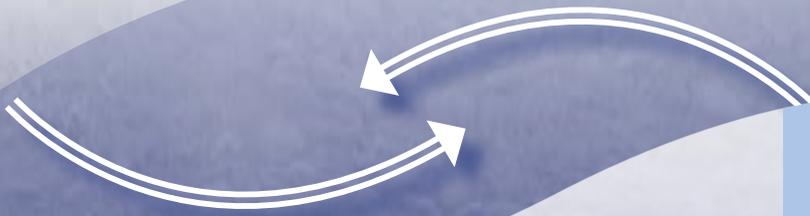


Evaluación hidrológica de las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo

Guatemala



Compensación Equitativa
por Servicios Hidrológicos

Oscar Ávalos
Juan Carlos Rosito

Contenido

Resumen Ejecutivo	5
Introducción	8
Objetivos	9
<i>Objetivo general</i>	9
<i>Objetivos específicos</i>	9
Marco Conceptual y Referencial	10
<i>Marco conceptual: la hidrología, sus ramas y ciencias afines</i>	10
<i>La cuenca hidrográfica</i>	12
<i>Recarga hídrica</i>	12
<i>Acuíferos</i>	13
<i>Zona de recarga natural</i>	14
<i>Descarga natural</i>	14
<i>Manantiales</i>	14
<i>El bosque y el agua</i>	15
<i>Papel del bosque nuboso del área núcleo de la Sierra de las Minas respecto al uso del suelo y a la captación de agua</i>	17
<i>Marco referencial</i>	17
<i>Ubicación</i>	18
<i>Extensión</i>	18
<i>Altitud</i>	19
<i>Acceso</i>	19
<i>Zonificación de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas y su relación con las subcuencas de trabajo</i>	20
<i>Geología</i>	22
<i>Suelos</i>	25
<i>Clima</i>	29
<i>Zonas de vida</i>	32
<i>Cobertura vegetal y uso de la tierra, 1999</i>	35
<i>Uso de la tierra en el 2003</i>	37
<i>Hidrología</i>	40

Producido por:

Programa de Comunicaciones
WWF Centroamérica
2007

Edición filológica:

Liliana Ureña
fagonza@racsa.co.cr

Edición técnica

y supervisión de diseño gráfico:

Virginia Reyes
Oficial del Programa de Agua Dulce
WWF Centroamérica
vreyes@wwfca.org

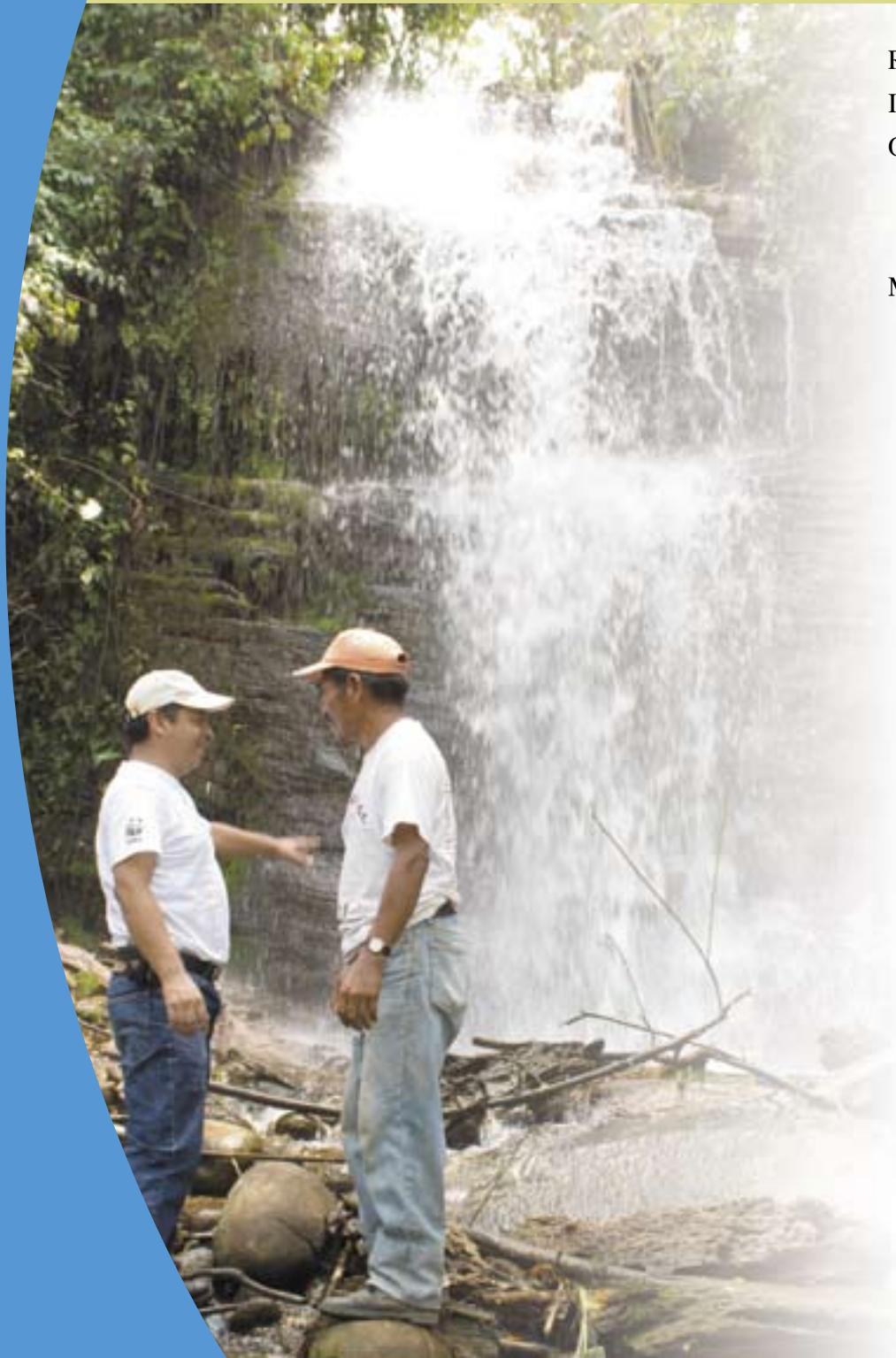
Miguel Martínez
Programa de Agua Dulce,
WWF Centroamérica
mmartinez@wwfca.org

