, aumenta la transpiración y disminuye la evaporación, esto debido a que aumenta el volumen de follaje y éste sombrea la superficie del suelo.

d) Condiciones meteorológicas: La insolación fuerte, las temperaturas elevadas, la sequedad del ambiente y el viento, son condiciones meteorológicas que favorecen la evapotranspiración.

Según Custodio y Llamas (1983), la transpiración es el proceso en el cual las plantas son capaces de formar su propia materia a base de las sustancias que toman del aire y del suelo. La planta absorbe por las raíces el agua y las sales minerales y por las hojas toma el anhídrido carbónico del aire. Para que la planta se desarrolle normalmente debe existir equilibrio entre el agua absorbida por las raíces y el agua transpirada por las hojas.

El tipo de planta es un factor importante en el control de la transpiración, cuando la humedad del suelo es limitada. Cuando se secan las capas superiores del suelo, las especies con raíces poco profundas no pueden obtener agua y se marchitan, mientras que en las especies con raíces profundas continúan transpirando hasta que la humedad del suelo se reduce y se alcanza el punto de marchitez permanente (Bras 1990). Por lo tanto, la vegetación con raíces profundas como es el caso del bosque, transpira más agua durante periodos secos, en comparación con las plantas de especies con raíces poco profundas (Linsley *et al.* 1977).

La disponibilidad de agua está determinada en buena parte por el tamaño de la zona de raíces y el régimen climático. Si los periodos largos sin lluvia durante la temporada de crecimiento son característicos de un área, la cobertura forestal de raíces profundas transpirará libremente la mayor parte del tiempo aun cuando se haya terminado la disponibilidad de agua para plantas con raíces poco profundas. En áreas donde las plantas con raíces poco profundas obtienen una adecuada cantidad de agua la mayor parte del tiempo, la evapotranspiración es afectada en menor grado por la profundidad de la zona de raíces (Linsley *et al.* 1977).

Para evitar desequilibrios entre el agua absorbida por las raíces y el agua transpirada por las hojas, las plantas pueden graduar la apertura de los estomas. Las causas que influyen sobre los movimientos de apertura y cierre de las estomas son las siguientes (Sánchez 2005 a):

a) La intensidad de la luz: El proceso de la fotosíntesis se realiza con la energía de la luz solar, a mayor intensidad de la luz solar, mayor intensidad de la fotosíntesis, con la cual se produce mayor cantidad de savia elaborada, por lo tanto, hay mayor cantidad de agua sobrante, o sea, mayor transpiración.

b) El calor y el viento: A mayor calor y ventosidad se favorece la evaporación y por lo tanto, la salida de agua de la planta en forma de vapor.

c) El grado de humedad del aire: Con una atmósfera seca se favorece el aumento de la transpiración, ya que se favorece la evaporación del agua.

d) La cantidad de agua contenida en la planta: Cuando la planta sufre escasez de agua, bien sea por escaso aprovisionamiento o porque la transpiración es muy grande (días muy cálidos o con mucho viento), los estomas se cierran parcialmente o por completo con el fin de disminuir las pérdidas de agua por transpiración.

Para Ward y Trimble (2004), debido a un mayor contenido de biomasa y a la profundidad que alcanzan sus raíces, el bosque evapotranspira mas agua que los cultivos poco densos y con una reducida profundidad de raíces. Debido a lo anterior, un bosque se caracteriza por presentar mucha más transpiración, en comparación con la evaporación del suelo, pues por lo general, éste se encuentra protegido por las copas de los árboles y por el mantillo o capa de humus acumulada en su base.



Según Reynolds y Thompson (1988), cuando un área forestal es reemplazada por pastizales o cultivos, se presenta un aumento en la escorrentía superficial, erosión del suelo y una reducción considerable en las tasas de interceptación y evapotranspiración, provocando la ocurrencia de suelos con menor agua retenida. Para tener una idea más clara de la importancia de los bosques tropicales, Jones (1997) menciona que estos presentan una tasa de evaporación promedio de 60 ton de agua/ha/día, pero igualmente son responsables de almacenar o retener 1350 ton de agua/ha/día. Agrega además que el solo hecho de reforestar un 10% de una hectárea talada, implica reducir la escorrentía en un 2%.

La cantidad de agua que necesita una planta se distribuye de tres maneras: agua incorporada, agua evaporada por la superficie del suelo y agua transpirada. El consumo de agua por evaporación y transpiración se puede considerar prácticamente como el consumo total, dicho consumo de agua recibe el nombre de evapotranspiración, de la que hay que diferenciar (Sánchez 2005 a):

a) Evapotranspiración Potencial (*ETP*): Es la cantidad de agua consumida durante un determinado período de tiempo, en un suelo cubierto de una vegetación homogénea, densa, en plena actividad vegetativa y con un buen suministro de agua. Definida en términos más sencillos, es la pérdida total del agua que ocurriría si en ningún momento existiera deficiencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación.

b) La Evapotranspiración Real (*ETR*): La evapotranspiración real se refiere a la pérdida de agua de una superficie (vegetal, suelo, órganos, animales) bajo las condiciones ambientales (suelo, clima) y biológicas existentes. Esto significa que pueden existir limitaciones como por ejemplo, estrés hídrico en el suelo o cierre parcial o total de estomas, que pueden ocasionar que la *ETR* sea inferior a la que ocurriría si no existieran esas limitaciones. En otras palabras, es la cantidad de agua evaporada en la realidad.

Las cantidades de agua que por evapotranspiración vuelven a la atmósfera, alcanzan cifras realmente notables. Por ejemplo, en un día cálido, es frecuente una evapotranspiración de 3 a 4 mm/día, esto significa que se desplacen hacia la atmósfera de 30 a 40 toneladas de agua/ha/día (Custodio y Llamas 1983). En una cuenca o en una zona arbitraria de la cuenca, es casi imposible determinar la evapotranspiración de la vegetación, esto debido a la gran diversidad de vegetación y al grado de desarrollo de las plantas (Linsley *et al.* 1977). Conociendo este hecho, Schosinsky (2006) utiliza el método de Blaney y Criddle gracias al acceso de la información requerida para su cálculo, pero aclara que es posible utilizar otros métodos con el fin de asumir una evapotranspiración promedio representativa.

## 2.4-Áreas de recarga hídrica

Se denomina recarga hídrica al proceso por el que se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del mismo, igualmente se llama recarga al volumen de agua que penetra en el acuífero durante un intervalo de tiempo dado (Vargas 2000).

A las capas subterráneas, los acuíferos se llenan de agua debido a la precipitación fluvial que se infiltra a través del suelo y las rocas, este es el proceso conocido como recarga natural. Cualquier superficie del suelo que deja pasar el agua hasta que ésta llega a un manto freático se denomina área o superficie de recarga hídrica. El agua subterránea va desde el área de recarga, atraviesa un manto freático y llega a un área de descarga, como parte del ciclo hidrológico. Las áreas de descarga se dan cuando un acuífero alcanza la superficie de la tierra, generando así, manantiales, lagos y corrientes fluviales (Davie 2002).

En términos generales, se denomina recarga hídrica al proceso por el que se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia y las aguas superficiales, hasta la transferencia de agua desde otro acuífero, si el mismo es externo al acuífero de interés (Orozco *et al.* 2003). Las cuencas hidrológicas o colectoras, también llamadas cuencas de captación, son aquellas áreas de tierra que captan el agua en el subsuelo y la llevan hasta las denominadas masas de agua superficial (Faustino 2007).

Las condiciones que determinan la velocidad y el caudal de la recarga de aguas subterráneas, son aquellas relacionadas con la precipitación y la facilidad de entrada del agua en el suelo (Benitez 1972). Los acuíferos recargan en cualquier área que: a) exista suelo o roca permeable en superficie, b) esté en comunicación hidráulica con los acuíferos y c) esté temporalmente en contacto con agua. Todos estos factores definen la recarga y ocurren en diferentes grados relativos en las capas que sobreyacen a los acuíferos (Fetter 2001).

Los acuíferos se recargan principalmente a través de la precipitación en suelos con alta capacidad de infiltración o rocas superficialmente permeables. Las áreas de recarga de los acuíferos pueden o no estar a grandes distancias de donde son explotados (Faustino 2007).

La precipitación varía grandemente en cantidad, de unos sitios a otros y es también notablemente variable con el tiempo en cualquier sitio determinado. En general, la proporción de

precipitación que puede transformarse en aguas subterráneas aumenta con la precipitación, pero solo hasta un cierto límite. Si las precipitaciones tienen lugar en forma de lluvias ligeras y dispersas, pueden todas ellas ser retenidas por la vegetación o ser absorbidas por el suelo. Las lluvias que tienen lugar después de que la falta de humedad del suelo ha sido satisfecha, son precisamente las que tienen utilidad en la recarga de aguas subterráneas (Davie 2002). Una cantidad dada de precipitación durante la época de crecimiento vegetal, producirá la máxima recarga si la lluvia persiste en intensidad, induciendo a que el agua se infiltre con la misma rapidez que va cayendo. Si por el contrario, el agua cae distribuida en lluvias intermitentes a lo largo de un periodo de tiempo considerable, puede ser más beneficiosa para las plantas, pero de esta agua, muy poca o ninguna cantidad puede atravesar el suelo vegetal para llegar al acuífero. Por otra parte, si la precipitación tiene lugar en forma de aguacero de gran intensidad y de corta duración, solamente una pequeña parte puede infiltrarse en el suelo y todavía otra menor parte puede alcanzar la zona de saturación, pues la mayor parte del agua correrá en forma de escorrentía directa hacia corrientes superficiales (Wiley 1959).

Existen otras condiciones que afectan la recarga hídrica, una de ellas es el tipo de cobertura vegetal del suelo. Las áreas con bosque son más favorables a la recarga en comparación con los suelos arables, incluso para el mismo tipo de suelo. En los suelos con cobertura boscosa, el agua no taponan los intersticios de penetración y las raíces muertas constituyen canales que tienden a favorecer la recarga. Otra característica decisiva de la recarga subterránea es la topografía del terreno, en zonas con altas pendientes, la escorrentía es máxima y por lo tanto la infiltración es mínima (Benitez 1972).

La extensión de la cuenca receptora tiene influencia decisiva en la cantidad de agua que puede infiltrar en ella. La recarga aumenta si la recarga directa de precipitación se da en un espacio mayor, donde existan corrientes superficiales que infiltren en la parte media-alta de la cuenca, donde por lo general, la intensidad de precipitación tiende a ser mayor (Vargas 2000).

En Costa Rica, más del 80% del territorio es potencialmente importante para la recarga hídrica (Reynolds y Fraile 2002), las áreas potenciales de recarga son extensas, pero dentro de estas existen áreas potenciales de recarga, donde, el tipo de suelo, la cobertura del suelo, la pendiente y las propiedades geológicas, favorecen más efectivamente la infiltración del agua proveniente de las precipitaciones (Ramírez 2007). Las áreas donde haya mayor recarga hídrica son las más importantes de conservar, tanto en sus características físicas de permeabilidad como en su susceptibilidad a recibir contaminación y afectar la calidad de las aguas subterráneas. Debido a que gran parte de la vegetación es de origen orogénico, las montañas y zonas altas con

alta precipitación y suelos permeables, por lo general son áreas de recarga hídrica importantes (Faustino 2007).

#### **2.4.1-Metodologías para determinar áreas de recarga hídrica**

Existen varios métodos que consideran únicamente variables biofísicas superficiales para determinar la recarga potencial de los acuíferos, entre ellos: Balance Hídrico de Thornthwaite, Balance Hídrico de un Ecosistema de Holdridge, Método para Determinar la Recarga de Agua Subterránea (RAS), Metodología para la Determinación de Áreas de Recarga Hídrica Natural (DARHN) y el Cálculo de Recarga Potencial de Acuíferos mediante un Balance Hídrico de Suelos, definido por el autor Gunther Schosinsky.

De los anteriores, el método de Thornthwaite se ha aplicado en mayor medida para encontrar soluciones de índole agronómico e hidráulico y aunque puede ser efectivo en determinar la recarga potencial de los acuíferos, Thornthwaite no considera tanta información que podría dar respaldo a resultados más valederos. En este método, a partir de los valores de evapotranspiración, es posible realizar todo el balance hídrico (Villón 2004). En el caso de Holdridge, el método ha sido diseñado para ser aplicado en el bosque tropical, sus resultados son más prácticos y efectivos en la determinación de la salud y crecimiento de la vegetación boscosa (Hernández 2001). Los métodos *RAS* y *DARHN*, aunque son recomendados para regiones tropicales, no han sido aplicados en Costa Rica y son el resultado de una combinación de otros métodos, incluyendo el de Schosinsky (Junker 2002).

Por tanto, el método de Schosinsky, es el más apto para determinar áreas de recarga hídrica, pues además de ser el más reciente y actualizado (año 2006), considera mas variables biofísicas cuantitativas, algunas de las cuales deben obtenerse mediante trabajo de campo y análisis de laboratorio. En este método, Schosinsky considera información superficial sobre precipitación, evapotranspiración, infiltración básica ( $fc$ ), humedad del suelo inicial ( $H_{si}$ ), retención de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) y densidad aparente ( $\rho_a$ ). También es necesaria la información referente a la intercepción de lluvia según cobertura vegetal, la profundidad de las raíces y el coeficiente de infiltración ( $Ci$ ), que esta compuesto por los coeficientes de pendiente ( $Kp$ ), cobertura vegetal ( $Kv$ ) y textura del suelo ( $Kfc$ ). El  $Ci$  sugerido por Schosinsky está referido en el Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos, realizado por las Naciones Unidas en colaboración con los países Centroamericanos, por lo tanto, este método es recomendado para ejecutarse en cualquiera de los países del istmo. Schosinsky creó una ecuación en una hoja de cálculo electrónica que integra

y relaciona la información para determinar la cantidad de lluvia con potencial para recargar los acuíferos.

Los resultados del método de Schosinsky no se limitan únicamente a la recarga potencial de un acuífero y mediante una serie de ecuaciones se integran todas las variables que pueden afectar el balance hídrico de suelos, dando más amplitud y realidad al análisis, discusión y conclusiones de la investigación. Al igual que en los métodos antes mencionados, en éste se determinan únicamente variables biofísicas con el fin de obtener resultados muy cercanos a la realidad, reducir costos de investigación y hacer posible la réplica sencilla en otras áreas de estudio.

#### **2.4.2-Manejo de áreas de recarga hídrica**

El conocimiento de las áreas más importantes de recarga hídrica, es un elemento fundamental para optar por su manejo, ya sea para evaluar los recursos explotables, conocer el eventual grado de sobreexplotación que sufre o adecuar las actuaciones sobre las mismas para su uso sostenible (Heredia y Murillo 2003).

Los crecimientos urbanos, industriales, agropecuarios y explotación de otros recursos naturales consecuentes del desarrollo y crecimiento demográfico, producen efectos e implicaciones en los acuíferos. La sobreexplotación de las aguas subterráneas puede generar una disminución de descargas naturales (en manantiales y flujo base), aumento en costos de bombeo e intrusión salina en zonas costeras (degradación). Además, la impermeabilización de suelos en áreas de recarga, la deforestación (compactación de suelos por lluvias y erosión por mayor escorrentía superficial) y las construcciones (urbanizaciones y carreteras), favorecen una menor recarga superficial hacia el acuífero (Jones 1997). Además, según Heredia y Murillo (2003), la agricultura y la actividad humana, son la principal causa de contaminación del agua subterránea, degradándola y dejándola menormente disponible.

Se deben aprovechar al máximo los recursos de agua subterránea sin incurrir en su sobreexplotación, el límite de su utilización consiste en extraer anualmente una cantidad de agua igual o inferior a la de la recarga media interanual (Jones 1997). La sobreexplotación consiste en extraer más agua de la que entra en el sistema acuífero, lo que supone un consumo de las reservas de agua subterránea, algo que se refleja en el descenso del nivel freático hasta el punto que se secan los manantiales y disminuye el caudal de los ríos, generándose así, graves problemas de suministro (Llamas *et al.* 2000).

Si se considera al acuífero como un sistema regulador de entradas y salidas de agua, una disminución de las reservas hará que disminuyan las garantías de suministro ante situaciones extraordinarias como puede ser una sequía prolongada. El efecto más directo de la sobreexplotación, es el empeoramiento de la calidad química de las aguas subterráneas, a causa de los siguientes factores (Montes 2000):

- a) Menos disolución de las aguas antiguas almacenadas en el acuífero, con las nuevas de la recarga anual, lo que favorece la concentración de sales.
- b) Salinización de los pozos por el avance de las aguas marinas tierra adentro, al alterarse el equilibrio entre el agua dulce y el agua salada.
- c) Recarga de aguas contaminadas desde los ríos a los acuíferos, ya que los ríos pasan de ser efluentes a ser influyentes.
- d) Recarga de las aguas diluidas con lixiviación de sustancias contaminantes situadas sobre el acuífero.

Las actividades económicas deben considerar técnicas de producción tendientes a proteger y conservar el recurso hídrico subterráneo y superficial. Las Áreas de Recarga Hídrica deben ser protegidas por la legislación, la institucionalidad y los representantes civiles quienes utilizan el recurso hídrico para su beneficio (UNESCO 1980). Es indispensable la medición de parámetros y variables hidrológicas que hagan posible una mejor descripción, análisis y manejo del agua superficial, subsuperficial y subterránea en el planeta. (Starosolszky 1987).

### 3-METODOLOGÍA

#### 3.1- Área de estudio

La investigación se realizó en parte del territorio que comprende las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito. Estas microcuencas se ubican en el Cantón de San Carlos, Provincia de Alajuela, Costa Rica. Las microcuencas Palo y Marín irrigan la subcuenca del río Platanar y la microcuenca San Rafaelito irriga la subcuenca del río San Rafael. Ambas subcuencas son importantes efluentes de la gran cuenca del Río San Carlos (Blanco 2005). En la Figura N° 3 se muestra la ubicación de las microcuencas de interés.

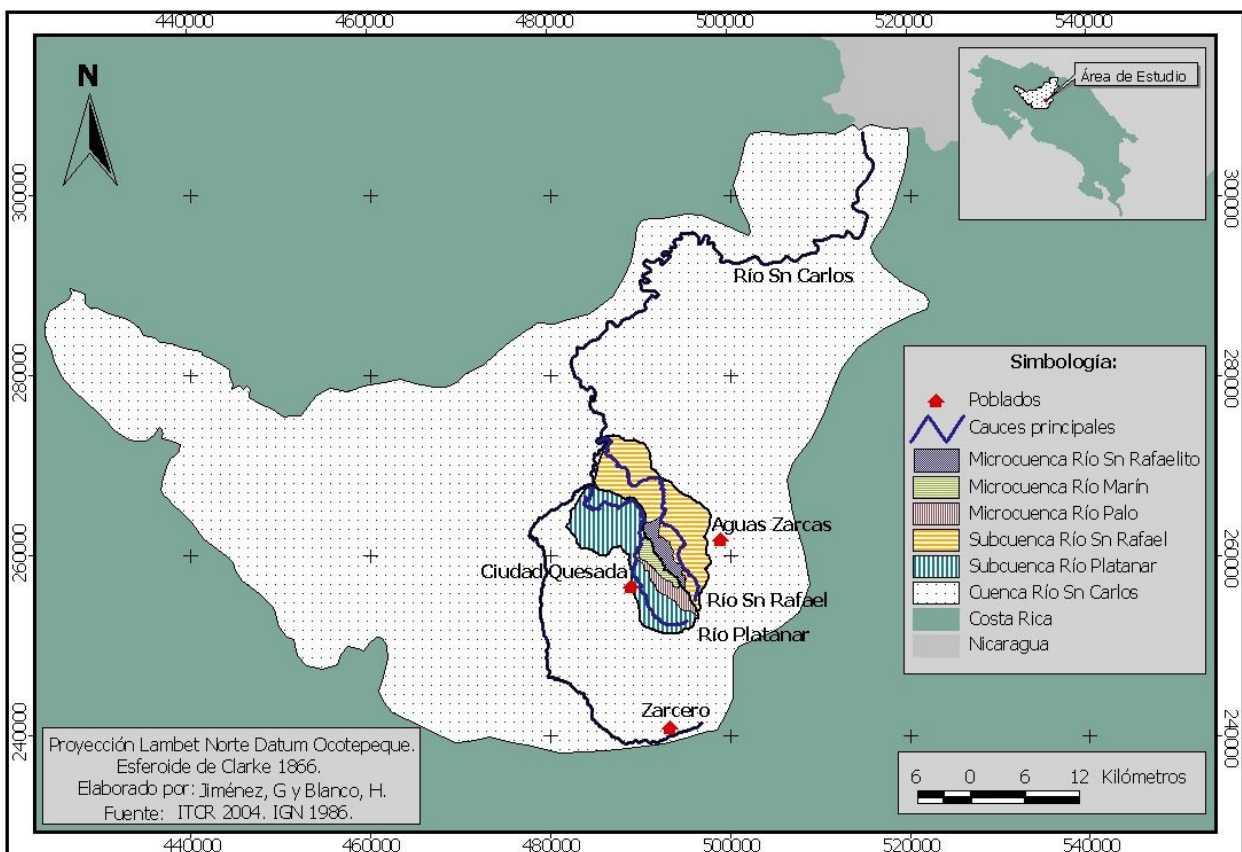
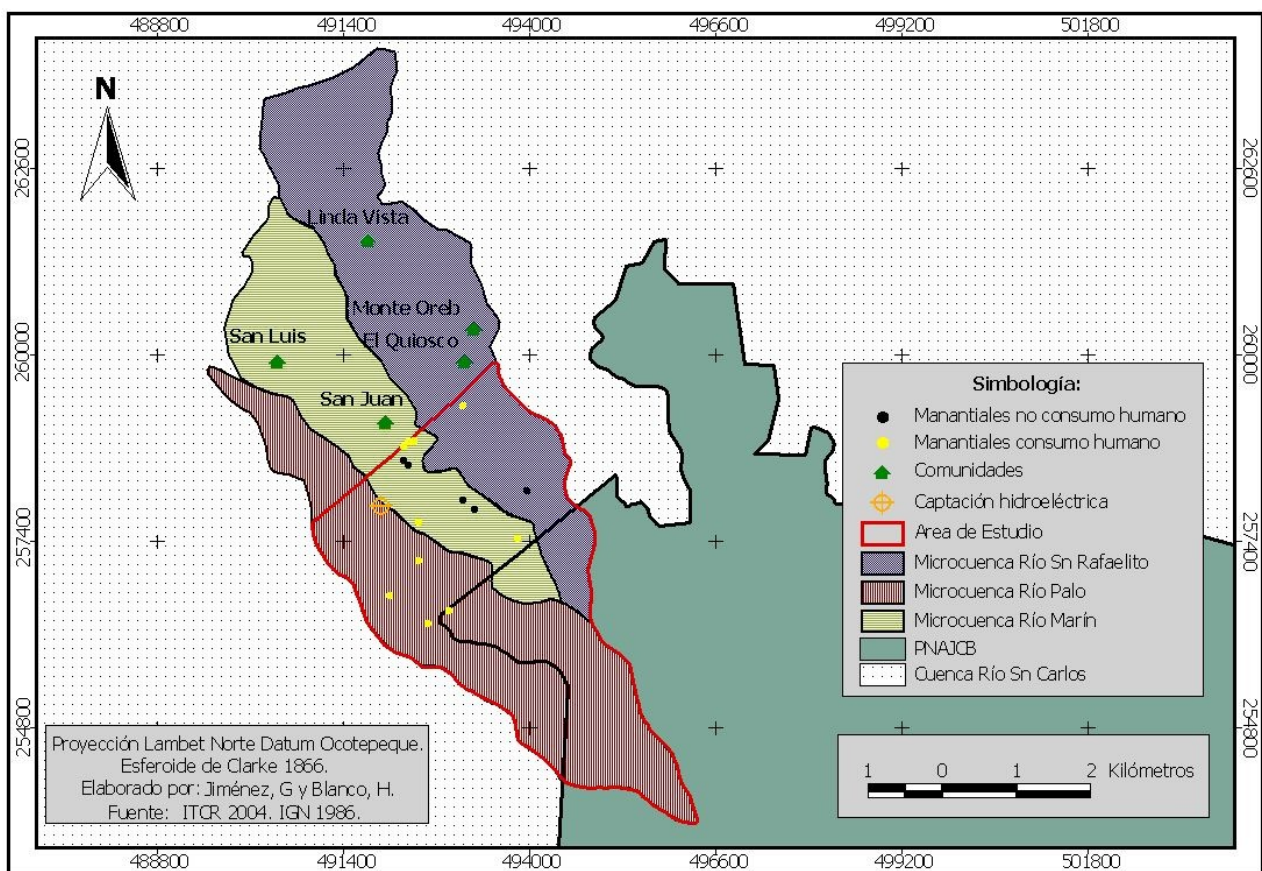


Figura N° 3. Ubicación de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito.

Las tres microcuencas tienen su origen en el flanco noroeste del Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco (*PNAJCB*), sitio protegido de importancia para la recarga hídrica, que alimenta manantiales, microcuencas, subcuencas y cuencas, que abastecen de agua a poblaciones y actividades productivas que se dan en los Cantones de San Carlos, Grecia, Valverde Vega y Alfaro Ruiz (Guzmán 2005). En la Figura N° 4 se muestra la delimitación del área de estudio y se ubican 15 manantiales en total, 5 no son utilizados para consumo humano, pero 10 de ellos abastecen de agua potable a las comunidades de San Juan, San Luís, Linda Vista, El Quiosco y Monte Oreb, así como el punto de captación de agua que la empresa El Embalse S.A utiliza para generación hidroeléctrica.



**Figura N° 4. Ubicación del área de estudio, poblados, manantiales y captación de agua para generación hidroeléctrica.**

En el área de estudio se presenta un relieve irregular con pendientes entre 10 y 70°. La altitud va desde los 600 a los 2000 msnm (Blanco 2005). Predomina la zona de vida bosque pluvial premontano, con una temperatura promedio de 22°C y una precipitación promedio anual de 4200mm (Salguero 2000).



Según la metodología vigente para determinar la capacidad de uso del suelo, el área de estudio presenta las clases de suelo IV, VI, VII y VIII (Cubero 1995).

Las tres microcuencas tienen una extensión de 2945 ha, de las cuales 1492.8 ha (14.93 km<sup>2</sup>), comprenden el área de estudio, ósea, poco más de un 50% del territorio que comprenden las tres microcuencas (ITCR 2004). En cuanto al uso del suelo, predomina la actividad agropecuaria (el ganado lechero y el cultivo de caña) y habitacional. Persisten parches de bosque y cierta conectividad dentro del *PNAJCB*. La mayoría de los márgenes de las microcuencas, aún conservan una delgada cobertura forestal, también se encuentran algunas tierras en barbecho (charral y tacotal).

Dentro del área de estudio, la mayor parte de la población tiene acceso a servicios básicos como agua, electricidad, teléfono (residencial, público y comercial) y recolección de desechos sólidos. La escuela local y el Equipo Básico de Atención Integral e Salud (*EBAIS*), garantizan educación y salud a la población local.

Según el *EBAIS* (2002), la población residente dentro de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito es de aproximadamente 6500 habitantes.

### **3.2-Método**

Considerando el contenido, posibles resultados y aplicabilidad de metodologías para determinar por medio de variables biofísicas, la recarga potencial de los acuíferos, se analizaron los siguientes métodos: Balance Hídrico de Thornthwaite, Balance Hídrico de un Ecosistema de Holdridge, Método para Determinar la Recarga de Agua Subterránea (*RAS*), Metodología para la Determinación de Áreas de Recarga Hídrica Natural (*DARHN*) y el Cálculo de Recarga Potencial de Acuíferos mediante un Balance Hídrico de Suelos de Gunther Schosinsky. A partir de este análisis se concluyó que debido a los requerimientos de información que respaldan resultados más próximos a la realidad, a la amplitud del análisis y conclusiones que permite, así como a su reciente actualización y aplicación en Costa Rica, es el método de Schosinsky el más apto para desarrollar la presente investigación.

Se debe mencionar que en la Zona Norte de Costa Rica, es la primera vez que se aplica este método y por lo tanto, la información que se generará es novedosa y estará disponible para

ser comparada, validada o refutada por otras investigaciones que en este tema se lleven a cabo en la región.

La toma de datos en el campo se dio en el periodo comprendido entre los meses de Enero y Marzo del año 2008.

A continuación se describe el “Cálculo de Recarga Potencial de Acuíferos mediante un Balance Hídrico de Suelos”, que consiste en 16 pasos.

### **3.2.1-Primer paso: Delimitar el área de estudio**

Una vez que se determinó el área de estudio, mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se procedió a delimitar la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito. Para la delimitación del área de estudio se utilizó, tanto el mapa digital de las hojas cartográficas de Aguas Zarcas N° 3347 III y Quesada N° 3346 IV (IGN 1986), como la fotografía aérea Encarta-2005 N° 485p0351 (CENAT 2005).

### **3.2.2-Segundo paso: Determinar la distribución de las precipitaciones**

Mediante convenio con el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), se tuvo acceso a información pluviométrica de 14 estaciones meteorológicas que se encuentran próximas al área de estudio. Las estaciones de interés fueron: Santa Clara, Florencia, La Marina, COOPELESCA, El Chato, Las Nubes, Río Segundo, San Vicente, Bajos del Toro, San Gerardo, Gorrión, Quebrada Pilas, Alto Palomo y Picada Palmira. De estas estaciones se consideraron los registros de información pluviométrica del periodo comprendido entre el año 2003 y 2006. En el ámbito estadístico, estos tres años, fueron suficientes para determinar una media muy aproximada a la realidad.

La precipitación promedio mensual se calculó mediante la ecuación de la media aritmética, que responde a la siguiente ecuación (Gómez 2003):

$$P = (Pm_1 + Pm_2 \dots) / n \quad (1)$$

Donde:

$P$ = Precipitación promedio mensual

$P_1 + P_2 \dots$ = Precipitación promedio mensual

$n$ = Número de meses

Una vez que se tuvo la ubicación geográfica conforme proyección del sistema Lambert Costa Rica Norte (Ocotepeque) y los resultados promedio mensuales de cada estación, mediante el uso de un SIG se procedió a utilizar el método de Polígonos de Thiessen, el cual considera la no uniformidad en la distribución de las estaciones pluviométricas mediante un factor de ponderación para cada una de las estaciones, dibujando líneas que las conectan unas con otras (Villon 2004). Las mediatrices o perpendiculares bisectrices, formaron polígonos alrededor de cada estación, delimitando el rango de influencia de cada una de ellas dentro del área de estudio, permitiendo crear un mapa de precipitaciones (Linsley *et al.* 1977).

### **3.2.3-Tercer paso: Determinar la Evapotranspiración Potencial (ETP)**

Al igual que en la determinación de la distribución de las precipitaciones, fue necesario un convenio con ICE y IMN para tener acceso al registro de temperaturas de cinco estaciones meteorológicas que se encuentran próximas al área de estudio. Las estaciones de interés fueron: Santa Clara, La Marina, COOPELESCA, El Chato, Bajos del Toro y San Vicente. De igual manera, se consideraron los registros de temperatura del periodo comprendido entre el año 2003 y 2006. La temperatura promedio mensual se calculó mediante la ecuación de la media aritmética, que responde a la siguiente ecuación (Gómez 2003):

$$T = (Tm_1 + Tm_2 \dots) / n \quad (2)$$

Donde:

$T$ = Temperatura promedio mensual

$Tm_1 + Tm_2 \dots$ = Temperatura promedio mensual

$n$ = Número de meses

Una vez conocida la ubicación geográfica de estas estaciones, se creó un mapa de temperatura creado mediante el método de Polígonos de Thiessen.

Ya conociendo los resultados promedio mensuales y anuales de temperatura en cada estación, se procedió a determinar la Evapotranspiración Potencial (ETP), para lo cual se aplicaron los métodos de Hargreaves, Thornthwaite y Blaney y Criddle.

De los anteriores, el método de Blaney y Criddle utilizado por Schosinsky es el más recomendado para muchos países americanos, muy utilizado en Costa Rica y para su cálculo requiere únicamente la temperatura media mensual y el porcentaje de horas luz solar mensual (Aparicio 1989), por lo tanto, éste es el método utilizado para determinar la *ETP*. La ecuación que corresponde al método de Blaney y Criddle es la siguiente (Schosinsky 2006):

$$ETP (mm/mes) = (8,10 + 0,46T) Ps \quad (3)$$

Donde:

*ETP* = Evapotranspiración potencial en mm/mes

*T* = Temperatura media mensual en grados centígrados

*Ps* = Porcentaje de horas de luz solar mensual, con respecto al año

Para determinar el *Ps*, se utilizó el Cuadro N° 1, el cual muestra porcentajes de horas luz solar para la latitud 10° del Hemisferio Norte, por ser dicha latitud en la que se ubica Costa Rica.

**Cuadro N° 1: Porcentaje de horas de sol mensual, respecto al año, en la latitud 10° del hemisferio norte.**

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
%	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.10

Fuente: Custodio y Llamas (1983).

### **3.2.4-Cuarto paso: Determinar el tipo de suelo**

En el mapa digital del tipo de suelos elaborado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (*ITCR*) a escala 1:50.000, se identificó el tipo de suelo y algunas de sus características. Mediante el uso de un SIG, se elaboró un mapa digital que identifica los tipos de suelo persistentes en el área de estudio (*ITCR* 2002).

Se realizó un análisis físico de suelo en los distintos tipos de cobertura vegetal presentes en cada tipo de suelo. Para determinar la retención de humedad, se colectaron muestras de suelo con anillos de acero inoxidable, con dimensiones de 0.5x2cm de diámetro. Con ayuda de un martillo y un muestreador, los anillos se introdujeron en el suelo a una profundidad aproximada de 2cm, con ayuda de una pala pequeña, se extrajeron los anillos rellenos totalmente de suelo. En seguida, con una cuchilla, se limpió cuidadosamente cada muestra y se le quitó el suelo sobrante a los bordes de cada anillo, se envolvió cada muestra con papel aluminio y se empaco en una bolsa sellada, posteriormente, cada muestra se llevo al Laboratorio de Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, donde fueron saturadas de humedad durante 24 horas, para posteriormente ser sometidas a presiones de 0,33 Bares (datos referentes a la capacidad de campo) y 15 Bares (datos referentes al punto de marchitez permanente), respectivamente.

Para determinar la densidad aparente ( $\rho_a$ ) del suelo, se colectaron muestras de suelo con cilindros de 10x2cm de diámetro, a 15cm de profundidad de suelo. La colecta se realizó de la misma manera como se obtuvieron las muestras de los anillos (en el caso anterior). En el Laboratorio de Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, cada muestra fue pesada antes de someterla a una estufa a 110°C durante 24 horas, luego de haberse sometido a esta temperatura, las muestras fueron enfriadas y nuevamente pesadas. La diferencia entre la masa del suelo seco y el volumen del cilindro, determinaron la densidad aparente del suelo en cada una de las muestras. (Hernández y Cabalceta 1999).

Para convertir la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), de porcentaje de humedad por peso de suelo seco (datos dados en laboratorio) a porcentaje de humedad por volumen, se aplicó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de humedad por volumen} = (\% \text{ de humedad por peso de suelo seco}) (\text{densidad aparente}) \quad (4)$$

### **3.2.5-Quinto paso: Determinar el tipo de cobertura vegetal del suelo**

Mediante el uso de un SIG y la foto aérea Encarta-2005 N° 485p0351 (CENAT 2005), se creó un mapa digital que muestra el tipo de cobertura vegetal del suelo persistente en el área de estudio. Para cada tipo de cobertura vegetal del suelo, Schosinsky (2006) sugiere los coeficientes que se presentan en el Cuadro N° 2.

#### **Cuadro N° 2: Coeficientes sugeridos para los diferentes tipos de cobertura vegetal del suelo**

Por cobertura vegetal	Coefficiente (Kv)
Cobertura con zacate en una proporción menor a 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,1
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,2
Cobertura con zacate en una proporción mayor a 75%	0,21

Fuente: Schosinsky (2006).

Del Cuadro N° 2 debe entenderse que la cobertura con zacate en una proporción a 50% es aquella área que presenta al menos un 50% de zacate, mientras el restante 50% puede estar cubierto de cultivos, rocas, árboles u otros. Esta misma descripción aplica para la cobertura con zacate en un 75%, donde un 75% lo debe constituir el zacate. La cobertura de terrenos cultivados se refiere a cultivos mensuales, anuales y perennes y el pastizal representa toda aquella área dedicada a la actividad agropecuaria (ganado de leche y carne) con muy baja o nula presencia de árboles. A su vez, la cobertura boscosa debe representar parches considerables de bosque primario o secundario.

### 3.2.6-Sexto paso: *Determinar los rangos de pendientes*

Mediante el uso de un S/G, se elaboró un mapa de elevación digital en el área de estudio, utilizado para obtener a su vez un mapa digital de pendientes en porcentaje. El mapa permitió agrupar áreas con igual pendiente, dichas áreas son conocidas como isopendientes.

Según la pendiente predominante sobre la superficie, en el Cuadro N° 3 se muestra como se asignaron los coeficientes de pendiente ( $k_p$ ) (Schosinsky 2006).

**Cuadro N° 3: Coeficientes de pendientes asignados según la pendiente que predomina en el área de estudio.**

Terreno	Pendiente (%)	Coefficiente (Kp)
Muy regular	0 – 0.20	0,3
Regular	0.21 – 1	0,2

Algo regular	1.1 – 2	0,15
Poco regular	2.1 – 7	0,1
Muy irregular	Mayor a 7	0,06

Fuente: Schosinsky (2006).

### **3.2.7-Sétimo paso: Determinar la infiltración básica**

Mediante el uso de un SIG, se creó un mapa digital a partir de la superposición de los mapas que identifican el de tipo de suelo, la pendiente y el tipo de cobertura del suelo. Este mapa se creó considerando los límites o “parteaguas” de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito. Esa superposición generó otro mapa con los polígonos que comparten las variables de tipo de suelo, pendiente y cobertura del suelo. Las pruebas de infiltración se realizaron en cada polígono durante la época de invierno (mes de Diciembre), cuando el suelo se encontraba más cerca de su saturación.

Se seleccionó el sitio para realizar la prueba evitando que estos fueran áreas compactadas con el peso de maquinaria, grietas, hormigueros o cualquier otra perturbación anormal del suelo (Orozco *et al.* 2003).

El método utilizado es el conocido como infiltrometro de doble anillo para el cual se contó con dos cilindros, uno de 50cm de diámetro (cilindro a) y otro de 30cm de diámetro (cilindro b). Ambos cilindros (el cilindro b dentro del cilindro a) se enterraron a golpe hasta penetrar en el suelo, 5cm en el caso del cilindro a y 10cm en el caso del cilindro b, procurando que entraran verticalmente. El golpeteo fue concéntrico y uniforme para evitar aflojar el suelo y modificar sus propiedades físicas (Hernández y Cabalceta 1999).

Antes de depositar el agua en el cilindro b, se depositó agua en el cilindro a, en el cual, el agua se mantuvo a un nivel de 5cm durante toda la prueba. En el cilindro b, el agua se depositó hasta alcanzar una altura de 7.5cm y durante la prueba, el nivel del agua no bajó de 2.5cm. El cilindro a, se utilizó para amortiguar el movimiento o desplazamiento lateral excesivo del agua que se depositó en el cilindro b (Hernández y Cabalceta 1999).

El inicio de las lecturas se dio inmediatamente después de que el cilindro b fuera llenado hasta alcanzar los 7.5cm. La lectura de la lámina infiltrada se realizó por medio de una regla de centímetros adherida al cilindro. Las lecturas se realizaron en intervalos de tiempo de 1, 2, 3, 4, 5,

6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 75, 90, 105 y 120 minutos, es decir, hasta que el suelo alcanzó su capacidad de infiltración básica. Se requirió un cronómetro para medir los intervalos de tiempo y una libreta de apuntes de campo (Hernández y Cabalceta 1999). Los datos obtenidos fueron ordenados respetando el formato del Cuadro N° 4.

**Cuadro N° 4: Plantilla de datos con información requerida para determinar la infiltración básica del suelo (fc).**

Microcuencia \_\_\_\_\_ Tipo de Suelo \_\_\_\_\_  
 Tipo de cobertura del suelo \_\_\_\_\_ N° de Prueba \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

<b>A-</b>	<b>B-</b>	<b>C-</b>	<b>D-</b>	<b>E-</b>	<b>F-</b>	<b>G-</b>
<b>Tiempo</b>	<b>Intervalos /</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Lectura</b>	<b>Diferencia /</b>	<b>Veloc. Infilt.</b>	<b>Veloc. Infilt.</b>
<b>(min)</b>	<b>lectura</b>	<b>acumulado</b>	<b>(cm)</b>	<b>lecturas</b>	<b>(cm/min)</b>	<b>(mm/día)</b>
	*					

- Columna A: Tiempo en que se inicia el registro de datos y las lecturas siguientes
- Columna B\*: Tiempo muerto de llenado del cilindro nuevamente
- Columna B: Lectura del tiempo anterior - lectura del tiempo posterior
- Columna C: Lectura anterior de tiempo acumulado + lectura posterior (columna B)
- Columna D: Identifica los tiempos de llenado del cilindro
- Columna E: (Lectura anterior de la columna D – lectura posterior de la columna D)
- Columna F: (Lectura de la columna E x 60 min/hr) / tiempo de la columna B)
- Columna G: Conversión de la columna F

Fuente: Hernández y Cabalceta (1999).



Para obtener los datos de velocidad de infiltración, en el programa de Microsoft Excel se insertó una grafica que mostró el tiempo en minutos en el eje de las “X” y los valores de infiltración en cm/min, en el eje de las “Y”. En la grafica se determinó la tendencia o línea de mejor ajuste de los datos obtenidos en cada prueba y así se definió la tasa de infiltración básica dada en el suelo cuando éste alcanzó su saturación (Hernández y Cabalceta 1999).

### **3.2.8-Octavo paso: Determinar la profundidad de las raíces**

Los valores de profundidad de las raíces extractoras de agua según el tipo de cobertura vegetal del suelo, primeramente fueron determinados observando en los cortes de camino para posteriormente ser comparados con los valores sugeridos por Schosinsky en el Cuadro N° 5.

**Cuadro N° 5: Profundidad de las raíces según el tipo de cobertura vegetal del suelo.**

<b>Tipo de Cobertura Vegetal del Suelo</b>	<b>Profundidad de las raíces (m)</b>
Alfalfa (pastos y zacates)	1 – 2
Algodón	1 - 1.7
Banano	0.5 - 0.8
Caña Azúcar	1.20 – 2
Fríjol	0.5 - 0.7
Cebolla	0.3 - 0.5
Cítricos	1.20 - 2.0
Bosques	2.0 - 3.0

Fuente: Schosinsky (2006).

El tipo de cobertura del suelo utiliza parte de la humedad del suelo en una franja igual a la profundidad de las raíces. Para convertir el porcentaje de humedad por volumen en mm de agua existentes en la franja de profundidad de las raíces, se resolvió la siguiente ecuación:

$$mm \text{ de agua} = (\text{porcentaje de humedad por volumen}) (\text{profundidad de las raíces en mm}) \quad (5)$$

### **3.2.9-Noveno paso: Determinar la intercepción de la lluvia en el follaje**

Los valores referidos a la intercepción de la lluvia en el follaje según el tipo de cobertura vegetal del suelo, fueron determinados en el Cuadro N° 6 por Schosinsky (2006):

**Cuadro N° 6: Retención de lluvia en el follaje según tipo de cobertura vegetal del suelo.**

<b>Tipo de Cobertura Vegetal del Suelo</b>	<b>Retención de lluvia en el follaje (%)</b>	<b>Retención de lluvia en el follaje (100% = 1%)</b>
General (Cualquiera que no sea bosque denso)	12	0,12
Bosque denso	20	0,20

Fuente: Schosinsky (2006).

Si se hubiesen encontrado valores de precipitación iguales o menores a 5mm/mes, entonces la retención de lluvia en el follaje hubiera sido igual a la precipitación (Schosinsky 2006).

### **3.2.10-Décimo paso: Determinar la humedad inicial del suelo**

Para determinar la recarga potencial de agua hacia el acuífero, fue necesario conocer la humedad inicial del suelo en un mes determinado. En este caso, se consideró que en Costa Rica generalmente al final de la época de mayor precipitación, el suelo se encuentra a capacidad de campo. Uno de los criterios utilizados para seleccionar este mes fue determinar los meses consecutivos de Agosto, Septiembre y Octubre, donde el suelo se encuentra a capacidad de campo, o mejor dicho, cuando la precipitación que infiltra mensualmente supera la evapotranspiración potencial mensual. En el último mes de la época lluviosa (Octubre), la humedad del suelo final, fue igual a la capacidad de campo (mm) y por lo tanto la humedad del suelo inicial en el mes siguiente (Noviembre) también es igual a la capacidad de campo. Al final del ciclo anual, la humedad final calculada para el último mes, coincidió con la humedad inicial del mes de partida, ósea, la del mes con humedad conocida.

### **3.2.11-Décimo primer paso: Identificación de las ARH**

Mediante el uso de un SIG, se creó un mapa digital con las Áreas de Recarga Hídrica (ARH) que compartieron las mismas variables de precipitación, tipo de suelo, pendiente y cobertura vegetal del suelo, en cada microcuenca. En cada una de las ARH, se realizó un balance hídrico de suelos con el fin de estimar la cantidad de agua que drena del suelo hacia un posible acuífero que se encuentre ubicado debajo de éste.

### **3.2.12-Décimo segundo paso: Balance hídrico de suelos para cada ARH**

Toda la información que se generó en los pasos anteriores, fue la base para utilizar la hoja electrónica creada por Schosinsky (2006), para realizar el balance hídrico de suelos. Esta ecuación general permitió obtener diferentes valores, entre ellos y el que cumple enfáticamente con los objetivos de esta investigación, la cantidad potencial de agua que infiltra y recarga los acuíferos ( $R_p$ ).

En los Cuadros N° 7 y N° 8, se muestra el contenido de la ecuación del balance hídrico de suelos, que se resolvió para cada una de las Áreas de Recarga Hídrica (ARH) que compartieron las mismas variables de precipitación, tipo de suelo, pendiente y cobertura vegetal del suelo en cada microcuenca. Para aplicar la ecuación, se requirió de los datos que aparecen con un signo de pregunta (?), información que fue determinada en cada uno de los pasos anteriormente descritos.

**Cuadro N° 7: Simbología del contenido de la Ecuación del Balance Hídrico de Suelo aplicado a cada ARH**

Balance Hídrico de Suelos				
Área de Recarga Hídrica				
Polígono N° ¿	Microcuena: ¿	Tipo de Cobertura: ¿	Tipo de Suelo: ¿	Precipitación: ¿
<b>Simbología:</b>				
<b>Fc:</b> Capacidad de Infiltración. <b>Ci:</b> Coeficiente de Infiltración. <b>CC:</b> Capacidad de Campo. <b>PM:</b> Punto de Marchitez. <b>PR:</b> Profundidad de Raíces. <b>(CC-PM):</b> Rango de Agua Disponible. <b>DS:</b> Densidad de Suelo. <b>C1:</b> Factor de ETP, por cierre de estomas, antes de ETR <b>C2:</b> Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR <b>Kp:</b> Coeficiente por pendiente <b>Kv:</b> Coeficiente por vegetación <b>Kfc:</b> Coeficiente estimado con base a la prueba de infiltración		<b>P:</b> Precipitación Media Mensual. <b>Pi:</b> Precipitación que infiltra. <b>ESC:</b> Escorrentía Superficial <b>ETP:</b> Evapotranspiración Potencial. <b>ETR:</b> Evapotranspiración Real. <b>HSi:</b> Humedad de Suelo Inicial. <b>HD:</b> Humedad Disponible <b>HSf:</b> Humedad de Suelo Final. <b>DCC:</b> Déficit de Capacidad de Campo. <b>Rp:</b> Recarga Potencial <b>NR:</b> Necesidad de Riego. <b>Ret:</b> Retención de Lluvia		

Fuente: Schosinsky (2006).

**Cuadro N° 8: Ecuación del Balance Hídrico de Suelo aplicado a cada ARH.**

Fc (mm/d)				
Kp (0.01%)	¿			
Kv (0.01%)	¿			
Kfc (0.01%)	¿			
Ci (0.01%)			CC	¿
DS (g/cm3):	¿		PM	¿
PR (mm)	¿		(CC-PM)	0
HSi (mm)	¿			0
N° de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	¿			0
Lluvia retenida (1%) : Bosques=0.2% - Otros=0.12%	¿			0

Concepto	Meses												Total
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	
P (mm)	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿
Ret (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pi (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESC (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETP (mm)	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿	¿
HSi (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HD (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HSf (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DCC (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rp (mm) *	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NR (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rp =Agua precipitada con potencial para recargar el acuífero.

Fuente: Schosinsky (2006)

### **3.2.13-Décimo tercer paso: Determinar el volumen de recarga en cada ARH**

El volumen de agua que recarga el acuífero, se determinó mediante la siguiente ecuación (Schosinsky 2006):

$$V = (Rp)(A) \quad (6)$$

Donde:

$V$  = volumen de recarga en  $m^3/año$

$Rp$  = Recarga potencial al acuífero en  $m/año$

$A$  = Área donde se genera la recarga potencial en  $m^2$

### **3.2.14-Décimo cuarto paso: Categorización de las ARH**

Según los resultados de Recarga Potencial ( $Rp$ ) obtenidos en el Balance Hídrico de Suelos, las *ARH* se agruparon en tres categorías. La categorización que se definió se presenta en el Cuadro N° 9 y es específica para el área de estudio.