Diseño y diagramación:

Priscila Coto
priscilacoto@gmail.com

Fotografías:

© Claudio VÁSQUEZ BIANCHI
© Peter ROCKSTROH



Consideraciones Metodológicas	43
<i>Metodología</i>	43
<i>Definición y análisis de la naturaleza, origen y dimensión de la problemática hídrica (cantidad y calidad) de la cuenca y su relación con el uso del suelo de las comunidades de la parte alta</i>	44
<i>Definición del impacto del problema hídrico en los usuarios de agua en la parte baja</i>	45
<i>Selección de áreas críticas del problema</i>	45
<i>Definición y descripción de la problemática</i>	45
Resultados y Discusión	46
<i>Oferta hídrica, aspectos cuantitativos</i>	46
<i>Oferta hídrica, aspectos cualitativos</i>	73
<i>Definición de comunidades demandantes con condiciones para implementar trabajo de desarrollo y conservación de suelos</i> ..	85
<i>Definición de tierras forestales de captación y regulación hidrológica</i>	86
<i>Definición de la problemática asociada a los recursos hídricos en las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo</i>	90
Conclusiones y Recomendaciones	93
<i>Aspectos cuantitativos</i>	93
<i>Aspectos cualitativos</i>	94
<i>Usuarios</i>	95
<i>Áreas críticas</i>	96
<i>Estrategias generales</i>	96
Bibliografía	98
Anexos	102
<i>Propuesta general de agenda de investigación y monitoreo de información hidrológica en las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo, Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas</i>	102
<i>Metodología para la estimación de erosión y sedimentación</i>	105

Resumen Ejecutivo

El presente trabajo fue realizado para WWF y CARE-Guatemala, en el marco del proyecto “Compensación Equitativa por Servicios Hidrológicos: Preparando el Caso de Negocios”, bajo el financiamiento de los gobiernos de Holanda y Dinamarca.

El estudio tiene el objetivo principal de definir y evaluar la problemática asociada a los recursos hídricos en las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo, ubicadas en el sistema de cuencas Motagua-Polochic, en Guatemala. De acuerdo con la información generada y recopilada, este estudio se constituye en punto de partida para la implementación de políticas y acciones de fomento social y conservación en estos sitios.

La metodología empleada fue la siguiente: inicialmente se recopiló información de fuentes secundarias. Posteriormente se generó información de campo y gabinete, utilizando como enfoque de trabajo la evaluación y análisis de la oferta, tanto sus aspectos cuantitativos (estimación de la recarga hídrica) como cualitativos (calidad química y física, erosión y sedimentación). A continuación se desarrollaron modelos de acuerdo con escenarios históricos de deforestación (principal cambio de uso del suelo en el área de estudio). Finalmente se organizó la información, de tal manera que evidenciara la problemática relacionada con los recursos hídricos y permitiera definir áreas críticas para la intervención de un proyecto de implementación de pagos equitativos por servicios hídricos.

Uno de los aportes más importantes de este estudio es reunir y generar información pertinente para evaluar y describir la alarmante situación de los recursos hídricos. A pesar de que esta problemática es considerada prioritaria y crítica por los actores relacionados con la administración y aprovechamiento de dichos recursos, hasta hoy no había sido abordada adecuadamente. El problema se puede describir de la siguiente manera: “Los recursos hídricos y recursos naturales renovables asociados son manejados insosteniblemente, llegando a niveles severos de degradación cualitativa de los recursos hídricos superficiales.”

La problemática de los recursos hídricos en el área de estudio está vinculada principalmente a aspectos cualitativos, especialmente a la erosión

laminar de suelos en la parte media de ambas cuencas y la consecuente sedimentación en las partes media y baja de estas. Los aspectos cuantitativos generalmente no son percibidos como un problema importante por parte de los usuarios. A continuación se presentan en forma sintética las principales evidencias que apoyan el planteamiento de esta problemática.

Desde el punto de vista cuantitativo ambas cuencas presentan, principalmente, alta y muy alta recarga hídrica anual (bruta): Pasabién recarga 90.4 millones m³/año y la cuenca de Pueblo Viejo recarga 334.71 millones m³/año. Para dimensionar este volumen de agua “producida”, sin contar con un caudal ecológico, se puede decir que la subcuenca Pasabién podría abastecer anualmente a más de 800,000 personas y el río Pueblo Viejo más de 2.5 millones de personas.

Las áreas de mayor recarga (producción) hídrica se encuentran en las microcuencas ubicadas en las partes altas (zona núcleo). Asimismo, las áreas que aportan mayor cantidad de escorrentía se encuentran en la parte media, es decir en la región que cuenta con mayor densidad poblacional.