**Cuadro N° 9: Categorización de las ARH, según valores de  $Rp$  obtenidos en el balance hídrico de suelos.**

<b>Rango de <math>Rp</math> (<math>m^3/ha/año</math>)</b>	<b>Categoría</b>
18000 – 22000	Alta
14000 - 17999.9	Madia
10000 - 13999.9	Baja

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el uso de un SIG, se creó un mapa digital que muestra la categoría a la que pertenece cada *ARH*, según sea su potencial de  $Rp$ .

### **3.2.15-Décimo quinto paso: Definir acciones de manejo para las ARH**

De manera participativa, en conjunto con líderes comunales en materia de ambiente y recurso hídrico, se definieron acciones de manejo para las *ARH* identificadas. Las mismas pretenden guiar a futuro la protección y conservación del recurso hídrico subterráneo en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito. Para el desarrollo de esta propuesta se consideraron:

Lineamientos legales:

- Uso actual del suelo.
- Tenencia de la tierra.
- Protección del recurso hídrico.
- Regulación de actividades productivas.
- Indemnización de tierras.

Lineamientos técnicos:

- Uso actual del suelo vrs uso potencial del suelo.
- Conservación del suelo.
- Recarga artificial.
- Obras mecánicas.
- Manejo de la vegetación.
- Valoración económica de actividades productivas.
- Valoración económica del agua.
- Pago por servicios ambientales (PSA).
- Ordenamiento territorial.
- Turismo sostenible

Lineamientos administrativos:

- Protección de las *ARH* bajo un plan de monitoreo.
- Prevención y control de la contaminación del agua.
- Explotación racional del agua subterránea, evitando su sobreexplotación.
- Educación ambiental.
- Equidad en la distribución del agua.
- Compra de tierras.
- Priorización de actividades de conservación.

### **3.2.16-Décimo sexto paso: Determinar el conflicto de uso del suelo en las ARH**

Mediante el uso de un *SIG* se creó un mapa digital que muestra el tipo de cobertura vegetal del suelo que se da en cada una de las *ARH*, ya sean estas de baja, media o alta *Rp*. Lo anterior se hizo con el fin de determinar el posible conflicto de uso del suelo y definir las acciones de manejo más idóneas para cada *ARH* según sea su categoría.



## **4-RESULTADOS**

El presente apartado se divide en tres subapartados con el fin de demostrar el cumplimiento de los objetivos específicos de la presente investigación. Los mismos se fundamentan en realizar una caracterización de variables biofísicas del área de estudio con el fin de crear un modelo biofísico conceptual que permita identificar Áreas de Recarga Hídrica (*ARH*) y definir acciones para su manejo.

### **4.1- Caracterización de variables biofísicas para identificar *ARH***

#### ***4.1.1- Distribución de la Precipitación, Temperatura y Evapotranspiración Potencial (ETP)***

Para determinar la distribución de la Precipitación, Temperatura y Evapotranspiración Potencial (*ETP*), se consideró únicamente la información de las estaciones meteorológicas de La Marina, COOPELESCA y San Vicente, esto debido a que son las estaciones que se encuentran más próximas al área de estudio. La información promedio mensual y anual de estas variables se presenta en los Cuadros N° 10, 11 y 12 y corresponde al registro de tres años hidrológicos, considerando el periodo comprendido entre los meses de Mayo del año 2003 y Abril del año 2006.

**Cuadro N° 10: Precipitación promedio mensual y anual para las estaciones meteorológicas de la Marina, COOPELESCA y San Vicente.**

Estación	Ubicación Geográfica	Promedio de precipitación mensual (mm)												Promedio anual (mm)
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
<b>La Marina</b>	Lat. Norte: 10° 22' Lon. Oeste: 84° 23' Altitud: 380 msnm	247.6	176.9	120.3	136.6	361.1	456.8	474.0	450.0	425.2	463.3	434.1	421.1	<b>4167.0</b>
<b>Coopesca</b>	Lat. Norte: 10° 19' Lon. Oeste: 84° 25' Altitud: 650 msnm	301.0	163.0	112.0	110.0	340.5	426.4	501.8	466.0	495.4	500.5	414.2	445.2	<b>4276.0</b>
<b>San Vicente</b>	Lat. Norte: 10° 17' Lon. Oeste: 84° 24' Altitud: 1450 msnm	253.8	163.2	94.5	105.7	327.4	433.6	459.7	461.9	440.7	454.9	469.4	448.2	<b>4113.0</b>

Fuente: ICE e IMN (2007).

**Cuadro N° 11: Temperatura promedio mensual y anual para las estaciones meteorológicas de la Marina, COOPELESCA y San Vicente.**

Estación	Ubicación Geográfica	Promedio de temperatura mensual (°C)												Promedio anual (°C)
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
<b>La Marina</b>	Lat. Norte: 10° 22' Lon. Oeste: 84° 23' Altitud: 380 msnm	20.3	21.1	21.6	22.3	23.4	23	22.3	22.5	23.1	22.6	21.7	20.6	<b>22</b>
<b>Coopesca</b>	Lat. Norte: 10° 19' Lon. Oeste: 84° 25' Altitud: 650 msnm	21.1	21.3	21.7	22.4	22.7	22.5	21.9	22.2	22.5	21.8	21.6	21	<b>21.8</b>
<b>San Vicente</b>	Lat. Norte: 10° 17' Lon. Oeste: 84° 24' Altitud: 1450 msnm	16	16.3	16.7	17.3	17.8	17.7	17.5	17.5	17.5	17.3	16.9	16.5	<b>17</b>

Fuente: ICE e IMN (2007).

**Cuadro N° 12: ETP promedio mensual y anual para las estaciones meteorológicas de la Marina, COOPELESCA y San Vicente.**

Estación	Ubicación Geográfica	Promedio de ETP mensual												Promedio ETP anual
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
<b>La Marina</b>	Lat. Norte: 10° 22' Lon. Oeste: 84° 23' Altitud: 380 msnm	140.3	131.6	150.8	152.0	164.3	158.9	160.9	159.0	152.8	152.6	141.5	140.9	<b>1806.0</b>
<b>Coopesca</b>	Lat. Norte: 10° 19' Lon. Oeste: 84° 25' Altitud: 650 msnm	143.2	132.3	151.2	152.4	161.6	156.9	159.3	157.8	150.6	149.6	141.1	142.4	<b>1798.7</b>
<b>San Vicente</b>	Lat. Norte: 10° 17' Lon. Oeste: 84° 24' Altitud: 1450 msnm	124.6	115.5	132.2	133.2	142.1	138.4	141.8	139.4	132.0	132.7	124.4	126.0	<b>1582.5</b>

Fuente: ICE e IMN (2007).

El Cuadro N° 10 muestra que los meses comprendidos entre Mayo y Diciembre son los más lluviosos, presentando valores de precipitación que oscilan entre los 330 y los 500mm, por lo tanto, es de esperar que en estos meses se de la mayor infiltración y aporte a las aguas subterráneas. Igualmente, en los meses comprendidos entre Enero y Abril se presentan las precipitaciones menores con promedios que oscilan entre los 90 y los 300 mm. Además, no se presentan grandes diferencias en los promedios anuales de precipitación de las tres estaciones meteorológicas, esto debido posiblemente a que en la zona predomina un clima moderadamente homogéneo y estable y a la poca extensión del área de estudio (14.9 km<sup>2</sup>). El promedio anual de precipitación para toda el área de estudio es de 4185.3 mm.

En el área de estudio se presenta una precipitación de tipo orográfica, originada cuando los vientos húmedos procedentes de las llanuras del norte y el Mar Caribe, ascienden mecánicamente al tener contacto con la cordillera volcánica central. El aire asciende, se enfría y se condensa, generando precipitaciones a sotavento en distintos niveles del macizo montañoso. Como se ve en el Cuadro N° 10, el promedio de precipitación anual de 4113 mm, es el más bajo y se presenta en la parte alta de las microcuencas (donde tiene influencia la estación meteorológica de San Vicente), esto muy probablemente ocurre debido a que la condensación del agua o "punto de rocío" se da en partes más bajas (Linsley *et al.* 1977).

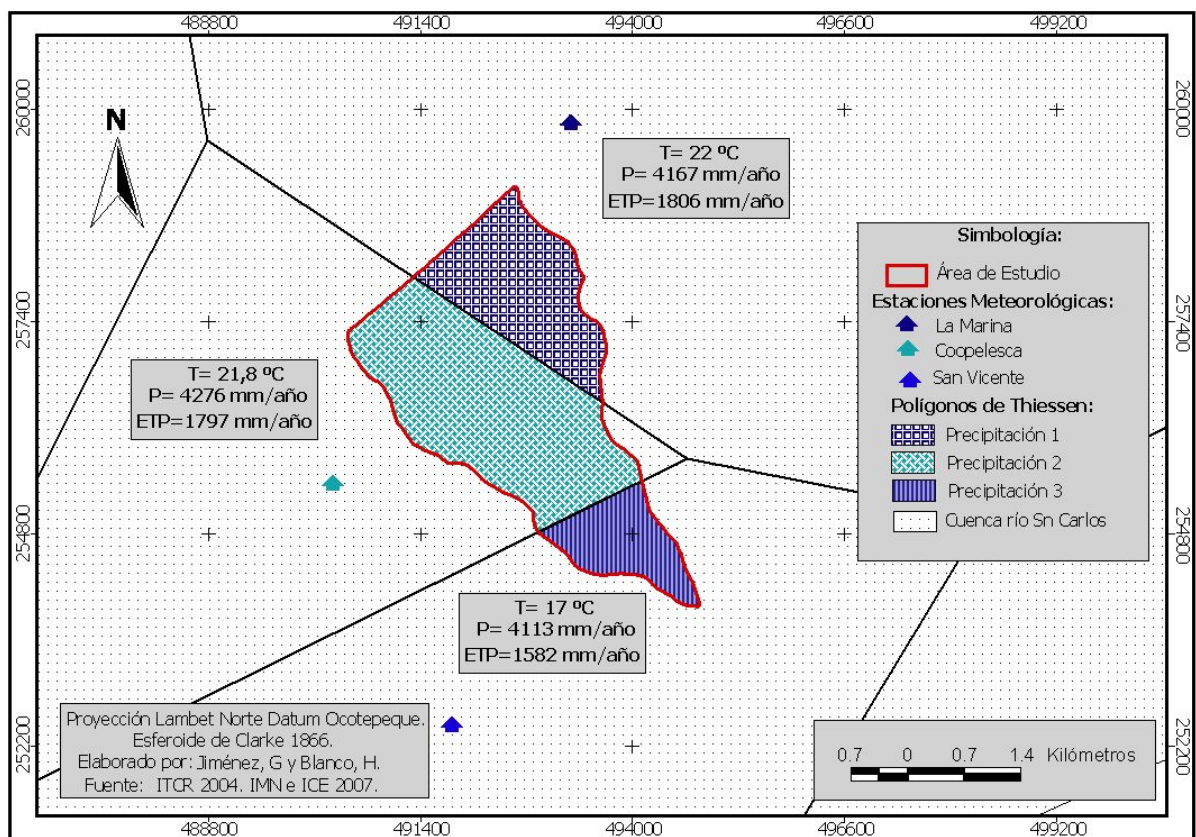
En cuanto a la temperatura, en el Cuadro N° 11 se presentan valores muy estables durante todo el año, pero destaca el registro de datos más bajos en la parte alta de las microcuencas con un promedio anual de 17 °C, fenómeno causado por la influencia de vientos húmedos provenientes de la vertiente atlántica. En general, la temperatura promedio anual para toda el área de estudio es de 20.2 °C.

En el Cuadro N° 12 se muestra cierta estabilidad en los promedios mensuales de *ETP* con valores que oscilan entre 115 y 165mm, esta estabilidad es congruente con los valores de temperatura que se presentan en el Cuadro N° 11. En la parte media de las microcuencas (con base en la información obtenida en las estaciones meteorológicas de La Marina y COOPELESCA), anualmente se presenta una mayor temperatura que induce una mayor *ETP*, la cual supera los valores dados en las partes altas, en más de 200mm.

También se nota que en los meses de Marzo y Abril, la evapotranspiración es mayor que la precipitación, por lo tanto, en estos meses no se da ningún aporte a las aguas subterráneas. Aun así, se debe mencionar que en los restantes 10 meses, la *ETP* es menor a la precipitación y por lo tanto, es de esperarse una recarga hídrica importante.

Específicamente entre los meses de Junio y Diciembre se presentan las mayores precipitaciones y por lo tanto, es en estos meses donde hay mayores probabilidades de que el agua infiltre, percole y recargue un posible acuífero en la zona.

Con el método de Thiessen, se creó un mapa con tres polígonos de igual Precipitación, Temperatura y ETP, delimitando así, el rango de influencia de cada estación meteorológica dentro del área de estudio. (Linsley *et al.* 1977). El mapa se muestra en la Figura N° 5.



**Figura N° 5: Precipitación media del área de estudio según registros de las estaciones meteorológicas de La Marina, COPELESCA y San Vicente.**

#### **4.1.2- Determinación del tipo de suelo**

En el área de estudio el orden de suelo Andisol se presenta sobre una geomorfología característica de colinas altas, conformada por rocas volcánicas heterogéneas que han sido afectadas por los procesos erosivos, tectónicos y el vulcanismo semiexplosivo de la cadena volcánica de la Cordillera Volcánica Central y el complejo volcánico Platanar (Lapote 1994).

Para Arenas *et al.* (1997), los materiales volcánicos corresponden a piroclastos, lavas, aglomerados, cenizas y tobas, modeladas por agentes geomorfo-tectónicos. Las rocas ígneas son principalmente del tipo brechas y lahares (Lapote 1994). El suelo es ligeramente pedregoso con reducido encharcamiento y nula inundación. La capa freática se encuentra aproximadamente a 1.4 m de profundidad y debido a la presencia de pendientes que oscilan entre los 10 y los 70°, la evidencia de erosión es moderada (MAG 2000).

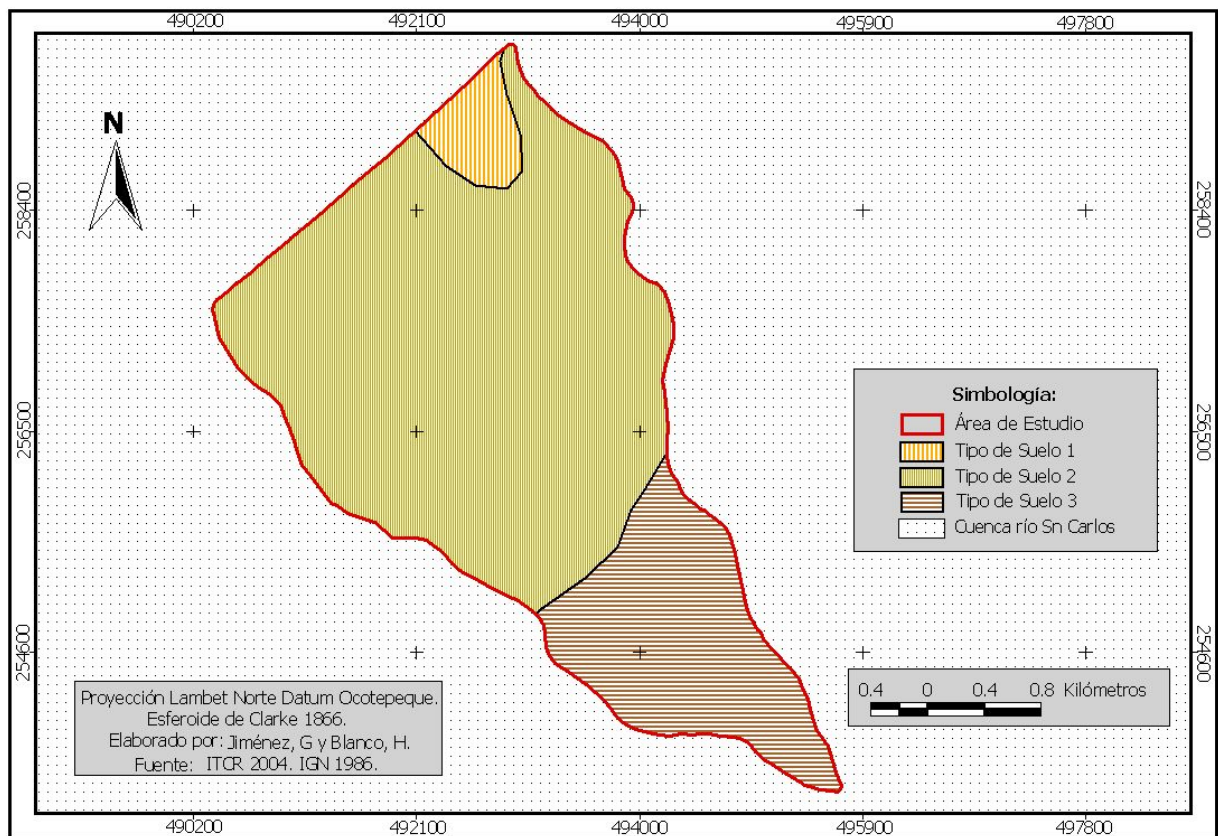
Según Alvarado *et al.* (2001), debido a la presencia de altos contenidos de compuestos organominerales estables, especialmente en el horizonte superficial, los Andisoles resultan ser suelos muy bien estructurados que propician el buen drenaje, pero a su vez, presentan una buena retención de humedad. La profundidad de estos suelos puede alcanzar hasta 1.5m (SSS 1998). En cuatro Andisoles estudiados, Alvarado *et al.* (1997) encontró una alta capacidad volumétrica para retener el agua disponible, con valores entre 10 y 30%.

Los suelos Andisoles presentan una baja densidad aparente ( $\rho_a$ ) que favorece una alta velocidad de infiltración cuando no se presentan capas endurecidas en la superficie o a poca profundidad (Alvarado *et al.* 2001). Según Alvarado *et al.* (2005), en 111 perfiles de Andisoles en Costa Rica, la  $\rho_a$  en los primeros 20cm de profundidad del suelo, osciló entre 0.3 y 0.7 mg/m<sup>3</sup>.

Una característica notoria de los Andisoles es su elevado contenido de materia orgánica, lo cual influye sobre algunas de sus propiedades mencionadas, como su baja densidad aparente y alta capacidad para retener humedad. En general, los valores de materia orgánica decrecen con la profundidad del suelo y la mineralización de estos compuestos disminuye con la altura a nivel del mar, por lo que los contenidos de sustancias orgánicas son mayores en los pisos altitudinales mas fríos (Alvarado *et al.* 2001). En estudios realizados por Alvarado *et al.* (2001), en suelos Andisoles no se presentan valores de materia orgánica mayores a 18%.

En partes cercanas a los volcanes, estos suelos son de textura franco arenosa o más gruesa, en las posiciones intermedias del relieve se presentan texturas franco-limosas o francas y en las partes inferiores ocurren texturas mayormente arcillosas, particularmente en el horizonte B. En general, en el horizonte A las texturas se caracterizan por presentar: 35-60% de arena, de 30-45% de limo y de 10-25% de arcillas (Alvarado *et al.* 2001).

En el área de estudio se identificaron 3 tipos de suelo Andisol, los cuales se muestran en la Figura N° 6.



**Figura N° 6: Tipos de suelo identificados dentro del área de estudio.**

Según el ITCR (2004), los tipos de suelo 1 y 2, se clasifican dentro del grupo de los Dystrandept, con una profundidad del horizonte A entre 0 y 40cm. El suelo tipo 1 se caracteriza por presentar pendientes entre 15 y 30% y en el suelo tipo 2 se presentan pendientes entre un 30 y un 60%. El tipo de suelo 3 pertenece al grupo de los Hidrandept, el cual se caracteriza por presentar pendientes mayores a 60%, con una profundidad de 25cm en el horizonte A y una mayor capacidad de retención de agua que los suelos 1 y 2 (Alvarado *et al.* 2001).

En los tres tipos de suelo se tomaron en total 10 muestras de suelo con el fin de determinar la capacidad que tiene el suelo para retener humedad, esta humedad está representada por la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Para la misma cantidad de muestras se determinó la  $\rho_a$  del suelo. En el Cuadro N° 13 se muestra el resultado del análisis físico de suelos.

**Cuadro N° 13: Resultado de los análisis físicos de suelo en relación a su Densidad Aparente y su Capacidad de Retener Agua.**

N° de Muestra	Tipo y Cobertura del Suelo	Densidad Aparente (mg/m <sup>3</sup> )	Retención de Humedad (%)		Agua Útil (%)
			0,33 Bares de presión (CC)	15 Bares de presión (PMP)	
1	Tipo de suelo 1 - Bosque	0.69	82.46	72.38	10.08
2	Tipo de suelo 1 - Caña	0.71	86.31	75.00	11.30
3	Tipo de suelo 2 - Bosque	0.79	110.15	100.11	10.04
4	Tipo de suelo 2 - Zacate 50%	0.59	129.49	119.86	9.63
5	Tipo de suelo 2 - Pastizal	0.80	98.28	89.27	9.01
6	Tipo de suelo 2 - Zacate 75%	0.30	250.20	225.83	24.37
7	Tipo de suelo 2 - Caña	0.52	125.72	113.46	12.26
8	Tipo de suelo 3 - Zacate 50%	0.36	192.84	175.08	17.75
9	Tipo de suelo 3 - Bosque	0.44	171.62	151.34	20.29
10	Tipo de suelo 3 - Zacate 75%	0.42	170.29	156.36	13.92

Fuente: CIA (2007).

En el Cuadro N° 13 se notan bajos valores promedio de  $\rho_a$ : 0.7 mg/m<sup>3</sup> en el tipo de suelo 1, 0.6 mg/m<sup>3</sup> en el tipo de suelo 2 y 0.4 mg/m<sup>3</sup> en el tipo de suelo 3. Además, se muestra una mayor capacidad para almacenar humedad en el tipo de suelo 3, moderada capacidad de almacenamiento en el tipo de suelo 2 y menor capacidad de almacenamiento en el suelo 1.

Según Alvarado *et al.* (2001) los valores de  $\rho_a$  que en este caso oscilan entre 0.30 y 0.80 mg/m<sup>3</sup>, son comunes en suelos de origen volcánico, los cuales se caracterizan por ser poco densos debido a: a) poseen minerales amorfos o alófanos con un tamaño de arcillas menor a 0.002mm, b) presentan altos contenidos de materia orgánica y c) contienen un amplio espacio poroso. Las anteriores características justifican la ocurrencia de un suelo joven con un grado considerable de meteorización (Alvarado *et al.* 2005).

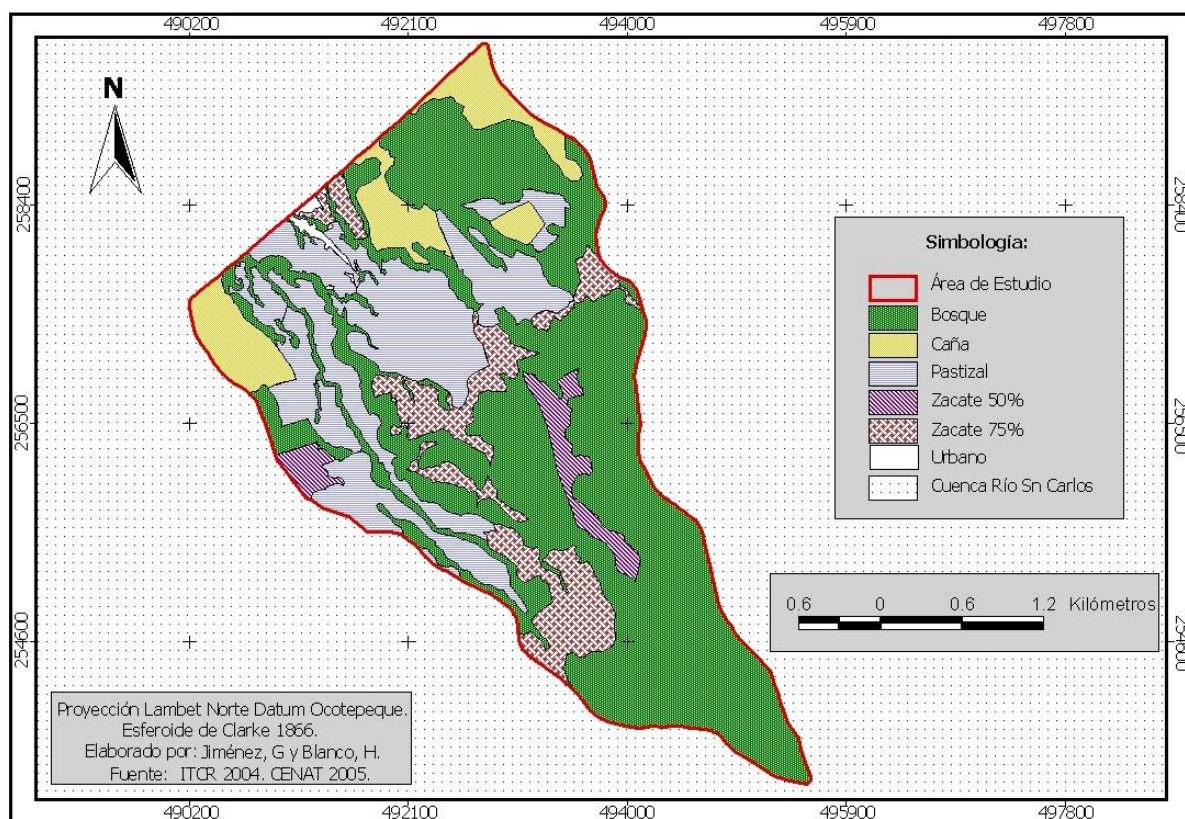


En general, comparando los valores de retención de humedad y  $\rho_a$  obtenidos por Alvarado *et al.* (2005) con los resultados obtenidos en este caso, en el área de estudio se presenta una alta capacidad de retención de humedad, altos valores de CC y bajos valores de  $\rho_a$ .

Como complemento al análisis de retención de humedad y  $\rho_a$ , en el laboratorio del Centro de Investigación Agronómica (CIA) se realizó un análisis físico de suelo para cada muestra, donde se obtuvieron porcentajes de arena, limo y arcilla, poco congruentes con las características que presentan los suelos de orden Andisol. En estos se obtuvo en promedio: 81% de arena, 13% de limo y 6% de arcilla (ver anexo 2). Por este motivo, se realizaron nuevos análisis en el laboratorio del Instituto Nacional de Investigación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), donde los resultados sí fueron congruentes con la descripción física de los suelos Andisoles hecha anteriormente por Alvarado *et al.* (2001), los valores obtenidos en cinco muestras fueron: 47% de arena, 36% de limo y 17% de arcilla (ver anexo 3). Dada esta situación, el laboratorio del CIA acepta que hubo un error en el procedimiento del análisis, pues en el caso de los suelos Andisoles, las muestras debieron secarse al aire libre y no en horno, ya que según Alvarado *et al.* (1999), los altos contenidos de materia orgánica y minerales amorfos de estos suelos, al secarse durante 2 días a 60°C, provocó la pseudoagregación o formación de pseudoagregados normalmente del tamaño de las arenas, dándose una sobreestimación de las mismas (ver anexo 4). Debido a lo anterior, se consideran los resultados de retención de humedad y  $\rho_a$  obtenidos en el CIA, los cuales son congruentes con las propiedades de textura obtenidas en el INTA.

#### **4.1.3- Determinación del tipo de cobertura vegetal del suelo**

En la Figura N° 7, se muestra la distribución del tipo de cobertura vegetal del suelo que se presenta dentro del área de estudio.



**Figura N° 7: Tipo de cobertura vegetal del suelo dada en el área de estudio.**

A cada tipo de cobertura vegetal del suelo, se le asignó un coeficiente. Dicha asignación se describe en el Cuadro N° 14.

**Cuadro N° 14: Coeficientes sugeridos para los diferentes tipos de cobertura vegetal presentes en el área de estudio.**

Por cobertura vegetal	Coeficiente (Kv)
Cobertura con zacate en una proporción menor a 50%	0,09
Terrenos cultivados (Caña)	0,1
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,2
Cobertura con zacate en una proporción mayor a 75%	0,21

Fuente: Schosinsky (2006) y Elaboración propia.

La extensión de cada tipo de cobertura vegetal del suelo, se presenta en el Cuadro N° 15.

**Cuadro N° 15: Extensión de los tipos de cobertura vegetal del suelo.**

Cobertura vegetal del suelo	Extensión		
	Has	(km <sup>2</sup> )	(%)
Cobertura con zacate en una proporción menor a 50%	51.5	0.5	3.4
Terrenos cultivados (Caña)	149.4	1.5	10.0
Cobertura con pastizal	323.9	3.2	21.7
Bosques	807.0	8.1	54.1
Cobertura con zacate en una proporción mayor a 75%	153.6	1.5	10.3
Urbano	7.4	0.1	0.5
<b>Extensión del área de estudio:</b>	<b>1492.8</b>	<b>14.9</b>	<b>100.0</b>

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro N° 15 se nota que un 54% del área de estudio es bosque, algo que sin duda favorece la infiltración del agua en el suelo y su protección. Del restante 46% del área de estudio, casi la mitad (un 22%) se encuentra cubierto por pastizales dedicados a la producción agropecuaria, actividad que amenaza con compactar y contaminar los suelos, los cuales, funcionan como medio de infiltración de las aguas subterráneas. El restante 24% del territorio está cubierto por caña y zonas agroforestales (zacate y árboles).

#### **4.1.4- Determinación de la pendiente en porcentaje**

El mapa digital de pendientes muestra que dentro del área de estudio existen áreas muy poco significativas con pendiente menor a 7%, por lo tanto, se consideró el coeficiente de pendiente que se presenta en el Cuadro N° 16.

**Cuadro N° 16: Coeficiente de pendiente asignado al área de estudio.**

<b>Terreno</b>	<b>Pendiente (%)</b>	<b>Coeficiente (Kp)</b>
Muy irregular	Mayor a 7	0,06

Fuente: Schosinsky (2006) y Elaboración propia.

#### ***4.1.5- Determinación de la infiltración básica (fc)***

Se realizaron 19 pruebas de infiltración básica en las áreas que comparten las variables de tipo de suelo, pendiente y tipo de cobertura vegetal del suelo. El resultado de las pruebas de infiltración se presenta en el Cuadro N° 17.

**Cuadro N° 17: Velocidad de infiltración del agua según la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura vegetal del suelo.**

N° de Prueba	Microcuenca	Tipo de Cobertura	Tipo de Suelo	Velocidad Infiltración (cm/min)	Velocidad Infiltración (cm/hora)	Velocidad Infiltración (mm/día/m <sup>2</sup> )
1	Palo	Bosque	3	0.27	16.4	3936.0
2	Palo	Zacate 75%	3	0.01	0.6	144.0
3	Palo	Zacate 50%	3	0.02	1.2	288.0
4	Palo	Bosque	2	0.39	23.6	5657.1
5	Palo	Zacate 75%	2	0.03	2.0	475.2
6	Palo	Zacate 50%	2	0.20	12.0	2880.0
7	Palo	Pastizal	2	0.01	0.4	96.0
8	Palo	Caña	2	0.03	2.0	475.2
9	Marín	Bosque	2	0.10	6.0	1440.0
10	Marín	Zacate 75%	2	0.11	6.7	1598.4
11	Marín	Zacate 50%	2	0.01	0.6	144.0
12	Marín	Pastizal	2	0.01	0.6	144.0
13	Marín	Caña	2	0.05	2.8	672.0
14	Sn Rafaelito	Bosque	2	0.11	6.3	1512.0
15	Sn Rafaelito	Zacate 75%	2	0.02	1.2	288.0
16	Sn Rafaelito	Pastizal	2	0.03	1.6	384.0
17	Sn Rafaelito	Caña	2	0.01	0.6	144.0
18	Sn Rafaelito	Bosque	1	0.20	12.2	2937.6
19	Sn Rafaelito	Caña	1	0.02	1.2	288.0

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro N° 17, se muestra como los valores de *fc* en general, son mayores en suelo cubierto de bosque y menores en suelos cubiertos por pastizal y caña. Las coberturas de suelo con zacate 50% y 75% presentan valores intermedios.

Según Alvarado *et al.* (2001), en dos Andisoles de la meseta central donde se realizaron pruebas de *fc*, los valores que se obtuvieron oscilaron entre 6 y 24 cm/hora. Al comparar los datos de Alvarado *et al.* (2001) con los datos obtenidos en esta investigación, se puede afirmar que solo 7 de las 19 pruebas están dentro de ese rango y 5 de la 7 pruebas se realizaron en suelo cubierto por bosque. Las restantes 12 pruebas presentan valores inferiores a 6, fenómeno que puede ser causado, ya sea por la compactación que la ganadería ejerce sobre del suelo o por la predominancia de altas pendientes en toda el área de estudio (ITCR 2004).

#### **4.1.6- Determinación de la profundidad de las raíces extractoras de agua**

La profundidad de las raíces estimada para cada tipo de cobertura del suelo, se muestra en el Cuadro N° 18.

**Cuadro N° 18: Profundidad de las raíces extractoras de agua según el tipo de cobertura vegetal del suelo.**

<b>Tipo de Cobertura Vegetal del Suelo</b>	<b>Profundidad de las raíces (m)</b>	<b>Profundidad de las raíces (mm)</b>
Bosques	3	3000
Zacate 75%	1.25	1250
Zacate 50%	1.5	1500
Pastizal	1	1000
Caña de Azúcar	1.20	1200

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.1.7- Determinación de la intercepción de lluvia en el follaje**

En el Cuadro N° 19 se muestra el porcentaje de retención de agua en el follaje, según el tipo de cobertura vegetal del suelo.

**Cuadro N° 19: Porcentaje de retención de lluvia en el follaje según el tipo de cobertura vegetal del suelo.**

<b>Tipo de Cobertura Vegetal del Suelo</b>	<b>Retención de lluvia (%)</b>	<b>Coefficiente de retención de lluvia en el follaje</b>
Bosques	20	0,20
Zacate 75%	12	0,12
Zacate 50%	12	0,12
Pastizal	12	0,12
Caña de Azúcar	12	0,12

Fuente: Schosinsky (2006) y Elaboración propia.

#### ***4.1.8-Determinación de la humedad inicial del suelo en un mes determinado***

En el tradicional comportamiento climático de Costa Rica, Octubre es el último mes de la época lluviosa, por lo tanto, la humedad del suelo al final de este mes, es igual a la capacidad de campo (CC), entonces, la humedad del suelo al iniciar el mes de Noviembre, es también igual a la CC (Schosinsky 2006).

Noviembre (mes 11) es el mes con que se inicia el ciclo de humedad a través de todo el año, por lo tanto, al cerrarse este ciclo, la humedad final en el mes de Octubre también debe ser igual a la CC.

## **4.2-Modelo biofísico conceptual y balance hídrico de suelos para las ARH**

#### 4.2.1- Identificación de las ARH

Se creó un mapa digital con las Áreas de Recarga Hídrica (ARH) que compartieron las variables de precipitación, tipo de suelo, pendiente y cobertura vegetal del suelo. En la Figura N° 8, se muestra el mapa digital con las 25 ARH identificadas.

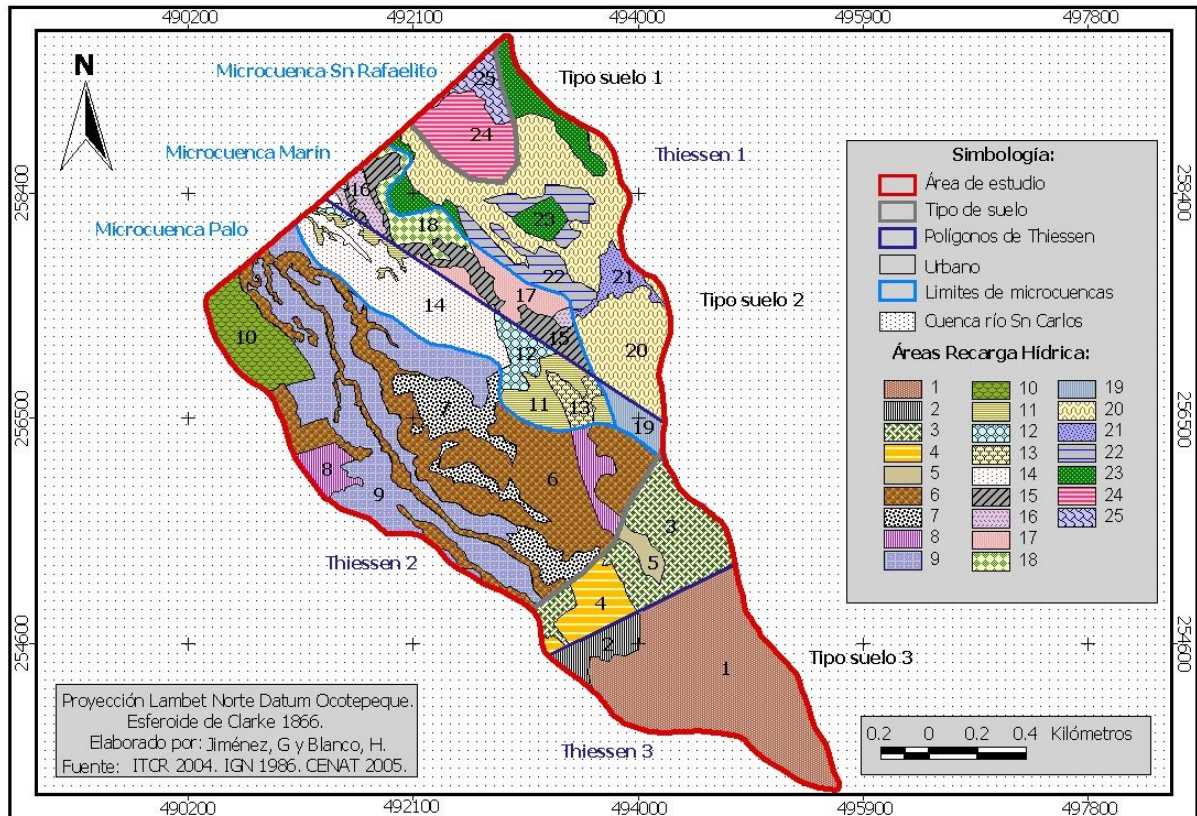


Figura N° 8: ARH que compartieron las variables de precipitación, tipo de suelo, pendiente y cobertura vegetal del suelo.

#### 4.2.2- Determinación de la Rp

En las 25 Áreas de Recarga Hídrica (ARH) identificadas, se aplicó la ecuación del balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky (2006) (ver anexo 1).

En el Cuadro N° 20 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el balance hídrico de suelos aplicado a cada ARH. La información que es objeto de interés en la presente investigación se refiere a la Recarga Hídrica Potencial del Acuífero (Rp).



**Cuadro N° 20: Rp en las 25 ARH**

ARH	Microcuenca	Tipo Cobertura	Tipo Suelo	Precipitación	Rp (mm/m <sup>2</sup> /año)
1	Palo	Bosque	3	3	1744.5
2	Palo	Zacate75%	3	3	1610.4
3	Palo	Bosque	3	2	1671.6
4	Palo	Zacate75%	3	2	1558.9
5	Palo	Zacate50%	3	2	1684.2
6	Palo	Bosque	2	2	1677.0
7	Palo	Zacate75%	2	2	2061.6
8	Palo	Zacate50%	2	2	2065.8
9	Palo	Pastizal	2	2	1092.4
10	Palo	Caña	2	2	2072.1
11	Marín	Bosque	2	2	1677.0
12	Marín	Zacate75%	2	2	2061.6
13	Marín	Zacate50%	2	2	1127.8
14	Marín	Pastizal	2	2	1457.7
15	Marín	Bosque	2	1	1570.4
16	Marín	Zacate75%	2	1	1931.0
17	Marín	Pastizal	2	1	1334.0
18	Marín	Caña	2	1	1937.5
19	San Rafaelito	Bosque	2	2	1677.0
20	San Rafaelito	Bosque	2	1	1570.4
21	San Rafaelito	Zacate75%	2	1	1931.0
22	San Rafaelito	Pastizal	2	1	1941.5
23	San Rafaelito	Caña	2	1	1064.9
24	San Rafaelito	Bosque	1	1	1575.5
25	San Rafaelito	Caña	1	1	1597.9
				<b>Total de Rp =</b>	<b>41693.4</b>

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en el Cuadro N° 20, existe poca relación entre los valores de  $R_p$  y los tipos de cobertura vegetal del suelo, pues valores similares de  $R_p$  pueden ocurrir en distintos tipos de cobertura. Este fenómeno dado en cada *ARH*, es posiblemente generado por 1) el grado de compactación que se presenta en las primeras capas del suelo, 2) la profundidad de las raíces extractoras de agua, 3) la evapotranspiración real ( $ETR$ ) y 4) la pendiente.

En el Cuadro N° 20 también se presentan valores de  $R_p$  que van desde los 1064 hasta los 2073 mm/año, es difícil afirmar que estos valores sean altos o bajos, pues estos datos no se pueden comparar con otros estudios existentes, ya que ésta es la primer investigación que se realiza en la zona y en otros sitios, ésta metodología se ha aplicado a una mayor escala, por lo que es difícil comparar y analizar con cercana realidad, los resultados obtenidos.

De manera general, en el Cuadro N° 21 se muestran los valores totales de Precipitación ( $P$ ), Precipitación que infiltra ( $P_i$ ), Retención de humedad en el follaje ( $Ret$ ), Escorrentía superficial ( $Esc$ ), Evapotranspiración real ( $ETR$ ) y Recarga potencial del acuífero ( $R_p$ ), obtenidos en las 25 *ARH*.

**Cuadro N° 21: Resumen del total de resultados obtenidos en el balance hídrico de suelos aplicado a cada *ARH***

$P$ (mm/m <sup>2</sup> )	$P_i$ (mm/m <sup>2</sup> )	$Ret$ (mm/m <sup>2</sup> )	$Esc$ (mm/m <sup>2</sup> )	$ETR$ (mm/m <sup>2</sup> )	$R_p$ (mm/m <sup>2</sup> )
105488.3	83960.7	15356.1	6171.4	42267.3	41693.4

Fuente: Elaboración propia.

Según el Cuadro N° 21, en total la precipitación que infiltra ( $P_i$ ) es casi 14 veces mayor que la escorrentía superficial ( $Esc$ ) y del agua que se precipita, un 40% llega a ser recarga potencial del acuífero ( $R_p$ ). Esta conclusión permite suponer que debido a las distintas características que presentan variables biofísicas como la precipitación, la pendiente, el tipo de suelo y el tipo de cobertura vegetal, se cuenta con valores de recarga hídrica importantes en el área de estudio.

Si bien es cierto que en el área tienen influencia las altas precipitaciones, también es cierto que estas hacen posible una mayor evapotranspiración real ( $ETR$ ), algo que se refleja

en el Cuadro N° 21, donde un 50% de la  $P_i$  no llega a ser parte de la recarga el acuífero y se evapotranspira.

#### **4.2.3- Determinación del volumen de $R_p$ para cada ARH**

El volumen de  $R_p$  según la extensión total que comprenden las 25 ARH, se muestra en el Cuadro N° 22.

**Cuadro N° 22: Volumen de Rp en las ARH**

ARH	Microcuenca	Cobertura	Rp (m/año)	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen Rp (m <sup>3</sup> /año)
1	Palo	Bosque	1.7	1937100.0	3379271.0
2	Palo	Zacate75%	1.6	197500.0	318054.0
3	Palo	Bosque	1.7	807600.0	1349984.2
4	Palo	Zacate75%	1.6	300000.0	467670.0
5	Palo	Zacate50%	1.7	87000.0	146525.4
6	Palo	Bosque	1.7	2252600.0	3777610.2
7	Palo	Zacate75%	2.1	648800.0	1337566.1
8	Palo	Zacate50%	2.1	312200.0	644942.8
9	Palo	Pastizal	1.1	2144100.0	2342214.8
10	Palo	Caña	2.1	459700.0	952544.4
11	Marín	Bosque	1.7	356500.0	597850.5
12	Marín	Zacate75%	2.1	189100.0	389848.6
13	Marín	Zacate50%	1.1	118900.0	134095.4
14	Marín	Pastizal	1.5	585500.0	853483.4
15	Marín	Bosque	1.6	386100.0	606331.4
16	Marín	Zacate75%	1.9	121400.0	234423.4
17	Marín	Pastizal	1.3	255200.0	340436.8
18	Marín	Caña	1.9	233700.0	452793.8
19	San Rafaelito	Bosque	1.7	150700.0	252723.9
20	San Rafaelito	Bosque	1.6	1721200.0	2702972.5
21	San Rafaelito	Zacate75%	1.9	146400.0	282698.4
22	San Rafaelito	Pastizal	1.9	430000.0	834845.0
23	San Rafaelito	Caña	1.1	490000.0	521801.0
24	San Rafaelito	Bosque	1.6	452800.0	713386.4
25	San Rafaelito	Caña	1.6	163000.0	260457.7
<b>Total =</b>				<b>14947100.0</b>	<b>23894530.9</b>

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro N° 22 muestra que en el territorio que comprende el área de estudio (14.9 km<sup>2</sup>), casi 24 millones de m<sup>3</sup> de agua llegan a ser parte del agua subterránea cada año. Aunque no es posible comparar estos datos con otros resultados obtenidos, ya sea con esta u otras metodologías, si es claro que en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, se presentan variables biofísicas con características que favorecen la recarga de un posible acuífero existente en la zona.

En el Cuadro N° 23, aparece un resumen del total del volumen de recarga dado en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito.

**Cuadro N° 23: Volumen de recarga hídrica dado en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito**

Microcuenca	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen Rp (m <sup>3</sup> /año)	Volumen de Rp (%)	Volumen Rp (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /año)
Palo	9 146 600.0	14 716 382.8	61.6	1.6
Marín	2 246 400.0	3 609 263.2	15.1	1.6
San Rafaelito	3 554 100.0	5 568 884.9	23.3	1.6
	<b>14947100.0</b>	<b>23894530.9</b>	<b>100.0</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Según el Cuadro N° 23, en la microcuenca Palo es donde se da casi un 62% del total del volumen de agua que recarga en toda el área de estudio anualmente, no obstante, en las tres microcuencas recargan en promedio 1.6 m<sup>3</sup> de agua por cada m<sup>2</sup> durante todo el año.

#### **4.2.4-Categorización de las ARH**

En el Cuadro N° 24 se muestra la categorización de las Áreas de Recarga Hídrica (ARH), según los resultados de Recarga Hídrica Potencial del Acuífero (Rp) obtenidos en el balance hídrico de suelos.

**Cuadro N° 24: Categorización de las ARH según los resultados de Rp**

ARH	Microcuenca	Tipo de Cobertura	Área (has)	Volumen Rp (m <sup>3</sup> /año)	Volumen Rp (m <sup>3</sup> /ha/año)	Categoría
7	Palo	Zacate75%	64.9	1337566.1	20616.0	Alta
8	Palo	Zacate50%	31.2	644942.8	20658.0	Alta
10	Palo	Caña	46.0	952544.4	20721.0	Alta
12	Marín	Zacate75%	18.9	389848.6	20616.0	Alta
16	Marín	Zacate75%	12.1	234423.4	19310.0	Alta
18	Marín	Caña	23.4	452793.8	19375.0	Alta
21	San Rafaelito	Zacate75%	14.6	282698.4	19310.0	Alta
22	San Rafaelito	Pastizal	43.0	834845.0	19415.0	Alta
1	Palo	Bosque	193.7	3379271.0	17445.0	Media
2	Palo	Zacate75%	19.8	318054.0	16104.0	Media
3	Palo	Bosque	80.8	1349984.2	16716.0	Media
4	Palo	Zacate75%	30.0	467670.0	15589.0	Media
5	Palo	Zacate50%	8.7	146525.4	16842.0	Media
6	Palo	Bosque	225.3	3777610.2	16770.0	Media
11	Marín	Bosque	35.7	597850.5	16770.0	Media
14	Marín	Pastizal	58.6	853483.4	14577.0	Media
15	Marín	Bosque	38.6	606331.4	15704.0	Media
19	San Rafaelito	Bosque	15.1	252723.9	16770.0	Media
20	San Rafaelito	Bosque	172.1	2702972.5	15704.0	Media
24	San Rafaelito	Bosque	45.3	713386.4	15755.0	Media
25	San Rafaelito	Caña	16.3	260457.7	15979.0	Media
9	Palo	Pastizal	214.4	2342214.8	10924.0	Baja
13	Marín	Zacate50%	11.9	134095.4	11278.0	Baja
17	Marín	Pastizal	25.5	340436.8	13340.0	Baja
23	San Rafaelito	Caña	49.0	521801.0	10649.0	Baja
<b>Total =</b>			<b>1494.7</b>	<b>23894530.9</b>	<b>416937.0</b>	

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro N° 24 se nota como ARH con distinta categoría se encuentran distribuidas en las tres microcuencas, además, predominan las ARH con recarga media y son menos las que presentan una baja recarga hídrica. También se nota que en las ARH cubiertas por bosque, aunque se espera que sean de alta recarga hídrica, todas se presentan con una recarga media, este hecho puede ser causado principalmente por los altos valores de evapotranspiración real (*ETR*) que se dan en el sitio, dejando menor cantidad de agua disponible para recargar los acuíferos. En el Cuadro N° 25 se muestra un resumen de la Recarga Hídrica Potencial (*Rp*) y las extensiones ocupadas por cada categoría.