El comportamiento de caudales a lo largo del año muestra una distribución muy diferenciada entre la estación lluviosa y la estación seca. Este dato es especialmente notorio en la cuenca Pasabién, donde más del 90 % de la escorrentía superficial se distribuye de junio a octubre. Es decir, a pesar de que la cuenca presenta una alta “producción” hídrica su distribución es contrastante entre estación seca y la lluviosa. En la cuenca Pueblo Viejo este problema no es severo.

La calidad del agua “producida” por las subcuencas bajo estudio, en la parte media y alta, puede considerarse adecuada para su utilización en agricultura e industria. Sin embargo, con la información oficial disponible se estimó que el aporte de sedimentos en las partes medias y bajas de las subcuencas es crítico. El aporte de erosión laminar en las subcuencas de Pasabién y Pueblo Viejo se calcula de 236,000 y 586,000 TM/año y corresponde a 23.5 y 38.7 TM/ha/año, respectivamente. Esta erosión puede catalogarse como alta ya que algunos expertos consideran “aceptable”, para sitios con agricultura, una erosión entre 4 y 12 TM/ha/año.

En la subcuenca Pasabién el 5.5 % de la superficie total (550 hectáreas), ubicado en la parte media de la cuenca, aporta el 23.3 % de erosión. En Pueblo Viejo el 32% de la superficie total de la subcuenca (4,700 hectáreas) aporta el 84 % de la erosión. Las áreas que presentan mayor erosión están ubicadas en la parte media.

En la subcuenca de Pueblo Viejo la parte media de la cuenca presenta gran erosión, probablemente debido al régimen climático, encontrando una gran proporción de su territorio con una erosión entre 100 TM/ha (erosión severa) y mayor 150 TM/ha (muy severa).

Además se diseñó un modelo con el que se evaluó el incremento de la erosión laminar debida a la deforestación, que es considerada el principal y más impactante cambio de uso del suelo en la región. En este sentido se estimó una deforestación de 900 y 600 para las subcuencas de Pasabién y Pueblo Viejo, respectivamente, durante el período 1991 – 2003. Esta deforestación incidió en una tasa de incremento anual de erosión de 1,645 y 3,750 TM/año, respectivamente. Para la cuenca de Pueblo Viejo cada hectárea de deforestación significa un aporte adicional (en la parte baja de la cuenca) de aproximadamente 8 m³ de sedimento al año.

En cuanto a los usuarios de recursos hídricos (generadores de energía eléctrica en Pasabién y agroindustria en Pueblo Viejo) se encuentra que el mayor problema es el manejo de sedimentos.

En la subcuenca de Pueblo Viejo los administradores de las plantaciones de caña del Ingenio Guadalupe manifestaron enfrentar serios problemas con los sedimentos que provocan inundaciones. Asimismo, los administradores de la hidroeléctrica ubicada en la parte media de la subcuenca de Pasabién manifestaron serios problemas con el manejo de sedimentos que azolvan una presa.

Es importante resaltar que, en términos generales, la población local considera que su abastecimiento hídrico es aceptable, en cantidad y calidad.

Por lo anterior, y considerando la zonificación correspondiente de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, RBSM, se definieron áreas críticas y las estrategias para revertir la problemática asociada a los recursos hídricos, tal como se presenta a continuación: a) disminuir la deforestación y el avance de la frontera agrícola e implementar prácticas de conservación de suelos en áreas de uso no forestal en la parte media de cuencas, con énfasis en las zonas de usos múltiples y de amortiguamiento de la subcuenca de Pueblo Viejo, b) protección de las masas boscosas ubicadas en las partes altas de ambas subcuencas (zona núcleo). Además, se considera imperativo estudiar y monitorear, de manera continua y en el mediano y largo plazo, los recursos hídricos y recursos naturales asociados, con el fin de respaldar y evaluar adecuadamente acciones de fomento y ordenamiento de los recursos naturales renovables para estas cuencas y la región.

Introducción

El agua es un elemento básico para la vida en la tierra, además, juega un papel fundamental en casi todas las actividades de la humanidad y es uno de los recursos que más conflictos de uso genera. Por ello es necesario aprender a manejar adecuadamente este recurso, de tal manera que su gestión pueda constituirse en hilo conductor para el desarrollo sostenible de nuestra sociedad o al menos para reducir los desequilibrios entre la sociedad y su medio.

Se presenta aquí el estudio de “Definición y Evaluación de la Problemática Relacionada con los Recursos Hídricos en las Subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo del Sistema Motagua - Polochic”. Esta investigación fue realizada para WWF y CARE-Guatemala, en el marco del proyecto “Compensación Equitativa por Servicios Hidrológicos: Preparando el Caso de Negocios”, financiado por los gobiernos de Holanda y Dinamarca.

Este documento contiene el marco conceptual, fruto de la revisión general de literatura básica para abordar la problemática en estudio, además ofrece el marco referencial del trabajo. Se abordan los resultados y la discusión sobre ellos y finalmente, se brindan las conclusiones y recomendaciones. Está realizado de tal manera que pueda comprenderse lógicamente y fácilmente la realidad actual de los recursos hídricos, sus causas y efectos tanto local como regionalmente. Asimismo, su análisis está fundamentado en una base técnica y conceptual, por lo que puede utilizarse como referencia teórica y didáctica para abordar la gestión de los recursos hídricos.

Uno de los aportes más importantes de este estudio es reunir y generar información pertinente para evidenciar y describir la alarmante problemática de los recursos hídricos de las subcuencas bajo estudio, que a pesar de ser considerada prioritaria y crítica por los actores relacionados con la administración y los usuarios de los recursos hídricos, no ha sido abordada adecuadamente.