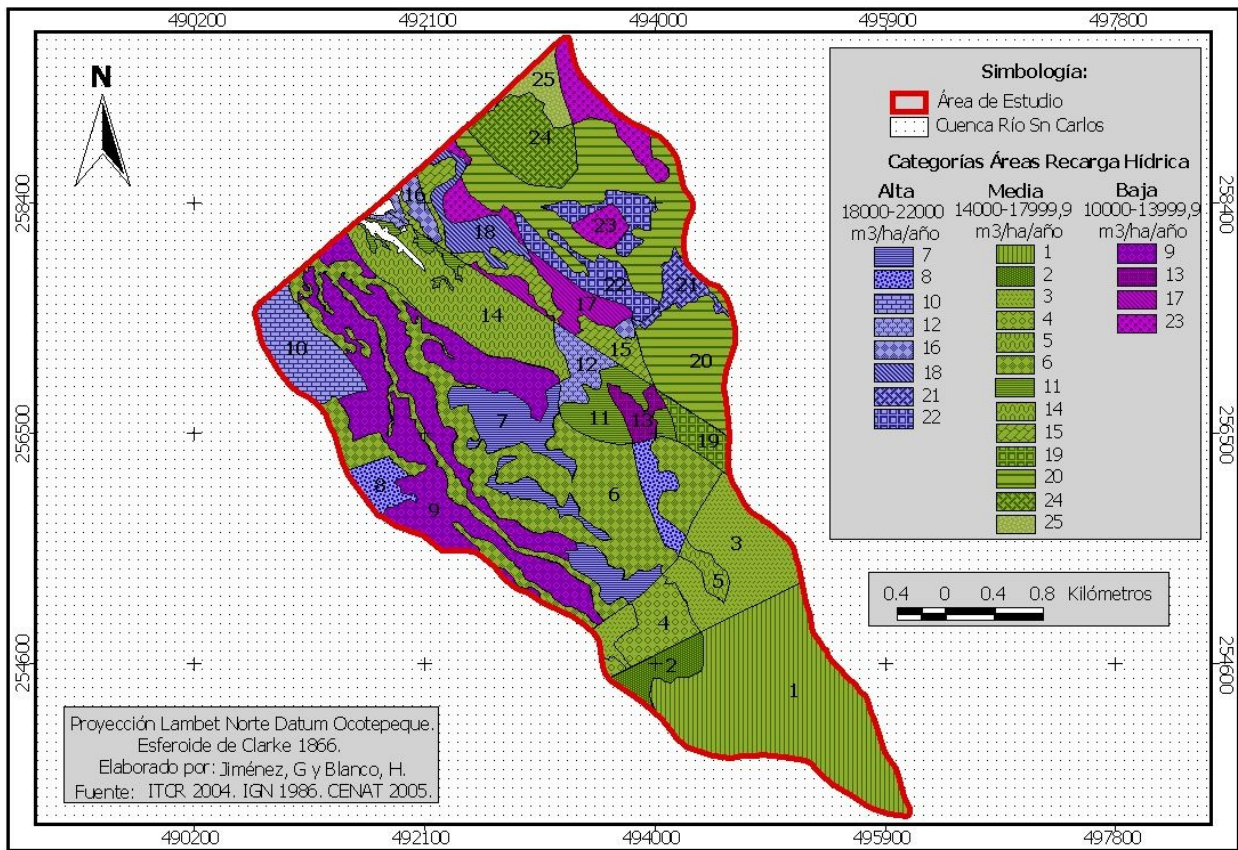
**Cuadro N° 25: Rp y extensión de las categorías a las que pertenece cada ARH**

Categoría	Recarga Hídrica Potencial (Rp)		Extensión	
	m <sup>3</sup> /año	%	Hectáreas	%
Alta	5129662.3	21.5	254.1	17.0
Media	15426320.5	64.6	939.8	62.9
Baja	3338548.1	14.0	300.8	20.1
<b>Total =</b>	<b>23894530.9</b>	<b>100.0</b>	<b>1494.7</b>	<b>100.0</b>

Fuente: Elaboración propia.

Según el Cuadro N° 25, casi un 63% del área de estudio se encuentra en ARH con recarga media, las cuales representan casi un 65% del total del volumen de recarga hídrica. Entonces, al conocer que todas las ARH cubiertas por bosque presentan recarga media, es posible suponer que es este tipo de cobertura vegetal el que actualmente está haciendo el principal aporte a la recarga de los acuíferos. Es claro también que aunque las ARH con recarga alta representan casi un 22% del total del volumen de recarga hídrica, estas solo aparecen en un 17% de área de estudio. Las ARH que presentan recarga baja, constituyen un 20% del área de estudio y representan un 14% del total del volumen de recarga hídrica.

La categorización y ubicación de cada ARH identificada, aparece en la Figura N° 9.



**Figura N° 9: Categorización de ARH.**



## **4.3-Acciones de manejo sugeridas para las ARH**

### ***4.3.1-Determinación de acciones para el manejo de las ARH***

Al identificar las ARH, así como su capacidad para permitir la recarga de aguas subterráneas, es indispensable que para éstas se definan acciones de manejo que protejan y conserven el recurso hídrico subterráneo a mediano y largo plazo. A manera de consenso con la ASADA de San Juan, la Asociación Pro Fomento Ambiental de San Juan (APROFOA), el Comité Pro Bandera Azul Ecológica de San Juan y la Asociación de Desarrollo Integral de San Juan, se realizó un resumen de lineamientos legales, técnicos y administrativos a implementar en dichas áreas. El resumen que aparece en el Cuadro N° 26 es una línea base de acción y por lo tanto, ésta puede ser replanteada. Tanto la selección de los acciones de manejo, como la manera de implementarlos, debe ser competencia de las ASADAS, hidroeléctrica El Embalse S.A, grupos organizados, productores locales, municipalidad, sector institucional y técnicos en la materia.

**Cuadro N° 26: Acciones de manejo sugeridas para las ARH**

Lineamiento	Acción de manejo sugerida
<p><b>Legal</b> <b>(L)</b></p>	<p>I-Crear conciencia en productores y población local para velar porque se respete la legislación ambiental vigente. Las leyes de agua, agua potable, forestal, conservación de la vida silvestre, uso y conservación de suelos, ordenamiento territorial y otras relacionadas con la protección y conservación del recurso hídrico, deben considerarse antes de desarrollar cualquier tipo de actividad en la zona. La promoción del dialogo y consenso con los infractores de estas leyes debe privar, antes de iniciar con los respectivos tramites de denuncias por delitos ambientales.</p> <p>II-El Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET) en conjunto con ASADAS y población local deben velar por proteger la cobertura en su mayoría boscosa, en las 540 has (un 36% del área de estudio) bajo propiedad privada que se encuentran dentro del Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco (PNAJCB). Prioritariamente estas 540 has deben ser objeto de indemnización o convenio de manejo entre propietarios y entes interesados en proteger y conservar el recurso hídrico.</p> <p>III-En su mayoría, los manantiales se encuentran en zonas sin bosque o con poca cobertura boscosa, ello aunado a la alta capacidad de infiltración del suelo, hace ver la necesidad de determinar las áreas de protección de estos manantiales con el fin de contrarrestar las amenazas por su contaminación. Por lo tanto, se debe respetar la protección de 200m a la redonda de manantiales utilizados para consumo humano (según la Ley de Aguas N° 276) y 100m a la redonda de los manantiales no utilizados para consumo humano (según la Ley Forestal N° 7575).</p> <p>IV-Reforestación con especies nativas en 15m de los márgenes de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, según lo dispuesto por el reglamento de la Ley Forestal N° 7575.</p>
<p><b>Lineamiento</b></p>	<p><b>Acción de manejo sugerida</b></p>

**Legal**  
**(L)** V- Sobreponer el mapa de *ARH* con el mapa de tenencia de tierras, con el fin de definir estrategias de manejo o adquisición de las *ARH*, ya sea compra, indemnización, donación, protección por parte del estado, entre otras.

VI-Los planes reguladores y de ordenamiento territorial que a nivel de la Municipalidad de San Carlos, MINAET u otras organizaciones quieran implementarse en la zona, pueden considerar los resultados de la presente investigación, Para ello es importante que organizaciones, productores e interesados en el manejo y conservación del recurso hídrico, mantengan una relación cercana con estas instituciones u organizaciones y ser parte integral de la toma de dediciones.

VII-Declarar vía decreto ejecutivo “Zona de Protección” a aquellas *ARH* que así lo ameriten.

**Técnico**  
**(T)** I-Desarrollar e implementar un Plan de Manejo Integral (PMI) de las tres microcuencas, que prevenga el bienestar socioeconómico de la población y ordene el crecimiento productivo de la zona. Los resultados de recarga media y baja obtenidos en la mayor parte del área de estudio, incitan a la pronta recuperación, protección y conservación de las *ARH*, lo cual ha de ser el punto de partida de este PMI.

II-Crear un Programa de Producción Sostenible para ser implementado en las tres microcuencas, este programa puede ser integrado por universidades, instituciones públicas competentes, organizaciones comunales y productores locales. Se deben contemplar actividades de educación ambiental, agroforestería, técnicas agrosilvopastoriles y turísticas que vengán a contribuir con el ingreso económico de los productores y con la protección del recurso hídrico subterráneo. La implementación de este programa da la oportunidad de obtener incentivos como financiamiento de actividades productivas, pago por servicios ambientales (*PSA*), finca ecológica, certificaciones de producción orgánica y Certificados de Sostenibilidad Turística (*CST*). El desarrollo de este programa debe contemplar y respetar aspectos sociales, culturales y económicos, propios de la población local.

**Lineamiento**

**Acción de manejo sugerida**

**Técnico**  
**(T)** III-Con base en los resultados de recarga potencial del acuífero (*Rp*), se pueden establecer clases de uso del territorio que considere la presencia de corredores biológicos, protección de manantiales, protección de ríos, áreas productivas de

alta, media y baja intensidad y áreas recreativas o de desarrollo turístico. Lo anterior es parte de una proposición de ordenamiento territorial en las tres microcuencas que concilie con la producción hídrica. Esa zonificación dará un mejor panorama en relación a la dirección, ritmo y capacidad de crecimiento en la zona, algo importante al conocer que en el área de estudio existe relativamente poca urbanización y se esta a tiempo de planificar, promover y alcanzar un desarrollo congruente con la protección del recurso hídrico.

**IV-**En las áreas de producción agropecuaria se deben promover prácticas de conservación de suelos y agua, reduciendo así, las tasas de erosión, escorrentía superficial, contaminación, evapotranspiración, sellamiento de poros y compactación, comunes en las técnicas de producción convencional. Algunas prácticas que pueden contribuir con la infiltración del agua superficial en los agroecosistemas presentes en el área de estudio, son las siguientes:

IV.a) Debido a las pendientes que predominan, sembrar en curvas de nivel.

IV.b) Subsolación y aradura profunda contra pendiente.

IV.c) Construcción de zanjas o desagües de infiltración.

IV.d) Siembra y manejo de árboles o plantaciones forestales con especies nativas.

IV.e) Evitar la siembra de cultivos anuales, poco densos y de porte bajo, con el fin de evitar la transpiración, poco aporte de materia orgánica y baja protección de la compactación causada por la lluvia.

IV.f) Siembra de cultivos perennes que no requieran acondicionamiento periódico del suelo.

IV.g) Siembra de barreras y cercas vivas.

## **Lineamiento**

## **Acción de manejo sugerida**

### **Técnico**

Continua....

(T)

IV.h) Siembra de especies arbóreas con buen desarrollo radicular para facilitar el movimiento de agua en el subsuelo.

- IV.i) Establecimiento de sistemas agroforestal de pastos y cultivos, dado bajo periodos de rotación.
- IV.j) Asociación de cultivos con bajos requerimientos de humedad.
- IV.k) Control biológico de plagas y evitar el uso de pesticidas.
- IV.m) Producción de biogás (biodigestores) a partir de excretas de bovinos.
- IV.n) Manejo de carga animal inferior a 1.3 animales/ha.
- IV.l) Uso de abonos orgánicos con el fin de aumentar el contenido de materia orgánica en los suelos.
- IV.o) Uso de biofertilizantes elaborados a partir de excretas animales y rastrojos de cultivo.
- IV.p) Uso de lombricompost elaborada a partir de excretas de bovinos.
- IV.q) Producción de carne con animales estabulados o semi estabulados.
- IV.s) Descanso de tierras (barbecho) en zonas que han sido de uso intensivo.
- IV.t) Evitar expansión de la frontera agropecuaria y promover la permanencia de árboles en un 30% de las propiedades.
- IV.v) Permitir la regeneración natural en chárrales, tacotales y bosque secundario.

**V-**Promover la explotación turística sostenible mediante un plan de desarrollo turístico, donde el paisaje natural, la vida silvestre, actividades productivas y tradicionales y el trato amable de la población local, hacen posible atraer un segmento de turismo rural, ecológico, cultural y de observación de aves. Implementar actividades turísticas de baja carga e impacto en garantía del bienestar de las familias locales, contribuye con la protección y rehabilitación de aquellas ARH que a futuro, por su uso inadecuado, pueden reducir el volumen de recarga de las aguas subterráneas.

**Lineamiento**

**Acción de manejo sugerida**

**Técnico  
(T)**

**VI-**Ya conociendo que la capacidad de infiltración del suelo en el área de estudio es favorable, es importante hacer un inventario de los productos, enmiendas, agroquímicos y otras sustancias contaminantes que se estén utilizando. Esa facilidad de infiltración promovida por un suelo en su mayoría franco-arenoso, formado a base de cenizas volcánicas, deja abierta la posibilidad de que tanto sustancias químicas como excretas de animales alcancen contaminar el agua

subterránea. Un Plan de Monitoreo del agua utilizada para consumo humano, mediante la realización de análisis químicos y microbiológicos periódicos, puede ser testigo de esta probabilidad latente.

**VII-**Inventariar y clasificar las prácticas de producción utilizadas en el área de estudio, ya sean estas favorables o no favorables a la infiltración. Ello permitirá identificar y promover cambios en la producción que facilite la recarga de aguas subterráneas.

**VIII-**Aunque actualmente se cuenta con agua subterránea suficiente para satisfacer la demanda, a futuro esta situación dependerá del manejo que se le de a las *ARH*. Una manera de prever posibles reducciones en el nivel de agua subterránea es promover la inyección artificial de agua. Algunos de los métodos que podrían implementarse en el área de estudio son (Linsley *et al.* 1977):

VIII.a) Desviación del caudal de los ríos hacia áreas altamente permeables.

VIII.b) Excavación de fosas de precolación hasta penetrar áreas permeables.

VIII.c) Construcción de pozos adyacentes a un río para inducir precolación a partir del mismo.

VIII.d) Construcción de trampas que permitan el almacenamiento de agua en áreas de alta permeabilidad.

VIII.e) Construcción de acequias, diques o lagunas.

**Lineamiento  
Técnico**

**(T)**

**Acción de manejo sugerida**

**IX-**Realizar un estudio hidrogeológico que demuestre si existe o no acuífero en la zona. Ya conociendo las *ARH*, con este tipo de estudio de naturaleza subterránea se puede determinar la dirección del flujo y el almacenamiento del agua subterránea una vez que ésta percola. El conocer esta información permitirá ejercer un ordenamiento territorial congruente con los fines de protección y conservación del agua subterránea en la zona.

**Administrativo**

**(A)**

**I-**Es fundamental el acercamiento amistoso y consiente que puedan tener y mantener las ASADAS y otras organizaciones o empresas con los productores de la zona. Conversatorios, charlas u exposiciones relacionadas con el

tema hídrico, pueden llevar a un pensamiento común para ejercer acciones en vías de proteger las *ARH* y conservar el recurso hídrico subterráneo actualmente disponible. Algunas de esas acciones o alternativas consisten en realizar cambios en las técnicas de producción tradicional o inclusive definir y negociar pagos, compensaciones y hasta compra de terrenos, prioritariamente sobre aquellas áreas donde el volumen de recarga es importante.

**II-**Tanto las ASADAS, hidroeléctrica el Embalse y otros actores locales, requieren del acompañamiento técnico y de los recursos económicos necesarios para implementar acciones con el fin de dar manejo adecuado a las *ARH* identificadas.

**III-**Mantener actividades de capacitación y educación en relación con la proveniencia, importancia social y protección y conservación participativa que amerita el recurso hídrico subterráneo.

**IV-**Las personas, instituciones y organizaciones implicadas en la protección y conservación del recurso hídrico, pueden ser parte de un plan de monitoreo y seguimiento que cuente con indicadores prácticos para medir el impacto que tienen las acciones de manejo implementadas.

**Lineamiento**

**Acción de manejo sugerida**

**Administrativo**  
**(A)**

**V-**Los costos de protección y manejo de las *ARH*, en buena parte pueden recaer sobre las personas directamente favorecidas con el recurso hídrico subterráneo en la zona. Las ASADAS locales, la empresa hidroeléctrica El Embalse, los productores y la misma población local, son los responsables de destinar un porcentaje de su presupuesto para la protección y mejoramiento de las *ARH*. Esa asignación y necesidad económica puede determinarse más acertadamente con la realización de un estudio de valoración económica del recurso hídrico.

**VI-**Aprovechar la ubicación estratégica de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, pues son afluentes de la gran

---

cuenca del río San Carlos, para la cual COOPELESCA financia e implementa un plan de rehabilitación y restauración. Además, en el año 2006 se ha designado al Área de Conservación Arenal Huetar Norte (ACAHN) como Reserva de la Biosfera “Agua y Paz”, haciendo posible mediante la cooperación técnica, la coordinación y ejecución de acciones en el ámbito de la conservación del recurso hídrico. No hay que dejar de lado los esfuerzos que se lleven a cabo de manera integral a nivel local entre productores, ASADAS, Empresas Hidroeléctricas, Asociaciones de Desarrollo, Asociaciones Ambientalistas, MINAET, AyA y Municipalidad de San Carlos.

---

Fuente: Elaboración propia.



### 4.3.2-Determinación del conflicto de uso del suelo en las ARH.

La figura N° 10 muestra el uso del suelo en las distintas ARH, ya sean estas de baja, media o alta  $R_p$ .

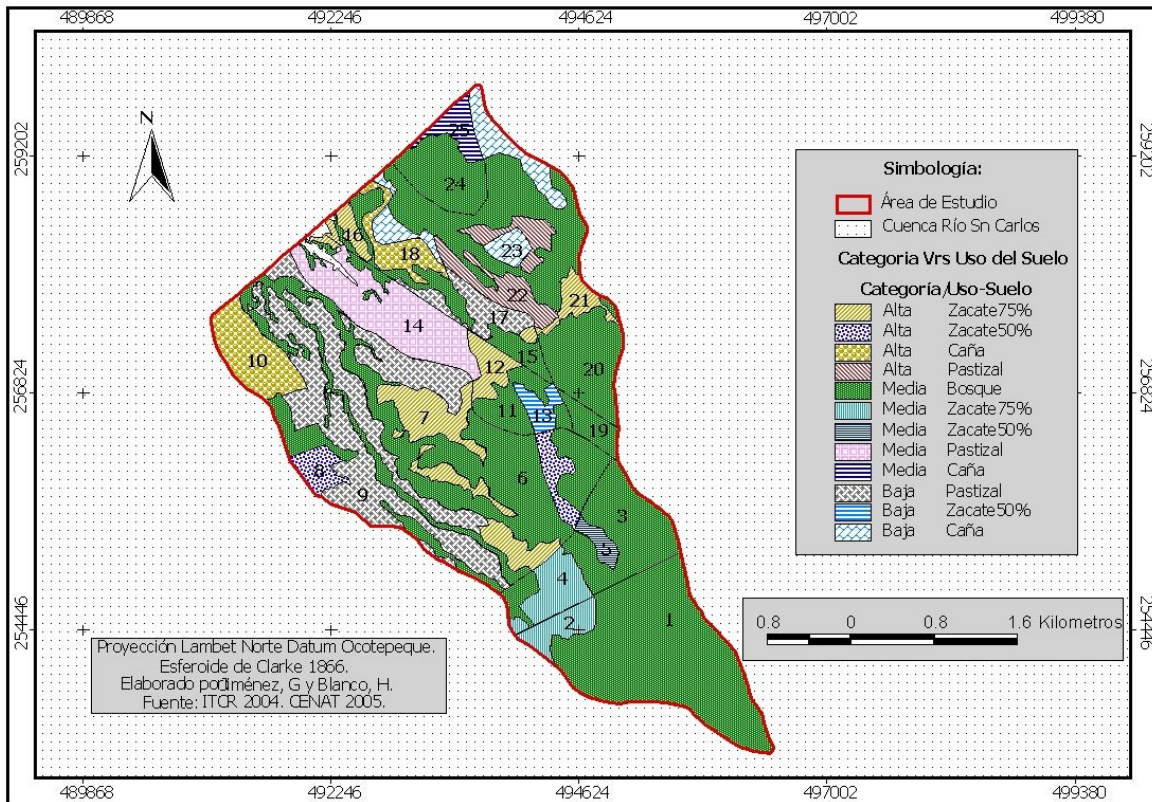


Figura N° 10: Conflicto por uso del suelo en las ARH.

Según el uso del suelo que se presenta en las categorías de baja, media y alta  $R_p$ , así se seleccionan del Cuadro N° 26, acciones de manejo congruentes con la conservación y protección de las aguas subterráneas. Lo anterior se muestra en el Cuadro N° 27.

**Cuadro N° 27: Uso del suelo en cada categoría de Rp y acciones de manejo sugeridas.**

Categoría	Uso del Suelo	Acciones de manejo sugeridas		
		*L	*T	*A
Alta	Zacate 75%	I, II, III, IV, V, VI, VII	I, II, IVcdgknoqt, V, VI, VIIIacd, IX	I, II, III, IV, V, VI
Alta	Zacate 50%	I, II, III, IV, V, VI, VII	I, II, VIcdgknoqstv, V, VI, VIIIacd, IX	I, II, III, IV, V, VI
Alta	Caña	I, II, III, IV, V, VI, VII	I, II, III, IVabcefgijklot, V, VI, VII, VIIIad, IX	I, II, III, IV, V, VI
Alta	Pastizal	I, II, III, IV, V, VI, VII	I, II, III, IVcefgijkmnopqstv, V, VI, VII, VIIIabcd, IX	I, II, III, IV, V, VI
Media	Bosque	I, II, III, IV, V, VI, VII	I, II, V, VIIIacd, IX	I, II, III, IV, V, VI
Media	Zacate 75%	I, II, III, IV, V, VI, VII	I, II, IVcdgknoqt, V, VI, VIIIacd, IX	I, II, III, IV, V, VI
Media	Zacate 50%	I, II, III, IV, V, VI, VII	I, II, IVcdgknoqstv, V, VI, VIIIacd, IX	I, II, III, IV, V, VI
Media	Pastizal	I, II, III, IV, V, VI, VII	I, II, III, IVcefgijkmnopqstv, V, VI, VII, VIIIabcd, IX	I, II, III, IV, V, VI
Media	Caña	I, II, III, IV, V, VI, VII	I, II, III, IVabcefgijklot, V, VI, VII, VIIIacd, IX	I, II, III, IV, V, VI
Baja	Pastizal	I, II, III, IV, VI	I, II, III, IVcefgghijkmnopqstv, V, VI, VII, VIIIbce, IX	I, II, III, IV, V, VI
Baja	Zacate 50%	I, II, III, IV, VI	I, II, IVcdghknoqstv, V, VI, VIIIce, IX	I, II, III, IV, V, VI
Baja	Caña	I, II, III, IV, VI	I, II, III, IVabcefgghijklot, V, VI, VII, VIIIce, IX	I, II, III, IV, V, VI

\* L = Legal T = Técnico A = Administrativo

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro N° 27 aparecen las acciones de manejo que se sugieren para cada una de las *ARH*. De lo anterior puede deducirse que debe existir un gran compromiso de parte de los productores locales con el fin de llevar a la práctica los lineamientos de índole técnico. Igualmente, todos los entes u organizaciones interesadas en proteger y conservar el recurso hídrico subterráneo en la zona, deben unirse y velar por el cumplimiento de los lineamientos legales y administrativos. Aunque las áreas de uso urbano comprenden solo un 0.5% del área de estudio, es importante que en estas se implementen también acciones como: separación de desechos sólidos y disposición final adecuada, elaboración y utilización de abono a partir de desechos orgánicos domésticos, tratamiento adecuado de aguas negras y residuales y ahorro del recurso hídrico.

## 5-DISCUSIÓN

El área de estudio recibe en promedio 4185 mm anuales de precipitación, algo que puede ser importante en términos de recarga, pues si no hay precipitaciones, la recarga es nula, a no ser que esta se dé debido a la infiltración de las aguas superficiales presentes en los ríos, lagos y lagunas, o a partir del agua proveniente de otro sistema acuífero. No obstante, los resultados demuestran que la temperatura promedio anual de 20.2 °C y el tipo de cobertura vegetal, inducen la evapotranspiración potencial (*ETP*), provocando que no toda el agua que se precipita se retenga en el suelo o percole para ser parte de la recarga de agua subterránea.

Únicamente en los meses de marzo y abril, la *ETP* es mayor a la precipitación y por lo tanto, la recarga potencial del acuífero (*Rp*), se ve reducida y es posible que esta se dé solo a partir del agua retenida en el suelo durante los meses anteriores. Este suceso es congruente con lo mencionado por Ochoa (2007), quien menciona que es en estos meses cuando el caudal de los manantiales que abastecen de agua potable a la comunidad de San Juan, merman considerablemente. En general, es de suma importancia la planificación y manejo que se le dé a las 25 Áreas de Recarga Hídrica (*ARH*) identificadas, con el fin de mantener y aumentar el caudal de los 10 manantiales que abastecen de agua potable a una población aproximada de 6500 personas, habitantes de las comunidades de San Juan, San Luís, Linda Vista, el Quiosco y Monte Oreb.

Las pendientes y precipitaciones altas que predominan sobre el área de estudio, así como un suelo de origen volcánico que favorece la infiltración del agua en el suelo, llevan a suponer que el agua que tiene contacto en las *ARH*, puede tanto infiltrarse y ser retenida, percolar para recargar un posible acuífero profundo o correr subsuperficialmente para desembocar en manantiales estacionales o cauces de ríos. En general, la velocidad del agua subsuperficial es muy baja y con un periodo largo de verano esta agua es la que en a primera instancia se ve afectada por la evapotranspiración. Es muy posible que los riachuelos y manantiales temporales o periódicos que se presentan dentro del área de estudio, sean parte de la descarga del agua subsuperficial en la zona (Faustino 2008). El hecho de contar con caudales en cauces y manantiales en época de varano, aun cuando no existen precipitaciones, es evidencia de que el área de estudio se encuentra sobre una importante captación de agua subterránea o acuífero.

Según investigaciones realizadas por Alvarado *et al.* (2001), la retención de humedad depende de la textura, la minerología y la estructura del suelo. Este autor menciona que los suelos volcánicos viejos pueden estar conformados hasta por un 70% de porosidad total, del cual un 38% corresponde a macroporos con un tamaño mayor a 30  $\mu\text{m}$  (micrómetros) y un 62% se refiere a microporos con diámetros menores a 30  $\mu\text{m}$ . Por ser un suelo relativamente joven, es posible que el área de estudio no presente una porosidad total tan alta, pero se debe rescatar la posible presencia de un buen porcentaje de microporos, los cuales debido a las fuerzas capilares, provocan una mayor succión o atracción de agua y por lo tanto, generan una mayor posibilidad de retener humedad (Davies 2002). Para Bras (1990) la columna de agua en suelos con un mayor porcentaje de arcillas puede llegar a contener 10 veces más agua retenida que un suelo arenoso y Maidment (1993) menciona que es mayor la capacidad de retención en suelos con un contenido de arcilla mayor a 10%, algo que caracteriza a los tipos de suelo presentes en el área de estudio. No obstante, no es despreciable la presencia de limo y arena, con valores entre 30% y 50% respectivamente, los cuales favorecen la percolación y recarga directa de un posible acuífero profundo en la zona (Ward y Trimble 2004). También se debe tener presente lo mencionado por Duke (1974), quien afirma que, tanto en suelos arenosos como arcillosos, es posible que se dé un equilibrio de la tensión o presión ejercida sobre el agua, facilitando la retención de humedad. Por lo anterior, es posible mencionar que tanto la capacidad de retención como la de percolación, son las responsables de mantener los flujos de agua subterránea durante todo el año, siendo en términos de  $R_p$ , la percolación el fenómeno más importante ocurrido durante las precipitaciones y la retención de humedad dada cuando las precipitaciones no se presentan o son escasas.

Según la descripción geológica que realizan Arenas *et al.* (1997), dentro del área de estudio se encuentra un suelo relativamente joven, de origen ígneo o volcánico afectado por procesos erosivos, tectónicos y el vulcanismo dado en el Volcán Platanar en el periodo Cuaternario. En un suelo no consolidado de orden Andisol (Wiley 1959), el alto contenido de arenas debido a su origen ígneo (Alvarado *et al.* 2001), permite mayor espacio poroso que a su vez favorece la percolación de agua hacia capas más profundas del suelo, contribuyendo así con la recarga de aguas subterráneas. Este fenómeno ocurre en los tres tipos de suelo y es el que a pesar de las pendientes superiores a 7% que se presentan, pareciera contribuir con el hecho de que más de 23 millones de  $\text{m}^3$  de agua recarguen anualmente en las 25 ARH identificadas.

Los tres tipos de suelo identificados presentan capacidad para retener humedad debido a que cuentan con altos valores de capacidad de campo (CC) y bajos valores de densidad aparente ( $\rho_a$ ), dicho en otras palabras, los pequeños espacios porosos del suelo,

hacen posible que un mayor volumen de agua se retenga en el suelo, favoreciendo así la recarga de aguas subterráneas. Ahora bien, específicamente el tipo de suelo 3 presenta una mayor capacidad de retención de humedad, en comparación con los tipos de suelo 1 y 2, que presentan una capacidad menor, pero siempre importante en términos de recarga hídrica. Por su efecto “sombra-esponja”, el bosque tiene mayor capacidad de regular la humedad y la temperatura del suelo, al provocar que éstas se den en proporciones más bajas que las que imperan en la atmósfera (Reynolds y Thompson 1988). Así también, el bosque retarda la infiltración y almacena a largo plazo una mayor cantidad de humedad, por lo tanto, este tipo de cobertura, contribuye con la descarga de agua subterránea, aun en periodos donde no se dan precipitaciones. El tipo de suelo con mayor capacidad para retener humedad (suelo 3) en su mayoría se encuentra cubierto de bosque y es parte del Área Silvestre Protegida llamada Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco (*PNAJCB*). Los tipos de suelo 1 y 2, también favorecen, aunque en menor medida, la infiltración y retención de humedad, el problema que se presenta en estas áreas, es que las altas pendientes y la compactación dada en la superficie del suelo cubierto por cultivos de caña, zacate y pastizal, provoca que los valores de infiltración básica ( $f_c$ ) sean menores, afectándose así, la capacidad de retención de humedad y percolación que presentan estos suelos (Jones 1997).

Con las pruebas de  $f_c$  se obtiene una aproximación teórica de la capacidad de infiltración del suelo o su permeabilidad. El hecho de que los valores de  $f_c$  sean mayores en suelos cubiertos por bosque, intermedios en el suelo cubierto con zacate 50% y 75% y menores en suelos cubiertos por pastizal y caña, reflejan la importancia de conservar el recurso boscoso de una manera intercalada en aquellas *ARH* donde éste no existe. La compactación, desintegración y erosión de las partículas del suelo, aunado a las altas pendientes que predominan en áreas cubiertas por zacate, pastizal y caña, ponen en riesgo lo mencionado por Ward y Trimble (2004), quienes afirman que la textura fraco-arcillosa, el alto contenido de materia orgánica y la baja densidad aparente, induce a una alta capacidad de infiltración, haciendo a estos suelos de origen volcánico altamente permeables. Para Reynolds y Thompson (1988), la capa de humus que se forma en la base del suelo de un bosque, protege a éste de la compactación causada por la lluvia, regula la humedad y el flujo pausado del agua, además, aporta materia orgánica al suelo y funciona como filtro al no permitir el paso de pequeñas partículas que pueden rellenar el espacio poroso. Estas atribuciones contribuyen a la justificación del porque en el bosque se da una mayor capacidad de infiltración.

Los resultados de precipitación que infiltra ( $P_i$ ) y de  $R_p$ , muestran cómo influye la evapotranspiración real (*ETR*) en la estimación del volumen de agua que potencialmente

puede llegar a ser parte del agua subterránea. La disponibilidad de agua para  $R_p$  esta determinada en buena parte por el tamaño de la zona de raíces y el régimen climático. En los periodos largos sin lluvia, la cobertura forestal de raíces profundas transpira libremente la mayor parte del tiempo aun cuando se haya terminado la disponibilidad de agua para plantas con raíces poco profundas. Esa condición se demuestra cuando los valores de  $ETR$  son mayores en bosques, zacate 50% y zacate 75%. En áreas donde las plantas con raíces poco profundas como el pastizal y la caña reciben una adecuada cantidad de agua la mayor parte del tiempo, la evapotranspiración es afectada en menor grado por la profundidad de la zona de raíces (Linsley *et al.* 1977). Según Sánchez (2005 a), el proceso de la fotosíntesis es otro factor que influye en la evapotranspiración, a mayor intensidad de la luz solar, mayor intensidad de la fotosíntesis, con la cual se produce mayor cantidad de savia elaborada, quedando mayor cantidad de agua sobrante que induce una mayor transpiración. Además, la savia o glucosa se requiere en mayores cantidades en tipos de cobertura con mayor masa vegetal, este es el caso del bosque, zacate 50% y zacate 75%. Todas las variables anteriores justifican el porqué en el área de estudio, un 50% de la  $P_i$ , sea  $ETR$ .

Aunque la  $f_c$  sea mayor en bosque y menor en caña, zacates y pastizal, los resultados de  $R_p$  en todas las  $ARH$  tienden a ser moderadamente uniformes, con valores entre 1064 y 2073 mm/año. Esto muy posiblemente ocurre debido a que la  $ETR$  también es mayor en bosque y menor en caña, zacates y pastizal, ejerciendo cierto balance en la  $R_p$  (Ward y Trimble 2004). Ahora bien, los valores de  $R_p$  se han obtenido en un momento y espacio dado y en realidad, es el cambio en las propiedades físicas del suelo, la erosión, la compactación del suelo y una mayor escorrentía, las que pueden provocar a futuro una disminución de la  $R_p$ , especialmente en aquellos suelos con una cobertura distinta a la boscosa. Según Wiley (1959), dada su importancia en la infiltración, la cobertura del suelo es más importante que el tipo de suelo existente, pues se han hecho estudios donde en un mismo suelo, distintos tipos de cobertura vegetal presentan diversas tasas de infiltración. Es por ello que, tanto el tipo de cobertura vegetal, como el manejo que se le de, es un aspecto primordial en términos de favorecer la  $R_p$  a largo plazo.

Tanto el pastizal, el zacate y la caña son plantas perennes, pero su aprovechamiento se da mensual o anualmente, este hecho genera una mayor remoción y compactación del suelo, causada por la maquinaria y el ganado. Este efecto a través de los años puede provocar una disminución de la capacidad del suelo para infiltrar y retener agua, generando un aumento en los índices de escorrentía promovida por las altas pendientes que ocurren en toda el área de estudio. Aunque los resultados de  $R_p$  en las  $ARH$  que comparten estos tipos

de cobertura actualmente son favorables, pueden no ser así cuando las lluvias merman y mucho menos cuando a través de los años se le siga dando un uso inadecuado a las mismas. Se conoce por ejemplo que la conversión de bosque tropical a pastizal, provoca un decrecimiento en el régimen de precipitación en alrededor de 200mm/año, algo poco alentador si se sabe que en su mayoría, la recarga de aguas subterráneas proviene directamente de las precipitaciones (Reynolds y Thompson 1988).

Aunque en el bosque se da una mayor *ETR* durante todo el año y especialmente en época de verano (Ward y Trimble 2004), la capacidad de regulación y almacenamiento de humedad y la alta capacidad de infiltración que presentan los suelos cubiertos por bosque, provoca la percolación de casi un 65% del total del volumen de recarga hídrica. Paralelo a este aporte importante del bosque, Jones (1997) afirma que cuando un área forestal es reemplazada por pastizales o cultivos, es muy probable que en ese lugar se presente un aumento en la escorrentía superficial y una reducción considerable en las tasas de intercepción, evapotranspiración y capacidad de infiltración. Es importante considerar lo mencionado por Reynolds y Thompson (1988), quienes mencionan que un cambio de cobertura del suelo a bosque, implica un incremento en la descarga de aguas subterráneas de al menos 450mm/año, igualmente, existen evidencias de que la cobertura forestal densa, implica un aumento de 5% en el régimen de precipitación anual.

En las *ARH* con categoría de recarga baja (un 20% del área de estudio) deben darse a corto plazo, cambios en las técnicas de producción que permitan una mayor capacidad de retención y percolación que contribuya con la recarga de aguas subterráneas. En el restante 80% del territorio (del cual 54% está cubierto por bosque) representado por *ARH* con categoría de recarga media y alta, las acciones de manejo deben avocarse a la protección y conservación, ello con el objetivo de mantener y aumentar los valores de recarga hídrica a un mediano y largo plazo. Para cada una de las *ARH* con baja, media o alta *R<sub>p</sub>*, se sugieren acciones de manejo con el fin de alcanzar este fin.

Aunque por extensión, en la microcuenca Palo es donde se da el mayor porcentaje de *R<sub>p</sub>* anual (62%), tanto en ésta como en las microcuencas Marín y San Rafaelito, recargan en promedio 1.6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> durante todo el año. Este valor, aunque importante, se presenta de manera poco uniforme, dándose mayor *R<sub>p</sub>* en los meses que imperan las precipitaciones. Ante tal situación, la implementación de acciones de manejo en las *ARH*, busca aumentar este valor y lograr que éste ocurra de manera más uniforme a través de todo el año.

Según Matus (2007), la implementación de acciones de manejo con el fin de aumentar el volumen de descarga subterránea, es posible a corto plazo. Este autor es



testigo de resultados obtenidos en fincas agrícolas donde acciones como la construcción de zanjas de infiltración, la siembra de barreras vivas, la rotación del cultivo y la siembra en curvas a nivel, en un periodo de cinco años, permitió aumentar el caudal de un manantial 5 veces en época de estiaje y 20 veces en época de invierno. Igualmente, Jones (1997), menciona que el solo hecho de reforestar un 10% de en una hectárea de pastizal, implica reducir la escorrentía en un 2%. Sin duda estos resultados pueden brindar gran beneficio y podrían mitigar las constantes reducciones de caudal tanto en ríos como en manantiales de la zona. Esta información es un aliento para el trabajo y los resultados que puedan esperar las ASADAS locales, organizaciones ambientalistas y la hidroeléctrica El Embalse S.A.

Comparando los resultados de esta investigación, con los obtenidos por el Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (*IPS*) en un balance hídrico realizado en el flanco noroeste del *PNAJCB*, resulta que los valores de  $R_p$  obtenidos, son muy congruentes con los resultados obtenidos por Barrantes (2004), los cuales se presentan entre los 1400 y 2500 mm/año. Igualmente, en la presente investigación, la precipitación que infiltra es casi 14 veces mayor que la escorrentía y del agua precipitada, un 40% llega a ser parte de la recarga potencial de los acuíferos, algo muy similar ocurrido en el balance hídrico de Barrantes (2004), donde este valor es de 36%. Los más de 23 millones de  $m^3$  de agua que llegan a ser parte del agua subterránea cada año, son reflejo de los beneficios que se obtienen al presentarse en el área de estudio un grado de urbanización relativamente bajo (Aparicio 1989) y una influencia climática típica del bosque pluvial premontano (Salguero 2000). Es por eso que en general, tomando en cuenta la cantidad de variables geológicas y meteorológicas que se consideraron (Maidment 1993), la metodología aplicada y los resultados obtenidos en esta investigación, son bastante congruentes y apegados a cierta realidad.

La hipótesis de esta investigación es la siguiente: “En la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito no se identifican *ARH* que sean relevantes para su conservación”. Esta hipótesis ha sido nula, pues los resultados obtenidos indican que sí existen *ARH* importantes, que deben ser mejoradas y conservadas con el fin mantener y aumentar la  $R_p$  a largo plazo.

## **6-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (*IPS*), mediante la investigación realizada por Barrantes (2004), ha reconocido que el área de estudio se encuentra dentro de una gran área de recarga hídrica, algo que se pudo constatar con la presente investigación.

Los altos valores de infiltración de agua en el suelo, así como su descarga en diferentes sitios, son objeto de gran cuidado al determinar en un futuro, los distintos usos y cantidades de agua a utilizar, ello sin exceder o sobreexplotar el recurso hídrico subterráneo. Al igual que ocurre con cualquier recurso natural, las acciones humanas hacen posible que el agua se degrade, se contamine o se distribuya desordenadamente en el ciclo hidrológico, provocando que ésta no se encuentre disponible para ser utilizada en determinadas épocas del año.

Según las ciencias hidrogeológicas, la cuenca hidrográfica no siempre es congruente con la cuenca hidrológica, por lo tanto, podría esperarse que el agua descargada en las microcuencas Palo Marín y San Rafaelito provenga de otras microcuencas. Ante este supuesto, Walton (1970) menciona que en la mayoría de los casos ambas cuencas son razonablemente congruentes, por lo que la recarga y descarga lateral no se da. Para Faustino (2008), el hecho de que la investigación se haya desarrollado en la parte media-alta de varias microcuencas, motiva a que lo dicho por Walton se cumpla, pues es más probable que las recargas y descargas laterales se den en cuencas con pendientes y alturas mucho menores.

Es evidente que el área de estudio recibe un importante volumen de precipitación anual, algo que es favorable en relación con la posibilidad de que esa agua precipitada, llegue a ser parte del agua subterránea. En el bosque que se encuentra en la parte alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, la vegetación en distintos estratos, así como el musgo y el mantillo, forman una especie de filtro que permite captar gran parte de las precipitaciones. Este efecto “retardador” del bosque provoca una disminución de la escorrentía y mayor oportunidad para que el agua infiltre hacia capas inferiores del suelo. Además de los anteriores beneficios del bosque, hay que mencionar otros servicios potenciales como la conservación del suelo, fijación de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), conservación de la vida silvestre, materia prima para la industria maderera y artesanal, paisaje escénico natural y turismo sostenible, entre otros.

Aunque en el área de estudio existe una importante capacidad de infiltración y recarga de las aguas subterráneas, es claro que la ASADA de San Juan enfrenta reducciones de caudal importante en manantiales durante la época de verano, esto indica que, es la distribución estacional y muy marcada de las precipitaciones, la responsable de esta ocurrencia. Se debe tener presente entonces que las implicaciones del cambio climático mundial, pueden afectar la disponibilidad del flujo de agua subterránea en la zona.

La capacidad de infiltración, retención y percolación directa del agua subterránea en época de invierno, es la que se debe aumentar si se quieren contrarrestar las reducciones de caudal en época de verano.

El hecho de proponer acciones de manejo de una manera participativa en consenso con entes locales, hace posible la apropiación de una estrategia de manejo a implementarse en el corto, mediano y largo plazo. El compromiso que adquieran las *ASADAS*, la empresa hidroeléctrica el Embalse S.A, los grupos organizados, productores y la población local, es sin duda el responsable de dar verdadera utilidad al producto obtenido en esta investigación.

Desde el punto de vista de la gestión del recurso hídrico, las características más importantes en definir el potencial de recarga hídrica son aquellas que el ser humano puede modificar y mejorar, entre estas se encuentra la pendiente, uso del suelo, la cobertura vegetal del suelo y el tipo de suelo. Es muy difícil que el ser humano pueda intervenir sobre la naturaleza geológica y meteorológica de un sitio con el fin de mantener o aumentar el potencial de recarga hídrica.

La parte media-alta de las tres microcuencas, es una importante área captora y productora de agua. Este hecho, aunque positivo, no evita que el crecimiento poblacional, la condición climática estacional y el manejo inadecuado de las *ARH*, provoquen la merma del nivel freático, reduciendo así, la capacidad de abastecimiento de agua potable. De las tres causas antes mencionadas, la de proteger y garantizar la existencia de *ARH* relevantes, es la que a nivel local y de una manera participativa, debe privar.

De forma indirecta, la metodología aplicada permite identificar la amenaza por contaminación de las aguas subterráneas, pues áreas con alto potencial de recarga hídrica, tendrán también alto potencial para que ocurra la percolación de agentes o sustancias contaminantes. Por lo tanto, es importante considerar no solo acciones con el fin de facilitar la recarga hídrica, sino determinar medidas para prevenir, manejar y mitigar la contaminación de aguas subterráneas.

En cuanto a la metodología aplicada, ésta puede considerarse practica, de fácil replica y de relativo bajo costo, además, no requiere de mucha información técnica y permite tomar en cuenta el conocimiento de la población local, transmitir conocimientos, compartir experiencias y consensuar sobre el manejo que se le debe dar a las *ARH*. El propósito de la investigación es que la metodología sea replicada por actores locales, *ASADAS*, comités locales de cuenca, grupos organizados, extensionistas, instituciones estatales y organizaciones interesadas en la adecuada gestión del recurso hídrico. Es claro que existen

otras metodologías para determinar *ARH*, pero por su carácter técnico-científico y sus altos costos de implementación, éstas son menormente accesibles.

El tipo de suelo 2 y 3 cubierto por bosque, determina *ARH* con un muy importante aporte a la recarga y descarga de agua subterránea durante todo el año, por lo tanto, es de suma importancia, proteger y conservar las 540 has de bosque en régimen privado, que se encuentra en la parte alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, la cual a su vez, es parte del Área Silvestre Protegida llamada Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco (*PNAJCB*).

Aunque el alcance de este estudio no pretende identificar y calificar el tipo de acuífero que puede o no existir en la zona, los altos valores de recarga potencial (*R<sub>p</sub>*) obtenidos en la parte alta de las tres microcuencas y la presencia de manantiales con caudal importante en la parte media de estas, hace suponer que existe un acuífero muy probablemente libre o semilibre en la zona. Este supuesto puede comprobarse con la realización de un estudio hidrogeológico en el sitio.

Con el fin de contar con un registro climático más detallado que describa el área de estudio, se recomienda que las *ASADAS* gestionen la colocación de una estación meteorológica en la zona.

Una vez culminada esta investigación es indispensable convocar a todos los actores implicados en la gestión del recurso hídrico, ya sea en el ámbito institucional, empresarial o comunal. La convocatoria debe tener como fin, compartir y analizar los resultados obtenidos y determinar un plan de trabajo y seguimiento a corto, mediano y largo plazo.

Es indispensable consolidar la estructura organizativa de los comités u organizaciones locales para que de manera compartida y colaborativa, busquen el apoyo técnico y económico necesario para llevar a cabo las acciones de manejo sugeridas.

Ante el crecimiento poblacional y la demanda del recurso hídrico subterráneo, se debe prestar atención al desvío de agua entre microcuencas, actualmente esto ocurre principalmente de la microcuenca Palo a la Marín. En este momento, ese hecho puede ser aceptable, pero a futuro, cuando la demanda por el recurso sea mayor, podría generar problemas de abastecimiento en otras actividades que se den en la parte media y baja de la microcuenca Palo. Las extracciones de agua de una microcuenca, en la medida de lo posible deber darse para abastecer las necesidades de esa misma microcuenca (Custodio y Llamas 1983).

Por presentarse categorías altas, medias y bajas de  $R_p$ , en las tres microcuencas es indispensable implementar acciones de manejo, no obstante, es prioridad canalizar esfuerzos en un 46% del área de estudio que se encuentra bajo un tipo de cobertura distinto al bosque.

Determinar anualmente la demanda y la oferta disponible de agua subterránea, con el fin de determinar la capacidad de abasteciendo que a mediano y largo plazo, tiene la parte media-alta de las tres microcuencas.

En futuras aplicaciones de este método, es importante determinar promedios o rangos de infiltración básica ( $f_c$ ) para las  $ARH$ , ello con el fin de obtener también rangos o promedios de recarga potencial del acuífero ( $R_p$ ).

## **7-REFERENCIAS CITADAS**

Alvarado, A y Forsythe W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de costa rica. Revista de Agronomía Costarricense Numero 29. MAG: 85-94. Consultado el 29 de Junio. 2007. Disponible en [www.mag.go.cr/rev\\_agr/inicio.htm](http://www.mag.go.cr/rev_agr/inicio.htm)

Alvarado, A; Bertsch, F y Bornemisza, E. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. UCR. 111p.

Anne, E y Egger, M. 2003. El Ciclo Hidrológico: El ciclo hidrológico en el suelo terrestre. Consultado el 18 de Agosto. 2007. Disponible en [www.guateagua.org.gt/subtemas/](http://www.guateagua.org.gt/subtemas/).

Aparicio, F. 1989. Fundamentos de hidrología de superficie. LIMUSA. Mexico. 303p.

Arenas A, Chaves S y Cordero P. 1997. Diagnostico del Parque Nacional Juan Castro Blanco: Estudio de las condiciones físicas generales de la zona de estudio. UCR. 124p.