A partir de lo encontrado, este documento propone como aspecto fundamental la creación de un sistema de generación de información y monitoreo, que retroalimente los procesos de toma de decisiones para revertir el estado de degradación cualitativa y cuantitativa de los recursos hídricos

de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, RBSM, asimismo plantea los temas prioritarios por abordar en el corto y mediano plazo. Es importante resaltar que existen capacidades e interés en diversas entidades, administrativas, autoridades locales y académicas, que resultan importantes para la generación de información y consecuente resolución de conflictos en torno a dichos recursos.

Objetivos

Objetivo general

Definir y evaluar la problemática relacionada con la calidad, cantidad y regulación de los recursos hídricos en las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo en la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas.

Objetivos específicos

- Definir la naturaleza, origen y dimensión de la problemática hídrica (cantidad y calidad) de las subcuencas.
- Evaluar el impacto del problema hídrico en los usuarios de agua en la parte baja.
- Definir la relación entre la problemática hídrica y el uso del suelo de las comunidades de la parte alta de la cuenca.
- Seleccionar las áreas críticas (comunidades) del problema.



Marco Conceptual y Referencial

Marco conceptual: la hidrología, sus ramas y ciencias afines

De acuerdo al U.S. Federal Council for Science and Technology, la Hidrología es la ciencia que versa sobre el agua de la tierra, su existencia, incidencia, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas, así como su influencia en el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos (Linsley, 1998).

En este sentido el término de “ciclo hidrológico” es un punto útil, aunque académico, desde el cual comienza el estudio de la Hidrología. El ciclo hidrológico se define como un complejo sistema de circulación continua, a gran escala, que asegura el bombeo, destilación y transporte del agua en todas sus formas (Linsley, 1998 y Martínez, Navarro y Heva, 1998).

El ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua de los océanos. El vapor de agua resultante es transportado por masas móviles de aire. Bajo condiciones adecuadas, el vapor de agua se condensa para formar nubes, que a su vez, pueden transformarse en precipitación. Esta precipitación se dispersa en la tierra de diversas maneras: la mayor parte de ésta es retenida temporalmente en el suelo y regresa eventualmente a la atmósfera por evaporación o transpiración de las plantas. Otra porción del agua que se precipita viaja sobre la superficie del suelo hasta alcanzar drenajes naturales de las corrientes. El agua restante penetra más profundamente en el suelo y se convierte en agua subterránea. Bajo influencia de la gravedad, tanto la escorrentía superficial como el agua subterránea se mueven cada vez hacia zonas más bajas y con el tiempo pueden incorporarse nuevamente a los océanos (Figura 1. El ciclo hidrológico).

Del estudio de cada una de las diferentes fases del ciclo hidrológico, objeto de la Hidrología General, se derivan algunas ciencias específicas, tales como: la Hidrogeología o la Hidrología Subterránea, cuando se estudia el comportamiento del agua en el suelo o subsuelo, la Hidrología Superficial que se centra en los fenómenos acaecidos en la superficie de las tierras emergidas, y la Hidrología Forestal que trata las relaciones entre el agua,

el suelo, la morfología del territorio y la vegetación, dentro de una unidad de estudio denominada cuenca o vertiente, resaltando el papel de la cubierta vegetal y especialmente del bosque, como reguladores de los procesos que se producen en dicha unidad. En este contexto la Hidrología Forestal se ocupa del comportamiento del ciclo hidrológico bajo el ámbito de los ecosistemas forestales, así como de la dinámica dentro de estos, producida por su manipulación (Linsley 1998 Martínez, Navarro y Heva, 1997).

La Hidrología Forestal que se ubica principalmente dentro de la Hidrología Superficial está muy relacionada con la Hidrología Subterránea y se complementa directamente con otras ciencias como: la Meteorología y la Climatología, sobre todo en los aspectos que afectan el balance entre precipitación y evapotranspiración de una región. También se vincula a la Edafología y la Geología, en lo que respecta a los procesos de infiltración, percolación, escorrentía superficial, etc., así como con la Botánica, Fisiología, Ecología Vegetal, la Silvicultura y el ordenamiento de cuencas (Linsley, 1998 y Martínez, Navarro y Heva 1997).



Figura 1. El ciclo hidrológico.¹

Las fases principales del ciclo hidrológico son:

- Evaporación del suelo, plantas y océanos.
- Formación y desplazamientos de nubes y niebla.

¹ Tomado de http://www.ciencia.nasa.gov/headlines/y2002/01march_water.htm

- Condensación del agua y precipitación en forma de lluvia, nieve, granizo, etc.
- Escorrentía superficial, sobre el suelo.
- Infiltración, en el perfil del suelo.
- Percolación a estratos más profundos.
- Flujo subterráneo y retorno a la superficie (manantiales y pozos).
- Formación de corrientes superficiales, como ríos y arroyos.
- Descarga en lagos, océanos y mares.
- Evaporación.... y repetición del ciclo.

La cuenca hidrográfica

Se denomina cuenca o vertiente una zona de la superficie terrestre de la cual el agua procedente de la precipitación caída sobre ella se dirige hacia un mismo punto de salida. (Martínez, Navarro y Heva 1997).

Es un territorio en el que las aguas escurren a través de una red de cauces y confluyen en un mismo punto (lago, corriente, acuífero), formando una unidad autónoma o diferenciada de otras. Es una zona conformada como una unidad, física, natural, básica de la regulación del agua, donde la lluvia es captada y desalojada o depositada en un almacenamiento natural por un sistema de drenaje definido por la topografía, que inicia en la parte alta. En ella es posible articular procesos de gestión que permiten alcanzar el desarrollo sustentable.