Asamblea legislativa (AL, CR). 2004. Ley de Aguas No. 276. 4ed. San José, Costa Rica, IJSA. 79p.

Asamblea legislativa (AL, CR). 1996. Ley Forestal No. 276. San José, Costa Rica, IJSA. 28p.

Astorga, A y Arias, M. 2003. Mapa de geopotencial hidrogeológica de Costa Rica: Implicaciones respecto a la gestión ambiental del desarrollo. Revista geológica de América Central. 29: 95-101p.

Baker, R. 1994. Soil and Water Science: key to understanding our global environment. Wisconsin, USA. SSSA. 103p.

Barrantes, G y Vega, M. 2004. Estrategia para la Implementación del Servicio Ambiental Hídrico en el Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco (PNAJCB), Área de Conservación Arenal-Huetar Norte. Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (IPS). San Carlos, Costa Rica, 47p.

Benitez, A. 1972. Captación de aguas subterráneas. 2da ed. Dossat, Madrid, España. 619p

Blanco, H. 2005. Propuesta de compromiso ambiental ante la ejecución de proyectos afines en la comunidad de San Juan, Ciudad Quesada, San Carlos. 190p.

Bras, R. 1990. Hydrology. An introduction to hydrology science. Massachusetts, USA. 643p.

Calvo, R. 1996. Agua potable: Condición actual y perspectivas futuras en relación con las políticas institucionales. UNA. 29-39p.

Centro Nacional de Alta Tecnología (CENAT). 2005. Foto Aérea Georeferenciada Encarta 2005 N° 485p0351. San José, Costa Rica.

Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). 2007. Laboratorio de recursos naturales de la Universidad de Costa Rica.

Chow, V; Maidment, D y Mays, L. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill. 584p.

Cubero, D. 1995. Metodología para la determinación de la capacidad de sus de las tierras de Costa Rica. MAG-MIRENEM. 88p.

Custodio, E y Llamas, M. 1983. Hidrología subterránea. 2da ed (Tomo I). Barcelona, España. Omega. 1157p.

Davie, T. 2002. Fundamentals of hydrology. Routledge fundamentals of physical geography. New York. USA. 169p.

Duke, J.1974. Relaciones hídricas de suelo y planta. D.F, Mexico, EDUTEX. 538p.

Equipo Básico de Atención Integral e Salud (EBAIS). 2002. Segundo informe de diagnostico de la comunidad de San Juan. 63p.

Faustino, J. 2007. Identificación, evaluación y manejo de áreas de recarga hídrica. Cartago, Costa Rica, CATIE. 60p.

Fetter, W. 2001. Aplied Hidrogeology: Propierties of acuifers. University of Wisconsin. 66-109p

Fondo Ambiental del Salvador (FONAES, San Salvador). 2002. Impacto ambiental. Trabajando por la conservación del recurso hídrico. 20: 11-17 p.

Gómez, M. 2003. Elementos de estadística descriptiva. 3.ed. San José, Costa Rica. EUNED 564p.

Guzmán, E. 2004. Propuesta de manejo para el Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco. Tesis Lic. San Carlos, Costa Rica, UNED. 145p.

Heredía, J y Murillo, J. 2003. Balance hídrico y estimación de la recarga mediante modelación numérica en pequeñas cuencas del sector sudoriental de la isla de gran canaria. Instituto Geológico y Minero de España. 19p.

Hernández, C y Cabalceta, G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, Costa Rica. ACCS-UCR. 112p.

Hernández, R. 2001. Balance hídrico de un ecosistema. Consultado el 4 de Febrero. 2008. Disponible en [www.forest.ula.ve](http://www.forest.ula.ve)

Instituto Geográfico Nacional (IGN). 1986. Hojas cartográficas georeferenciadas de Aguas Zarcas (Nº 3347 III) y Quesada (Nº 3346 IV). Escala 1: 50.000. 2ed. San José, Costa Rica.

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2007. Información meteorológica. Base de datos de precipitación y temperatura para la zona norte de Costa Rica.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). 2007. Información meteorológica. Base de datos de precipitación referentes a las estaciones meteorológicas ubicadas para interés de los proyectos hidroeléctricos Toro I,II y III.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2004. Actualización del plan estratégico 2003 al 2020. Acuerdo. n° 2005-944. 38p.

Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). 2004. Atlas digital de Costa Rica.

Jiménez F. 2000. Agroambiente. Evapotranspiración. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 17p.

Jiménez, F. 2005. Metodologías de investigación en sistemas agroforestales: Medición de los componentes del balance hídrico en saf. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 12p.

Jones, J. 1997. Global hydrology. processes, resources and environmental management. London, Inglaterra. Longman. 399p.

Junker, M. 2002. Método RAS para determinar la recarga de agua subterránea. FORGAES. El Salvador. 40p.

Maidment, D. 1992. Handbook of hidrology. Evapotranspiration. USA. McGraw-Hill Interamericana. 551p.



Maidment, D. 1993. Handbook of hidrology. Infiltration and soil water movement. USA. McGraw-Hill. 29 capitulos.

Marsalek, J; Jiménez, E y Malmquist, A. 2006. Technical Documents in Hydrology: Urban water cycle processes and interactions. UNESCO, Paris. Francia. 78p.

Matus, O. 2007. Elaboración participativa de una metodología para la identificación de áreas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE 228p.

Mejía, M. 2005. Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria, en la microcuenca El Limón, San Jerónimo, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 110p.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). 2000. Estudio de suelos y capacidad de uso de las tierras para la zonificación agropecuaria de las regiones Huetar Atlántica, Huetar Norte y Brunca. MIDEPLAN. 132 paginas.

Montes, J. 2000. Recursos hidrogeológicos. Problemas medioambientales derivados de la explotación de las aguas subterráneas. España. 29p

Laino, R. 2005. Manejo del recurso hídrico en la cuenca del Arroyo Capiibary: implicaciones para la gestión ambiental del acuífero Guaraní. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 104p.

Laporte G. 1994. Reconocimiento geológico del proyecto hidroeléctrico "El Embalse". San Juan, Ciudad Quesada, San Carlos. 17p.

Linsley, M; Kohler, M y Paulhus, J. 1977. Hidrología para ingenieros. 2ed. McGraw-Hill, Mexico. 386p.

Llamas, R; Hernández, N y Martínez, L. 2000. El uso intensivo de las aguas subterráneas: aspectos éticos, tecnológicos y económicos. Fundación Marcelino Botín. 54p.

Obando, F. 2005. Situación del recurso hídrico subterráneo de la subcuenca del río Aguas Calientes, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE 111p.

Orozco, E; Padilla, T y Salguero, M. 2003. Manual técnico: Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural (ARHN). 105p.

Poder Ejecutivo (PE, CR). 1965. Sistema de administración contratada por medio del acuerdo No 65-077.

Ramírez, P. 2006. Modelo conceptual de la cuenca del río Birris, Cartago. Tesis Mag. Sc. Costa Rica, UCR 91p.

Reyes, K. 2006. Análisis del estado de las fuentes de agua para consumo humano y funcionamiento de los acueductos rurales en la cuenca del río la Soledad, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 227p.

Reynolds, E y Thompson, F. 1988. Forest, climate and hydrology: regional impacts. Tokyo, Japon, UNU. 215p.

Reynolds, J. 2002. Manejo integrado de aguas subterráneas: un reto para el futuro. San José, Costa Rica, UNED. 325p.

Reynolds, J y Fraile, J. 2002. Presente y futuro de las aguas subterráneas en el Valle Central. San José, Costa Rica, UNED. 325p.

Sánchez, J. 2004. El ciclo hidrológico. Universidad de Salamanca, España. 9p

Sánchez, J. 2005 a. La evapotranspiración. Universidad de Salamanca, España. 7p

Sánchez, J. 2005 b. Conceptos fundamentales de hidrogeología. Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico. Universidad de Salamanca, España. 8p.

Sánchez, K. 2002. Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del Río Sarapiquí, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 149p.

Salguero, M. 2000. Cantones de Costa Rica. 2 ed. San José. Costa Rica. Editorial Costa Rica. 246p

Schosinsky, G. 2006. Calculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central. Escuela Centroamericana de

Geología. Números 34-35. Universidad de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 13-30p.

Schosinsky y Losilla. 2002. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central. Escuela Centroamericana de Geología. Números 23. Universidad de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 43-55p.

Soil Survey Staff (SSS). 1998. Keys to soil taxonomy. Andisoles. 8. ed. Washington, USA, USDA. 325p.

Solano, R. 2002. Legislación sobre aguas subterráneas en Costa Rica. San José, Costa Rica, EUNED. 281-298p.

Starosolszky, O. 1987. Applied surface hidrology. Water Resources Publications, USA. 821p.

UNESCO. 1980. Balance hídrico mundial y recursos hidráulicos de la tierra. 821p.

Vargas, A. 2000. Geología de Costa Rica: Geología aplicada. ETCR, CR. 425-441p.

Vargas, A. 1998. Balance hídrico en la cuenca del Río Reventazón, Costa Rica. Revista geológica de América Central. 21: 37-46.

Villón, M. 2004. Hidrología. EITCR. Cartago, CR. 474p.

Ward, A y Trimble, S. 2004. Environmental hydrology. 2.ed. Washington, USA. CRC. 475p

Wiley, J. 1959. Hidrology. Infiltration and soil moisture. 2.ed. New York, USA. 408p.

## **8-COMUNICACIONES PERSONALES**

Faustino, J. 2008. Flujo de agua subterránea. Cartago, Costa Rica, CATIE. Comunicación personal.

Ochoa, L. 2007. Información general de la Asociación Administrativa del Acueducto Rural de San Juan (entrevista no estructurada). Alajuela, Costa Rica. Comunicación personal.

Ramírez, R. 2007. Metodología para determinar áreas de recarga hídrica (entrevista semi-estructurada). San José, Costa Rica, Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA). Comunicación personal.

**Simbología utilizada en cada Balance Hídrico de Suelos:**

**fc:** Capacidad de Infiltración.

**I:** Infiltración.

**CC:** Capacidad de Campo.

**PM:** Punto de Marchitez.

**PR:** Profundidad de Raíces.

**(CC-PM):** Rango de Agua Disponible.

**DS:** Densidad de Suelo.

**C1:** Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

**C2:** Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

**Kp:** Factor por pendiente

**Kv:** Factor por vegetación

**Kfc:** Factor estimado con base a la prueba de infiltración.

**P:** Precipitación Media Mensual.

**Pi:** Precipitación que infiltra.

**ESC:** Escorrentía Superficial

**ETP:** Evapotranspiración Potencial.

**ETR:** Evapotranspiración Real.

**HSi:** Humedad de Suelo Inicial.

**HD:** Humedad Disponible

**HSf:** Humedad de Suelo Final.

**DCC:** Déficit de Capacidad de Campo.

**Rp:** Recarga Potencial

**NR:** Necesidad de Riego.

**Ret:** Retención de lluvia.

**9-ANEXOS**

**9.1- Balance Hídrico de Suelos en 25 ARH**

Área de Recarga Hídrica: 1				Microcuenca: Palo				Cobertura: Bosque				Suelo: 3		Precipitación: 3		
fc [mm/d]							3936,00									
Kp [0.01%]							0,06									
Kv [0.01%]							0,20			por peso						
Kfc [0.01%]							1,00			(%)	(mm)					
I [0.01%]							1,00			CC	171,62	2265,38				

DS (g/cm3):					0,44			PM	151,34	1997,69			
PR (mm)					3000,00			(CC-PM)	20,28	267,70			
HSi (mm)					2265,38								
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11								
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,20								
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
P (mm)	253,90	163,20	94,50	105,70	327,40	433,60	459,70	461,90	440,70	454,90	469,40	448,20	4113,10
Ret [mm]	50,78	32,64	18,90	21,14	65,48	86,72	91,94	92,38	88,14	90,98	93,88	89,64	822,62
Pi (mm)	203,12	130,56	75,60	84,56	261,92	346,88	367,76	369,52	352,56	363,92	375,52	358,56	3290,48
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	124,63	115,52	132,20	133,21	142,19	138,42	141,80	139,40	132,04	132,73	124,46	126,00	1582,62
HSi (mm)	2265,38	2265,38	2265,38	2222,76	2196,82	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	27073,42
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,79	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,45
HD (mm)	470,82	398,26	343,30	309,63	461,05	614,58	635,46	637,22	620,26	631,62	643,22	626,26	6391,64
ETR (mm)	124,63	115,52	118,22	110,50	142,19	138,42	141,80	139,40	132,04	132,73	124,46	126,00	1545,93
HSf (mm)	2265,38	2265,38	2222,76	2196,82	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	27073,42
DCC (mm)	0,00	0,00	42,62	68,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	111,19
Rp (mm)	78,49	15,04	0,00	0,00	51,16	208,46	225,96	230,12	220,52	231,19	251,06	232,56	<b>1744,55</b>
NR (mm)	0,00	0,00	56,60	91,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	147,87

<b>Área de Recarga Hídrica: 2</b>		<b>Microcuena: Palo</b>		<b>Cobertura: Zacate 75%</b>		<b>Suelo: 3</b>		<b>Precipitación: 3</b>	
fc [mm/d]					144,00				
Kp [0.01%]					0,06				
Kv [0.01%]					0,21		por peso		
Kfc [0.01%]					0,58		(%)	(mm)	
I [0.01%]					0,85		CC	170,29	894,02

DS (g/cm3):					0,42			PM	156,36	820,89			
PR (mm)					1250,00			(CC-PM)	13,93	73,13			
HSi (mm)					894,02								
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11								
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,12								
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
P (mm)	253,90	163,20	94,50	105,70	327,40	433,60	459,70	461,90	440,70	454,90	469,40	448,20	4113,10
Ret [mm]	30,47	19,58	11,34	12,68	39,29	52,03	55,16	55,43	52,88	54,59	56,33	53,78	493,57
Pi (mm)	190,31	122,33	70,83	79,23	245,40	325,01	344,57	346,22	330,33	340,97	351,84	335,95	3082,98
ESC (mm)	33,12	21,29	12,33	13,79	42,71	56,56	59,97	60,25	57,49	59,34	61,23	58,47	536,54
ETP (mm)	124,63	115,52	132,20	133,21	142,19	138,42	141,80	139,40	132,04	132,73	124,46	126,00	1582,62
HSi (mm)	894,02	894,02	894,02	888,12	888,68	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	10717,02
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,16	0,18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,34
HD (mm)	263,44	195,46	143,97	146,46	313,19	398,14	417,70	419,35	403,46	414,10	424,97	409,08	3949,33
ETR (mm)	124,63	115,52	76,73	78,67	142,19	138,42	141,80	139,40	132,04	132,73	124,46	126,00	1472,61
HSf (mm)	894,02	894,02	888,12	888,68	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	10717,02
DCC (mm)	0,00	0,00	5,90	5,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,25
Rp (mm)	65,68	6,80	0,00	0,00	97,86	186,59	202,76	206,81	198,29	208,24	227,37	209,95	<b>1610,37</b>
NR (mm)	0,00	0,00	61,37	59,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	121,25

<b>Área de Recarga Hídrica: 3</b>			<b>Microcuenca: Palo</b>			<b>Cobertura: Bosque</b>			<b>Suelo: 3</b>		<b>Precipitación: 2</b>	
Kp [0.01%]					0,06							
Kv [0.01%]					0,20			por peso				
Kfc [0.01%]					1			(%)	(mm)			
I [0.01%]					1			CC	171,62	2265,38		
DS (g/cm3):					0,44			PM	151,34	1997,69		
PR (mm)					3000,00			(CC-PM)	20,28	267,70		

HSi (mm)					2265,38								
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11								
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,20								
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30
Ret [mm]	60,20	32,60	22,46	22,00	68,10	85,28	100,36	93,20	99,08	100,10	82,84	89,04	855,26
Pi (mm)	240,80	130,40	89,84	88,00	272,40	341,12	401,44	372,80	396,32	400,40	331,36	356,16	3421,04
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85
HSi (mm)	2265,38	2265,38	2263,93	2220,30	2187,06	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	27059,75
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	0,99	0,77	0,59	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,35
HD (mm)	508,50	398,10	356,08	310,61	461,77	608,82	669,14	640,50	664,02	668,10	599,06	623,86	6508,53
ETR (mm)	143,29	131,85	133,47	121,24	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1749,46
HSf (mm)	2265,38	2263,93	2220,30	2187,06	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	2265,38	27059,75
DCC (mm)	0,00	1,45	45,08	78,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	124,86
Rp (mm)	97,51	0,00	0,00	0,00	32,45	184,13	242,09	214,97	245,72	250,78	190,17	213,76	<b>1671,58</b>
NR (mm)	0,00	1,93	62,83	109,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	174,26

<b>Área de Recarga Hídrica: 4</b>				<b>Microcuenca: Palo</b>				<b>Cobertura: Zacate 75%</b>				<b>Suelo: 3</b>		<b>Precipitación: 2</b>	
fc [mm/d]							144,00								
Kp [0.01%]							0,06								
Kv [0.01%]							0,21				por peso				
Kfc [0.01%]							0,58				(%)	(mm)			
I [0.01%]							0,85			CC	170,29	894,02			
DS (g/cm3):							0,42			PM	156,36	820,89			
PR (mm)							1250,00			(CC-PM)	13,93	73,13			
HSi (mm)							894,02								



N° de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11								
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,12								
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30
Ret [mm]	36,12	19,56	13,48	13,20	40,86	51,17	60,22	55,92	59,45	60,06	49,70	53,42	513,16
Pi (mm)	225,62	122,18	84,17	82,45	255,22	319,61	376,13	349,29	371,33	375,15	310,46	333,70	3205,31
ESC (mm)	39,26	21,26	14,65	14,35	44,42	55,62	65,46	60,79	64,62	65,29	54,03	58,08	557,83
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85
HSi (mm)	894,02	894,02	893,06	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	10727,30
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	0,86	0,07	0,04	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	9,97
HD (mm)	298,75	195,31	156,34	155,58	328,36	392,74	449,26	422,42	444,46	448,28	383,59	406,83	4081,93
ETR (mm)	143,29	123,14	80,91	79,51	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1646,45
HSf (mm)	894,02	893,06	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	894,02	10727,30
DCC (mm)	0,00	0,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97
Rp (mm)	82,32	0,00	2,30	2,94	93,60	162,62	216,78	191,47	220,72	225,53	169,27	191,30	<b>1558,86</b>
NR (mm)	0,00	10,15	70,31	72,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	153,37

<b>Área de Recarga Hídrica: 5</b>		<b>Microcuenca: Palo</b>		<b>Cobertura: Zacate 50%</b>		<b>Suelo: 3</b>		<b>Precipitación: 2</b>	
fc [mm/d]					288,00				
Kp [0.01%]					0,06				
Kv [0.01%]					0,09		por peso		
Kfc [0.01%]					0,74		(%)	(mm)	
I [0.01%]					0,89		CC	192,84	1041,34
DS (g/cm3):					0,36		PM	175,08	945,43
PR (mm)					1500,00		(CC-PM)	17,76	95,90
HSi (mm)					1041,34				



Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30
Ret [mm]	60,20	32,60	22,46	22,00	68,10	85,28	100,36	93,20	99,08	100,10	82,84	89,04	855,26
Pi (mm)	240,80	130,40	89,84	88,00	272,40	341,12	401,44	372,80	396,32	400,40	331,36	356,16	3421,04
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85
HSi (mm)	2610,56	2610,56	2609,16	2567,73	2537,66	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	31209,55
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	0,99	0,74	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,28
HD (mm)	478,75	368,35	326,39	283,12	437,45	579,07	639,39	610,75	634,27	638,35	569,31	594,11	6159,30
ETR (mm)	143,29	131,79	131,27	118,07	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1744,03
HSf (mm)	2610,56	2609,16	2567,73	2537,66	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	31209,55
DCC (mm)	0,00	1,39	42,82	72,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	117,11
Rp (mm)	97,51	0,00	0,00	0,00	37,89	184,13	242,09	214,97	245,72	250,78	190,17	213,76	<b>1677,01</b>
NR (mm)	0,00	1,93	62,77	107,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	171,94

Área de Recarga Hídrica: 7		Microcuenca: Palo		Cobertura: Zacate 75%		Suelo: 2		Precipitación: 2	
fc [mm/d]					475,00				
Kp [0.01%]					0,06				
Kv [0.01%]					0,21		por peso		
Kfc [0.01%]					0,85		(%)	(mm)	
I [0.01%]					1,00		CC	250,20	938,25
DS (g/cm3):					0,30		PM	225,83	846,86
PR (mm)					1250,00		(CC-PM)	24,37	91,39
HSi (mm)					938,25				
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11				

Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,12								
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30
Ret [mm]	36,12	19,56	13,48	13,20	40,86	51,17	60,22	55,92	59,45	60,06	49,70	53,42	513,16
Pi (mm)	264,88	143,44	98,82	96,80	299,64	375,23	441,58	410,08	435,95	440,44	364,50	391,78	3763,14
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85
HSi (mm)	938,25	938,25	938,25	929,20	927,51	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	11239,21
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,43	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,72
HD (mm)	356,27	234,83	190,21	179,14	380,29	466,62	532,97	501,47	527,34	531,83	455,88	483,16	4840,01
ETR (mm)	143,29	132,33	107,87	98,49	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1701,59
HSf (mm)	938,25	938,25	929,20	927,51	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	11239,21
DCC (mm)	0,00	0,00	9,05	10,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,79
Rp (mm)	121,59	11,11	0,00	0,00	127,28	218,24	282,24	252,25	285,35	290,82	223,30	249,38	<b>2061,56</b>
NR (mm)	0,00	0,00	52,39	64,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	117,05

Área de Recarga Hídrica: 8		Microcuencia: Palo		Cobertura: Zacate 50%		Suelo: 2		Precipitación: 2	
fc [mm/d]					2880,00				
Kp [0.01%]					0,06				
Kv [0.01%]					0,09		por peso		
Kfc [0.01%]					1,00		(%)	(mm)	
I [0.01%]					1,00		CC	129,49	1145,99
DS (g/cm3):					0,59		PM	119,86	1060,76
PR (mm)					1500,00		(CC-PM)	9,63	85,23
HSi (mm)					1145,99				
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11				
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,12				

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30
Ret [mm]	36,12	19,56	13,48	13,20	40,86	51,17	60,22	55,92	59,45	60,06	49,70	53,42	513,16
Pi (mm)	264,88	143,44	98,82	96,80	299,64	375,23	441,58	410,08	435,95	440,44	364,50	391,78	3763,14
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85
HSi (mm)	1145,99	1145,99	1145,99	1140,07	1139,48	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	13739,42
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,39	0,28	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,66
HD (mm)	350,11	228,67	184,05	176,11	378,36	460,46	526,81	495,31	521,18	525,67	449,73	477,00	4773,43
ETR (mm)	143,29	132,33	104,74	97,40	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1697,36
HSf (mm)	1145,99	1145,99	1140,07	1139,48	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	13739,42
DCC (mm)	0,00	0,00	5,91	6,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,42
Rp (mm)	121,59	11,11	0,00	0,00	131,51	218,24	282,24	252,25	285,35	290,82	223,31	249,38	<b>2065,79</b>
NR (mm)	0,00	0,00	52,39	61,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	113,92

Área de Recarga Hídrica: 9				Microcuencia: Palo			Cobertura: Pastizal			Suelo: 2		Precipitación: 2	
fc [mm/d]						96,00							
Kp [0.01%]						0,06							
Kv [0.01%]						0,18			por peso				
Kfc [0.01%]						0,48			(%)	(mm)			
I [0.01%]						0,72		CC	98,28	786,24			
DS (g/cm3):						0,80		PM	89,27	714,16			
PR (mm)						1000,00		(CC-PM)	9,01	72,08			
HSi (mm)						786,24							
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?						11							
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12						0,12							
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total



P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30
Ret [mm]	36,12	19,56	13,48	13,20	40,86	51,17	60,22	55,92	59,45	60,06	49,70	53,42	513,16
Pi (mm)	264,88	143,44	98,82	96,80	299,64	375,23	441,58	410,08	435,95	440,44	364,50	391,78	3763,14
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85
HSi (mm)	784,49	784,49	784,49	783,88	784,28	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	9413,08
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,32	0,26	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,58
HD (mm)	341,38	219,94	175,33	172,69	375,93	451,73	518,09	486,58	512,45	516,94	441,00	468,28	4680,34
ETR (mm)	143,29	132,33	99,44	96,40	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1691,06
HSf (mm)	784,49	784,49	783,88	784,28	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	9413,08
DCC (mm)	0,00	0,00	0,61	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83
Rp (mm)	121,59	11,11	0,00	0,00	137,80	218,24	282,24	252,25	285,35	290,82	223,30	249,38	<b>2072,08</b>
NR (mm)	0,00	0,00	52,39	56,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	108,62