La cuenca es una zona delimitada topográficamente que desagüa mediante un sistema fluvial, en el cual, la superficie total de tierras vierte sus aguas en un punto de una corriente o río. Constituye una unidad hidrológica que se describe como unidad físico-biológica y como unidad socio-política para la planificación y ordenación de los recursos naturales (FAO, 1992).

Recarga hídrica

Lerner, define la recarga hídrica como el proceso donde el flujo de agua desciende en el suelo, hasta alcanzar el nivel freático, incrementando el agua almacenada. Es decir, es el volumen de agua que entra en un embal-

se subterráneo durante un período de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua. Es equivalente a la infiltración eficaz y puede ser directa (infiltración de lluvia) y lateral (aporte de otras áreas o cuencas) (Custodio & Llamas, 2001).

La recarga puede ser natural cuando se produce por infiltración de la precipitación pluvial o de un curso de agua (ríos y lagos), o inducida debido a las actividades del hombre, como riego y urbanización.

Se divide según el tipo de estimación en: recarga actual, que es el volumen de agua que alcanza el nivel freático, y recarga potencial, que es el volumen de agua que puede ir a diferentes destinos por evapotranspiración, cambio de humedad en la zona saturada del suelo, descarga a cursos de agua y alcance de reservorios de agua subterránea.

La capacidad de infiltración de los suelos desempeña un papel fundamental en los procesos de regulación y escorrentía, como respuesta a una precipitación dada en una cuenca. Lluvias de iguales intensidades pueden producir caudales diferentes. La capacidad de infiltración es también muy importante en el estudio de la recarga de acuíferos.

Existen muchos factores que controlan la infiltración en un área determinada, por lo que su estimación confiable es bastante difícil y es imposible obtener una relación única entre todos los parámetros que la condicionan.

Los principales factores que afectan la infiltración en una cuenca son: las características físicas del suelo que incluyen textura, estructura y condición del suelo (compactación y contenido de humedad), los suelos con texturas gruesas, poco grado de estructuración y compactación y con un bajo contenido de humedad (con mayor capacidad de infiltración que otros suelos), la vegetación, las características de la lluvia, la pendiente del terreno, la estratificación, la temperatura del agua y el suelo y el estado físico-químico de las tierras (Custodio & Llamas, 2001).

Acuíferos

Según Custodio y Llamas, el manto acuífero es la capa o formación geológica donde el agua circula y se almacena. Puede ser utilizada por las personas en cantidades económicamente significativas (Custodio & Llamas, 2001). Lesser agrega que esta agua, en la mayoría de casos, sólo puede ser aprovechada a través de pozos. De acuerdo con Herrera, los diferentes acuíferos conocidos se dividen de la manera siguiente:

- Por el tipo de flujo en: acuíferos en medios porosos (flujo en medios porosos) y acuíferos en medios fracturados o consolidados (flujo fisural).
- Por la presión del agua y las relaciones de conductividad hidráulica del acuífero (capa sobreyacente) en: acuíferos libres o freáticos (sin capa confinante sobreyacente), acuíferos semilibres (se presentan capas o lentes confinantes en algunas partes), acuíferos semiconfinados (con un acuitardo como capa sobreyacente), y acuíferos confinados (con dos capas confinantes, superior e inferior).
- Según la extensión y continuidad de saturación en: acuíferos colgados y acuíferos regionales o principales. (Herrera, 1995).

Zona de recarga natural

De acuerdo a Lesser, estas son áreas ubicadas en topografías elevadas y en suelos permeables, que facilitan la infiltración y descenso del agua hacia los reservorios de agua subterránea (acuíferos). Esta infiltración puede producirse no sólo por las aguas de lluvia, sino también por las que circulan a través de los arroyos o corrientes. (Lesser, 1994).

Descarga natural

Según Custodio & Llamas, es el volumen de agua que en un determinado tiempo sale de la zona de almacenamiento a través de los manantiales, cuando la zona saturada queda cerca de la superficie terrestre (Custodio & Llamas, 2001).

Lesser (citado por Custodio & Llamas, 2001), indica que la descarga natural de los acuíferos, además de realizarse por los manantiales, se efectúa por las corrientes del río (efluente). (Lesser, 1994).

Manantiales

Vargas (Citado por Custodio y Llamas, 2001), sostiene que el manantial es una fuente natural de agua, que surge a la superficie cuando el nivel de saturación corta la topografía. Los manantiales son los desagües o aliviaderos por los cuales sale la infiltración o recarga que reciben las zonas de almacenamiento de agua y representan, al no utilizar bombeo, ahorro de energía y recursos económicos. (Custodio & Llamas, 2001).

El bosque y el agua

El microclima que crea el bosque con relación al suelo es menos luminoso, con una reducción de la luminosidad de hasta un 90%; es menos caluroso, con disminución de unos 4°C en la temperatura media anual; menos ventoso, con un decrecimiento de la velocidad del viento de hasta a la cuarta parte; más húmedo, con un aumento en el orden del 10%. Este microclima hace que algunos factores ecológicos no actúen como limitantes y en consecuencia, propicia la infiltración de agua en el suelo.

Para conocer el impacto del bosque en la captación y regulación hidrológica es recomendable analizar el balance hidrológico de la cuenca.

El balance hidrológico de una cuenca en un tiempo determinado está dado por el principio de conservación de masa o ecuación de continuidad:

$$\text{Entrada} - \text{salida} = ds/dt \text{ (velocidad de almacenamiento)}$$

En un período largo el tiempo ds tiende a cero, por lo tanto, entradas = salidas, es decir:

$$P \text{ (precipitación)} = I \text{ (infiltración)} + E \text{ (escorrentía)} + ET \text{ (evapotranspiración)}$$

En cuanto a la precipitación el ecosistema boscoso puede llegar a influir en el origen de esta, pues causa interceptación (y posterior evaporación) de la lluvia antes de llegar al suelo. Al bosque se le atribuyen funciones de importante captación, en algunos ecosistemas, de las denominadas precipitaciones ocultas, de rocío, escarcha y precipitaciones horizontales.

Asimismo, se ha evidenciado que el bosque influye en la infiltración del agua en el suelo, aumentándola, y otorga a la tierra una mayor permeabilidad, especialmente por modificar las propiedades físicas de la parte superficial.

El papel fundamental que desempeñan los bosques sobre la escorrentía es el de modificar su forma en el agua superficial y disminuir la cantidad de esta que accede a los cauces, disminuyendo drásticamente las aportaciones superficiales y aumentando las subterráneas. Este es el aporte más importante de un bosque a la producción hídrica de una cuenca dada y sobre todo, es más evidente e importante en aquellas áreas de aptitud forestal, es decir, que presenten altas pendientes, poca profundidad, o en general, alta susceptibilidad a la erosión química o física.

De acuerdo con muchas referencias la evapotranspiración constituye una de las principales salidas de agua del sistema. En nuestro medio se estima que alcanza de un 40 a un 60 % de las precipitaciones totales anuales. En este sentido el bosque se convierte en el mayor consumidor de agua en el ecosistema.

Finalmente, se destaca la importancia del bosque sobre la calidad del agua que genera, la cual está definida por sus características químicas, físicas y biológicas. Con la presencia de un ecosistema forestal natural, se puede prever la virtual inexistencia de sedimentos y materiales biológicos dañinos para las personas o el ecosistema. Asimismo, el bosque contribuye a mantener un equilibrio químico, bajas temperaturas y altos contenidos de oxígeno. En este sentido se puede concluir que es muy importante su papel para proporcionar alta calidad de los recursos hídricos en la cuenca (Custodio & Llamas, 2001).

$$P_t = E_i + E_l + TF_t + SF_t$$

Precipitación total P_t (mm)

Intercepción del dosel E_i (mm)

Lluvia directa TF (mm)

Escorrentía de tallos SF (mm)

Intercepción de la hojarasca E_l (mm)

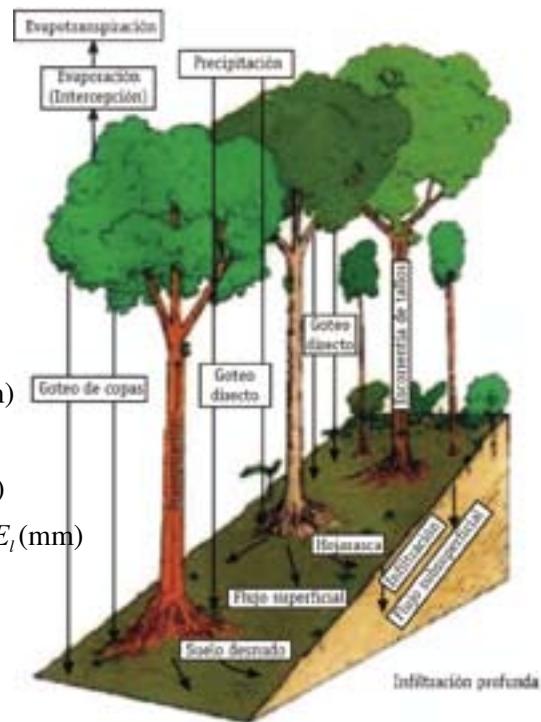


Figura 2. Hidrología forestal (tomado de Bruijnzeel, 1990).

Papel del bosque nuboso del área núcleo de la Sierra de las Minas respecto al uso del suelo y a la captación de agua

Recientemente, datos emanados de estudios científicos (Brown, 1996, Holder 2003, Bruijnzeel, 2000), realizados en el bosque nuboso de la Sierra de las Minas, han despertado interés científico. Esto podría tener repercusiones de tipo práctico para las comunidades y para la gestión del bosque nuboso de esta región, es decir del que se encuentra en la parte alta de las subcuencas bajo estudio.

Estos datos resaltan la capacidad del bosque nuboso de algunos sitios de la Sierra de las Minas ya que es el único caso citado en el mundo, en el que el bosque nuboso capta más agua de la neblina que de la precipitación bruta. En estación seca, el bosque nuboso montano tropical (TMCF) excede en 147 mm (181%) la precipitación pluvial (Brown, et al, 1996, Bruijnzeel 2000).

Marco referencial

En el marco de referencia se realiza la delimitación y ubicación de las dos subcuencas que conforman el área de trabajo así como su extensión y relieve, entre otros asuntos físicos.



Figura 3. Panorámica de subcuenca Pasabién (de la parte alta a la parte media).

Ubicación

La subcuenca Pasabién se ubica parcialmente en los departamentos de Zacapa y Alta Verapaz, su posición geográfica en la parte alta es LAT N 15.15° y LON O 89.76° y en la parte baja es LAT N 15.01° y LON O 89.64°. Hacia la parte alta y con ubicación norte colinda con la subcuenca Pueblo Viejo.