<b>Área de Recarga Hídrica: 11</b>				<b>Microcuenca: Marín</b>			<b>Cobertura: Bosque</b>			<b>Suelo: 2</b>		<b>Precipitación: 2</b>	
fc [mm/d]					1440,00								
Kp [0.01%]					0,06								
Kv [0.01%]					0,20				por peso				
Kfc [0.01%]					0,99697				(%)	(mm)			
I [0.01%]					1			CC	110,15	2610,56			
DS (g/cm3):					0,79			PM	100,11	2372,61			
PR (mm)					3000,00			(CC-PM)	10,04	237,95			
HSi (mm)					2610,56								
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11								
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,20								
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30

Ret [mm]	60,20	32,60	22,46	22,00	68,10	85,28	100,36	93,20	99,08	100,10	82,84	89,04	855,26
Pi (mm)	240,80	130,40	89,84	88,00	272,40	341,12	401,44	372,80	396,32	400,40	331,36	356,16	3421,04
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85
HSi (mm)	2610,56	2610,56	2609,16	2567,73	2537,66	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	31209,55
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	0,99	0,74	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,28
HD (mm)	478,75	368,35	326,39	283,12	437,45	579,07	639,39	610,75	634,27	638,35	569,31	594,11	6159,30
ETR (mm)	143,29	131,79	131,27	118,07	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1744,03
HSf (mm)	2610,56	2609,16	2567,73	2537,66	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	31209,55
DCC (mm)	0,00	1,39	42,82	72,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	117,11
Rp (mm)	97,51	0,00	0,00	0,00	37,89	184,13	242,09	214,97	245,72	250,78	190,17	213,76	<b>1677,01</b>
NR (mm)	0,00	1,93	62,77	107,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	171,94

<b>Área de Recarga Hídrica: 12</b>				<b>Microcuenca: Marín</b>				<b>Cobertura: Zacate 75%</b>				<b>Suelo: 2</b>		<b>Precipitación: 2</b>	
fc [mm/d]							1598,00								
Kp [0.01%]							0,06								
Kv [0.01%]							0,21				por peso				
Kfc [0.01%]							1,00				(%)	(mm)			
I [0.01%]							1,00			CC	250,20	938,25			
DS (g/cm3):							0,30			PM	225,83	846,86			
PR (mm)							1250,00			(CC-PM)	24,37	91,39			
HSi (mm)							938,25								
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?							11								
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12							0,12								
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>		
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30		
Ret [mm]	36,12	19,56	13,48	13,20	40,86	51,17	60,22	55,92	59,45	60,06	49,70	53,42	513,16		



Pi (mm)	264,88	143,44	98,82	96,80	299,64	375,23	441,58	410,08	435,95	440,44	364,50	391,78	3763,14
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85
HSi (mm)	938,25	938,25	938,25	929,20	927,51	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	11239,21
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,43	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,72
HD (mm)	356,27	234,83	190,21	179,14	380,29	466,62	532,97	501,47	527,34	531,83	455,88	483,16	4840,01
ETR (mm)	143,29	132,33	107,87	98,49	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1701,59
HSf (mm)	938,25	938,25	929,20	927,51	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	11239,21
DCC (mm)	0,00	0,00	9,05	10,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,79
Rp (mm)	121,59	11,11	0,00	0,00	127,28	218,24	282,24	252,25	285,35	290,82	223,30	249,38	<b>2061,56</b>
NR (mm)	0,00	0,00	52,39	64,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	117,05

<b>Área de Recarga Hídrica: 13</b>				<b>Microcuenca: Marín</b>				<b>Cobertura: Zacate 50%</b>				<b>Suelo: 2</b>		<b>Precipitación: 2</b>	
fc [mm/d]						144,00									
Kp [0.01%]						0,06									
Kv [0.01%]						0,09				por peso					
Kfc [0.01%]						0,58				(%)	(mm)				
I [0.01%]						0,73			CC	129,49	1145,99				
DS (g/cm3):						0,59			PM	119,86	1060,76				
PR (mm)						1500,00			(CC-PM)	9,63	85,23				
HSi (mm)						1145,99									
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?						11									
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12						0,12									
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>		
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30		
Ret [mm]	36,12	19,56	13,48	13,20	40,86	51,17	60,22	55,92	59,45	60,06	49,70	53,42	513,16		
Pi (mm)	193,83	104,96	72,32	70,83	219,27	274,58	323,14	300,08	319,01	322,30	266,73	286,69	2753,73		

ESC (mm)	71,05	38,48	26,51	25,97	80,37	100,65	118,45	110,00	116,94	118,14	97,77	105,09	1009,41
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85
HSi (mm)	1145,99	1145,99	1139,87	1136,39	1131,02	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	13721,16
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	0,68	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	9,68
HD (mm)	279,06	190,19	151,42	146,46	289,52	359,81	408,36	385,31	404,24	407,52	351,95	371,91	3745,76
ETR (mm)	143,29	111,08	75,79	76,21	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1625,98
HSf (mm)	1145,99	1139,87	1136,39	1131,02	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	1145,99	13721,15
DCC (mm)	0,00	6,12	9,60	14,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,69
Rp (mm)	50,54	0,00	0,00	0,00	42,68	117,59	163,79	142,26	168,41	172,68	125,54	144,29	<b>1127,76</b>
NR (mm)	0,00	27,37	85,02	91,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	203,56

Área de Recarga Hídrica: 14				Microcuencia: Marín				Cobertura: Paltizal			Suelo: 2		Precipitación: 2	
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	
fc [mm/d]					144,00									
Kp [0.01%]					0,06									
Kv [0.01%]					0,18				por peso					
Kfc [0.01%]					0,58				(%)	(mm)				
I [0.01%]					0,82			CC	98,28	786,24				
DS (g/cm3):					0,80			PM	89,27	714,16				
PR (mm)					1000,00			(CC-PM)	9,01	72,08				
HSi (mm)					786,24									
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11									
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,12									
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30	
Ret [mm]	36,12	19,56	13,48	13,20	40,86	51,17	60,22	55,92	59,45	60,06	49,70	53,42	513,16	
Pi (mm)	217,67	117,87	81,21	79,55	246,23	308,35	362,88	336,99	358,25	361,94	299,53	321,95	3092,42	
ESC (mm)	47,21	25,57	17,61	17,25	53,41	66,88	78,71	73,09	77,70	78,50	64,97	69,83	670,73	



ETP (mm)	140,36	131,66	150,83	152,04	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1806,11
HSi (mm)	2610,56	2610,56	2610,56	2573,25	2556,09	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	31234,89
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,77	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,43
HD (mm)	436,03	379,47	334,17	309,95	472,32	603,36	617,14	597,98	578,12	608,61	585,25	574,82	6097,22
ETR (mm)	140,36	131,66	133,52	126,47	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1763,23
HSf (mm)	2610,56	2610,56	2573,25	2556,09	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	31234,89
DCC (mm)	0,00	0,00	37,30	54,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,77
Rp (mm)	57,72	9,86	0,00	0,00	69,98	206,48	218,25	201,03	187,34	218,04	205,75	195,93	<b>1570,39</b>
NR (mm)	0,00	0,00	54,61	80,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	134,65

Área de Recarga Hídrica: 16				Microcuenca: Marín				Cobertura: Zacate 75%			Suelo: 2		Precipitación: 1		
fc [mm/d]															
Kp [0.01%]															
Kv [0.01%]															
Kfc [0.01%]															
I [0.01%]															
DS (g/cm3):															
PR (mm)															
HSi (mm)															
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?															
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12															
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>		
P (mm)	247,60	176,90	120,28	136,64	361,05	456,76	473,99	450,04	425,21	463,33	434,13	421,09	4167,02		
Ret [mm]	29,71	21,23	14,43	16,40	43,33	54,81	56,88	54,01	51,03	55,60	52,10	50,53	500,04		
Pi (mm)	217,89	155,67	105,84	120,24	317,73	401,95	417,11	396,04	374,19	407,73	382,03	370,56	3666,97		
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
ETP (mm)	140,36	131,66	150,83	152,04	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1806,11		
HSi (mm)	938,25	938,25	938,25	930,39	931,58	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	938,25	11244,47		



C2	1,00	0,95	0,11	0,26	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,32
HD (mm)	251,13	200,00	158,74	170,89	333,18	402,39	414,84	397,53	379,57	407,14	386,02	376,59	3878,02
ETR (mm)	140,36	128,25	83,68	95,90	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1679,40
HSf (mm)	786,24	785,92	786,24	786,24	786,24	786,24	786,24	786,24	786,24	786,24	786,24	786,24	9434,56
DCC (mm)	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32
Rp (mm)	38,69	0,00	2,97	2,91	96,70	171,38	181,82	166,45	154,66	182,44	172,39	163,57	1333,98
NR (mm)	0,00	3,73	67,15	56,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	127,03

Área de Recarga Hídrica: 18				Microcuenca: Marín				Cobertura: Caña		Suelo: 2		Precipitación: 1	
fc [mm/d]					672,00								
Kp [0.01%]					0,06								
Kv [0.01%]					0,10				por peso				
Kfc [0.01%]					0,91				(%)	(mm)			
I [0.01%]					1,00			CC	125,72	784,49			
DS (g/cm3):					0,52			PM	113,46	707,99			
PR (mm)					1200,00			(CC-PM)	12,26	76,50			
HSi (mm)					784,49								
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11								
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,12								
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	247,60	176,90	120,28	136,64	361,05	456,76	473,99	450,04	425,21	463,33	434,13	421,09	4167,02
Ret [mm]	29,71	21,23	14,43	16,40	43,33	54,81	56,88	54,01	51,03	55,60	52,10	50,53	500,04
Pi (mm)	217,89	155,67	105,84	120,24	317,73	401,95	417,11	396,04	374,19	407,73	382,03	370,56	3666,97
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	140,36	131,66	150,83	152,04	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1806,11
HSi (mm)	784,49	784,49	784,49	783,85	784,29	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	9413,07
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,41	0,58	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,99
HD (mm)	294,39	232,17	182,35	196,10	394,02	478,45	493,61	472,54	450,69	484,23	458,53	447,06	4584,16

ETR (mm)	140,36	131,66	106,48	119,80	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1729,52
HSf (mm)	784,49	784,49	783,85	784,29	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	784,49	9413,07
DCC (mm)	0,00	0,00	0,64	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84
Rp (mm)	77,52	24,01	0,00	0,00	153,13	243,02	256,17	237,04	221,35	255,11	240,48	229,62	<b>1937,45</b>
NR (mm)	0,00	0,00	44,99	32,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,43

<b>Área de Recarga Hídrica: 19</b>				<b>Microcuenca: San Rafaelito</b>				<b>Cobertura: Bosque</b>			<b>Suelo: 2</b>		<b>Precipitación: 2</b>	
fc [mm/d]					1512,00									
Kp [0.01%]					0,06									
Kv [0.01%]					0,20				por peso					
Kfc [0.01%]					1,00				(%)	(mm)				
I [0.01%]					1,00			CC	110,15	2610,56				
DS (g/cm3):					0,79			PM	100,11	2372,61				
PR (mm)					3000,00			(CC-PM)	10,04	237,95				
HSi (mm)					2610,56									
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11									
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,20									
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>	
P (mm)	301,00	163,00	112,30	110,00	340,50	426,40	501,80	466,00	495,40	500,50	414,20	445,20	4276,30	
Ret [mm]	60,20	32,60	22,46	22,00	68,10	85,28	100,36	93,20	99,08	100,10	82,84	89,04	855,26	
Pi (mm)	240,80	130,40	89,84	88,00	272,40	341,12	401,44	372,80	396,32	400,40	331,36	356,16	3421,04	
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ETP (mm)	143,29	132,33	151,21	152,42	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1798,85	
HSi (mm)	2610,56	2610,56	2609,16	2567,73	2537,66	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	31209,55	
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00	
C2	1,00	0,99	0,74	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,28	
HD (mm)	478,75	368,35	326,39	283,12	437,45	579,07	639,39	610,75	634,27	638,35	569,31	594,11	6159,30	

ETR (mm)	143,29	131,79	131,27	118,07	161,62	156,99	159,35	157,83	150,60	149,62	141,19	142,40	1744,03
HSf (mm)	2610,56	2609,16	2567,73	2537,66	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	31209,55
DCC (mm)	0,00	1,39	42,82	72,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	117,11
Rp (mm)	97,51	0,00	0,00	0,00	37,89	184,13	242,09	214,97	245,72	250,78	190,17	213,76	<b>1677,01</b>
NR (mm)	0,00	1,93	62,77	107,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	171,94

Área de Recarga Hídrica: 20					Microcuenca: San Rafaelito			Cobertura: Bosque		Suelo: 2		Precipitación: 1	
fc [mm/d]					1512,00								
Kp [0.01%]					0,06								
Kv [0.01%]					0,20				por peso				
Kfc [0.01%]					1,00				(%)	(mm)			
I [0.01%]					1,00			CC	110,15	2610,56			
DS (g/cm3):					0,79			PM	100,11	2372,61			
PR (mm)					3000,00			(CC-PM)	10,04	237,95			
HSi (mm)					2610,56								
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11								
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,20								
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
P (mm)	247,60	176,90	120,28	136,64	361,05	456,76	473,99	450,04	425,21	463,33	434,13	421,09	4167,02
Ret [mm]	49,52	35,38	24,06	27,33	72,21	91,35	94,80	90,01	85,04	92,67	86,83	84,22	833,40
Pi (mm)	198,08	141,52	96,22	109,31	288,84	365,41	379,19	360,04	340,17	370,66	347,30	336,87	3333,61
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	140,36	131,66	150,83	152,04	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1806,11
HSi (mm)	2610,56	2610,56	2610,56	2573,25	2556,09	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	2610,56	31234,89
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,77	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,43
HD (mm)	436,03	379,47	334,17	309,95	472,32	603,36	617,14	597,98	578,12	608,61	585,25	574,82	6097,22
ETR (mm)	140,36	131,66	133,52	126,47	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1763,23









Rp (mm)	21,26	0,00	0,00	0,00	70,88	139,23	148,45	134,77	124,73	149,82	141,83	133,93	<b>1064,88</b>
NR (mm)	0,00	16,19	74,58	63,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	154,68

<b>Área de Recarga Hídrica: 24</b>				<b>Microcuenca: San Rafaelito</b>				<b>Cobertura: Bosque</b>		<b>Suelo: 1</b>		<b>Precipitación: 1</b>	
fc [mm/d]					2938,00								
Kp [0.01%]					0,06								
Kv [0.01%]					0,20				por peso				
Kfc [0.01%]					1,00				(%)	(mm)			
I [0.01%]					1,00			CC	82,46	1706,92			
DS (g/cm3):					0,69			PM	72,38	1498,27			
PR (mm)					3000,00			(CC-PM)	10,08	208,66			
HSi (mm)					1706,92								
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?					11								
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12					0,20								
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
P (mm)	247,60	176,90	120,28	136,64	361,05	456,76	473,99	450,04	425,21	463,33	434,13	421,09	4167,02
Ret [mm]	49,52	35,38	24,06	27,33	72,21	91,35	94,80	90,01	85,04	92,67	86,83	84,22	833,40
Pi (mm)	198,08	141,52	96,22	109,31	288,84	365,41	379,19	360,04	340,17	370,66	347,30	336,87	3333,61
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	140,36	131,66	150,83	152,04	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1806,11
HSi (mm)	1706,92	1706,92	1706,92	1672,05	1657,59	1706,92	1706,92	1706,92	1706,92	1706,92	1706,92	1706,92	20398,86
C1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
C2	1,00	1,00	0,74	0,63	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	11,37
HD (mm)	406,74	350,17	304,88	283,09	448,17	574,07	587,84	568,69	548,82	579,32	555,96	545,53	5753,28
ETR (mm)	140,36	131,66	131,09	123,77	164,39	158,93	160,94	159,00	152,83	152,62	141,55	140,94	1758,09
HSf (mm)	1706,92	1706,92	1672,05	1657,59	1706,92	1706,92	1706,92	1706,92	1706,92	1706,92	1706,92	1706,92	20398,86
DCC (mm)	0,00	0,00	34,87	49,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	84,20
Rp (mm)	57,72	9,86	0,00	0,00	75,12	206,48	218,25	201,03	187,34	218,04	205,75	195,93	<b>1575,52</b>





## **9.2- Resultado del análisis de suelos realizado en el laboratorio del CIA**



Centro de Investigaciones Agronómicas  
Facultad de Ciencias Agrícolas  
Universidad de Costa Rica

### LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES

**N° DE SOLICITUD:** 26042 **PÁGINA:** 1/1  
**USUARIO:** HAROLD BLANCO ROJAS  
**SUBCLIENTE:** TESIS MAESTRIA EN RECURSOS NATURALES - UNED  
**CORREO-E:** harillo@costarricense.cr **TELÉFONO:** 351-5340  
**ANÁLISIS:** Ret\_H /Den\_AP **FAX:** --  
**FECHA DE RECEPCIÓN:** 14 de enero del 2008 **DIRECCIÓN:** PROVINCIA: ALAJUELA  
**FECHA DE REPORTE:** 22 de enero del 2008 **CANTÓN:** SAN CARLOS  
**N° DE MUESTRAS:** 11 **LOCALIDAD:** CIUDAD QUESADA  
**OBSERVACIONES:** -- **CULTIVO:** SIN CULTIVO

ANÁLISIS DE DENSIDAD APARENTE Y RETENCIÓN DE HUMEDAD					
ID USUARIO	ID LAB	Densidad aparente (g/cc)	RETENCIÓN (%)		AGUA ÚTIL (%)
			0,33 BAR	15 BARES	
S2 - BOSQUE	RN - 1 - 08	0,79	110,15	100,11	10,04
S2 - ZACATE 50	RN - 2 - 08	0,59	129,49	119,86	9,63
S2 - PASTIZAL	RN - 3 - 08	0,80	98,28	89,27	9,01
S2 - ZACATE 75	RN - 4 - 08	0,30	250,20	225,83	24,37
S2 - CAÑA	RN - 5 - 08	0,52	125,72	113,46	12,26
S1 - BOSQUE	RN - 6 - 08	0,69	82,46	72,38	10,08
S1 - CAÑA	RN - 7 - 08	0,71	86,31	75,00	11,30
S1 - TRANSICION CAÑA-BOSQUE	RN - 8 - 08	0,68	70,38	64,27	6,10
S3 - ZACATE 50	RN - 9 - 08	0,36	192,84	175,08	17,75
S3 - BOSQUE	RN - 10 - 08	0,44	171,62	151,34	20,29
S3 - ZACATE 75	RN - 11 - 08	0,42	170,29	156,36	13,92

Ing. Agr. Rafael Mata Chinchilla M.Sc.

COORDINADOR DEL LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES







NO. 303 / 5



### LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES

**N° DE SOLICITUD** 26404 **PÁGINA:** 1/1  
**USUARIO:** HAROLD BLANCO ROJAS  
**SUBCLIENTE:** TESIS MAESTRIA EN RECURSOS NATURALES - UNED  
**CORREO-E:** harillo@costarricense.cr **TELÉFONO:** 351-5340  
**ANÁLISIS:** TEXT **FAX:** --  
**FECHA DE RECEPCIÓN:** 14 de enero del 2008 **DIRECCIÓN:** ALAJUELA  
**FECHA DE REPORTE:** 18 de enero del 2008 **CANTÓN:** SAN CARLOS  
**N° DE MUESTRAS:** 9 **LOCALIDAD:** CIUDAD QUESADA  
**OBSERVACIONES:** -- **CULTIVO:** SIN CULTIVO

ANÁLISIS DE TEXTURA EN SUELOS					
ID USUARIO	ID LAB	%			NOMBRE TEXTURAL
		ARENA	LIMO	ARCILLA	
S3 - ZACATE 50	RN - 12 - 08	84	10	6	ARENA FRANCA
S2 - BOSQUE	RN - 13 - 08	87	10	3	ARENA FRANCA
S2 - PASTIZAL	RN - 14 - 08	74	23	3	ARENA FRANCA
S3 - ZACATE 75	RN - 15 - 08	82	15	3	ARENA FRANCA
S2 - ZACATE 50	RN - 16 - 08	87	10	3	ARENA FRANCA
S2 - ZACATE 75	RN - 17 - 08	89	8	3	ARENOSO
S1 - CAÑA	RN - 18 - 08	79	13	8	ARENA FRANCA
S3 - BOSQUE	RN - 19 - 08	81	18	1	ARENA FRANCA
S1 - BOSQUE	RN - 20 - 08	68	14	18	FRANCO ARENOSO

Jorge Armandoleiva S.

Ing. Agr. Rafael Mata Chinchilla M.Sc.

COORDINADOR DEL LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES



Teléfonos: (506) 207-3061, 207-3005, 207-3011, 207-3093 • Fax: (506) 234-1627  
Recepción de muestras: 207-3091 • Laboratorio de Suelos: 207-3112  
Laboratorio de Poscosecha: (506) 207-3213

### **9.3- Resultado del análisis de suelos realizado en el laboratorio del *INTA***



**ANTA**

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia  
en Tecnología Agropecuaria - Costa Rica

Laboratorio de Suelos

Tel-Fax: 291-5236

RESULTADOS DE TEXTURA Y MATERIA ORGÁNICA



FECHA:

228-07-08

INFORME #:

NOMBRE: HAROLD BLANCO  
ALAJUELA SAN CARLOS

METODO HIDROMETRICO

TEXTURA METODO USDA

# LAB.	% ARENA	% LIMO	% ARCILLA	TEXTURA	% M.O.	IDENTIFICACIÓN
2084	52	30	18	F/F a	4,4	P
2085	44	40	16	F	4,6	B
2086	52	32	16	F/F a	4,1	C
2087	46	38	16	F	3,4	V50
2088	42	40	18	F	3,5	V275
RETENCION DE HUMEDAD (Atmosferas)						
		0,33	15,0	%A.Util	D.a	
2084		32,08	23,85	8,23	0,97	
2085		34,75	22,91	12,44	0,85	
2086		29,66	20,54	9,12	1,14	
2087		34,15	23,69	10,46	1,16	
2088		33,89	22,67	11,22	1,03	

#### **9.4- Justificación de resultados de análisis de suelo obtenidos en el laboratorio del *CIA***



9 de octubre del 2008  
CIA-531-2008

Señor  
Harold Blanco Rojas, Estudiante  
Universidad Estatal a Distancia (UNED)  
S.O.

Estimado señor:

Según su nota del pasado 7 de octubre del 2008, en la cual solicita aclarar por parte del Laboratorio de Recursos Naturales, las posibles causas de los resultados emitidos en la solicitud 26042 del 14 de enero del 2008, así como referencias bibliográficas que los respalden, me permito ofrecer una respuesta técnica de los resultados:


1. Es oportuno recordarle que el período para hacer aclaraciones sobre los resultados de los análisis desarrollados en el Centro de Investigaciones Agronómicas es de un mes, mismo período en que las muestras permanecen en custodia, justamente para repetir los análisis solicitados, en caso de ser necesario.
2. Como se indica en la solicitud de análisis 26042 (CIA-SC03-R01), las muestras de suelos provienen de alrededores de Ciudad Quesada. Posiblemente, las muestras fueron colectadas en sitios donde dominan suelos derivados de ceniza volcánica, clasificados como andisoles (SSS 1999).
3. Los valores de densidad aparente obtenidos ( $0.3-0.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) son totalmente congruentes para suelos de origen volcánico, los cuales son poco densos por: (i) poseer minerales amorfos o alofanas del tamaño de arcillas ( $<0.002 \text{ mm}$ ), (ii) poseer altos contenidos de materia orgánica (MO) y (iii) un amplio espacio poroso (Alvarado y Forsythe 2005).

../..

4. Los suelos con altos contenidos de MO y minerales amorfos, pueden presentar un comportamiento físico conocido como pseudoagregación o formación de pseudoagregados, normalmente del tamaño de las arenas (0.05 - 2.00 mm), cuando se secan al aire o en horno. Como resultado de esta propiedad, el análisis del tamaño de partículas por el método de Bouyoucos puede sobreestimar la cantidad de arenas presentes en la muestra (Gee y Bauder 1986, Alvarado *et al.* 2001).

Esperando que esta misiva sea de su utilidad, se despide atentamente,

  
M.Sc. Rafael Mata Chinchilla  
Coordinador  
Laboratorio de Recursos Naturales



**Referencias citadas:**

- Alvarado A., Bertsch F., Bornemisza E., Cabalceta G., Forsythe W., Henríquez C., Mata R.A., Molina E., Salas R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo y Centro de Investigaciones Agronómicas/Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 111 p.
- Alvarado, A.; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1):85-94.
- Gee, G.W.; Bauder J.W. Particle-size analysis. *In* A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, 2.ed. ASA-SSSA, Madison, EEUU. p. 383-411.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2 ed. USDA-NRCS, EEUU. 871 p.

cc: M.Sc. Jorge Leiva Sanabria, Laboratorio de Recursos Naturales