La subcuenca Pueblo Viejo está ubicada en los municipios de Panzós y La Tinta del departamento de Alta Verapaz, su posición geográfica en la parte alta es LAT N 15.14° y LON O 89.80° y en la parte baja es LAT N 15.34° y LON O 89.67°.

Extensión

De acuerdo con la delimitación generada por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Fundación Defensores de la Naturaleza, la subcuenca Pasabién ocupa una superficie de 10,084.683 hectáreas, incluye los municipios de Río Hondo 9,358.586 ha (92.8%) y Teculután 443.726 ha, (04.4 %) del departamento de Zacapa y el municipio de Panzós 282.371 ha (02.8%) del departamento de Alta Verapaz (ver mapa 1).



Figura 4. Panorámica de subcuenca Pueblo Viejo (Parte baja).

La subcuenca Pueblo Viejo tiene una extensión de 14,878.677 hectáreas, comprende los municipios de Santa Catalina La Tinta (20.3%) y Panzós (79.7%) del departamento de Alta Verapaz (ver mapa 2).

Altitud

La altitud de la subcuenca Pasabién va de los 180 msnm, donde se une al río Motagua y hasta los 2,987 msnm en su parte más alta. Es importante mencionar que el embalse de la hidroeléctrica se encuentra ubicado a una altura de 800 msnm. Además, colinda al norte con la subcuenca Pueblo Viejo.

La subcuenca Pueblo Viejo va de los 20 msnm, donde se une al río Polochic, hasta los 2,987 msnm en su parte más alta. Esta colinda al sur con la subcuenca Pasabién.

Acceso

Para llegar a la subcuenca Pasabién, se conduce desde la Ciudad Capital hasta la aldea Santa Cruz del municipio de Río Hondo, Zacapa. Inicialmente se recorren 125 Km. por asfalto, luego para acceder a la subcuenca se tienen dos caminos: el primero lleva a una altitud mayor de la subcuenca, es de terracería y su longitud es de ocho kilómetros (tiempo del recorrido 1.5 horas). Se llega hasta la finca San Lorenzo, propiedad de GuateMarmol y posteriormente se recorren cinco kilómetros por un camino ubicado en la zona núcleo de la reserva; el otro acceso es de terracería accesible todo el año con vehículo de doble tracción, allí se encuentra el embalse de la hidroeléctrica Inversiones Pasabién, en la aldea Santa Rosalía. Esta carretera se une al camino que se dirige a la finca San Lorenzo.

La subcuenca Pueblo Viejo es más lejana y su acceso es más difícil. Desde la Ciudad Capital, hasta el lugar conocido como San Julián, del municipio de Tactic, Alta Verapaz, se recorren 181 Km. por asfalto, posteriormente se transitan 70 Km. por la ruta del Polochic (terracería transitable todo el año) hasta la aldea Telemán del municipio de Panzós. A partir de ahí, para acceder a la subcuenca existen tres caminos de terracería transitables sólo en verano con vehículo de doble tracción. El camino principal, de aproximadamente 22Km, atraviesa primero el río Polochic, luego el río Pueblo Viejo, llega hasta la empresa Campesina Agrícola y después a la comunidad Camcoy, en tiempo estimado de 1.5 horas. Los otros accesos conducen a la comunidad San Vicente o a la de Chajonjá, aproximadamente a una distancia de 18 km.

Zonificación de la Reserva
de la Biosfera Sierra de las Minas
y su relación con las subcuencas de trabajo

La Reserva de Biosfera Sierra de las Minas tiene cuatro categorías de manejo o zonas de uso, la subcuenca Pasabién tiene dos y la subcuenca Pueblo Viejo tiene tres zonas de uso.

A. Zona núcleo:

Los principales objetivos para esta zona son: la preservación del ambiente natural, la conservación de la diversidad biológica, la preservación de las fuentes de agua, así como la investigación científica y el turismo ecológico en las áreas habilitadas para ello, siempre y cuando estas actividades no afecten negativamente los ecosistemas del área. Se presta especial atención a la educación conservacionista.

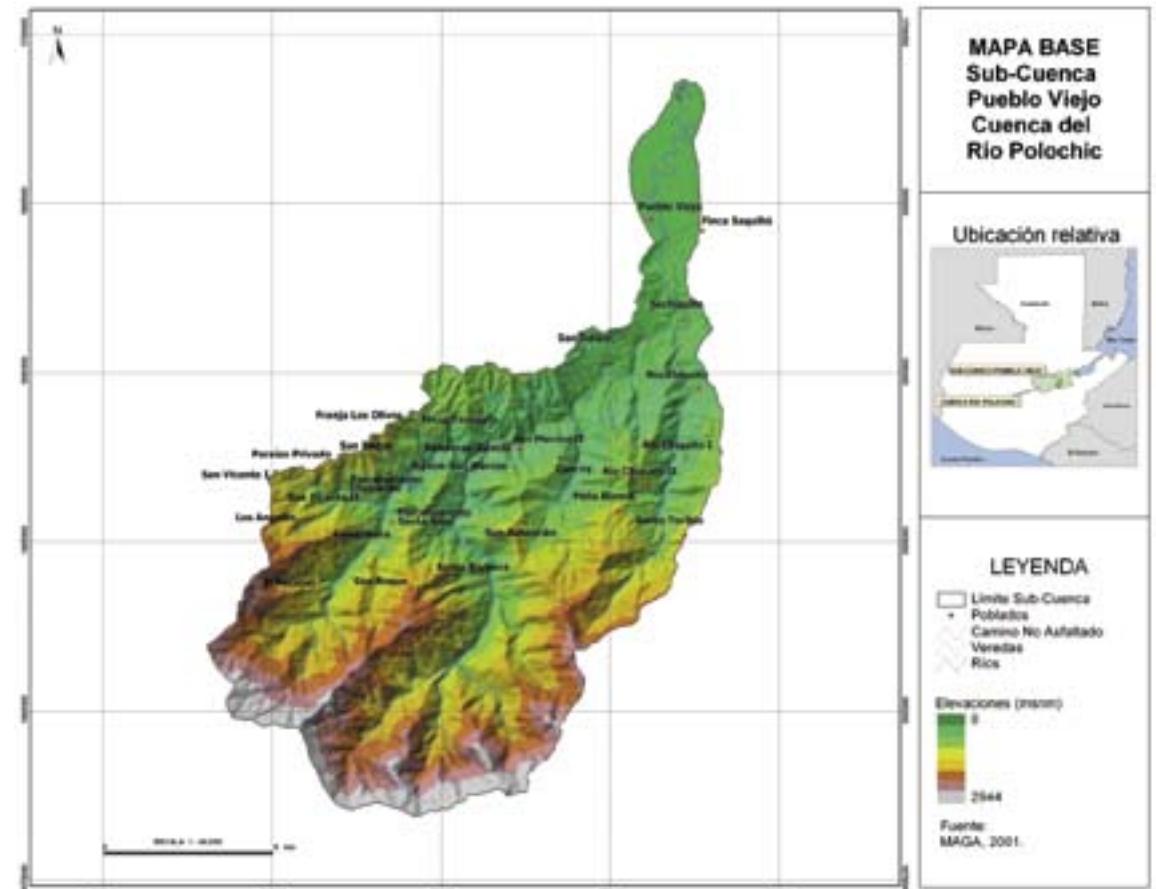
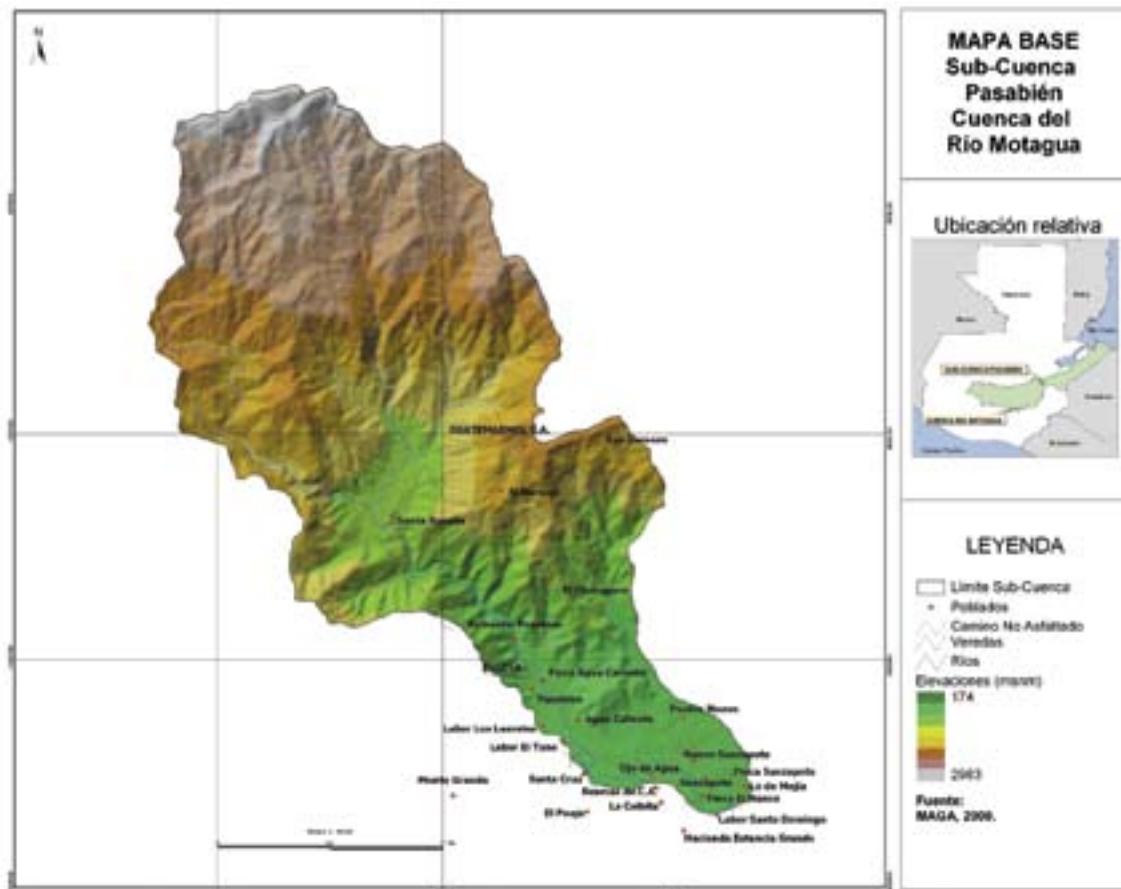


Figura 5. Ubicación general de la subcuenca Pasabién.

Figura 6. Ubicación general de la subcuenca Pueblo Viejo.

En esta área no se permiten los asentamientos humanos, el cambio de uso de la tierra o la extracción de recursos naturales.

La zona núcleo de subcuenca Pasabién tiene una longitud de 5,413.458 hectáreas, que equivalen al 53.68% del área total de la subcuenca, mientras que la de Pueblo Viejo ocupa una superficie de 6,897.755 hectáreas, que corresponden al 46.36% de la extensión total de esta cuenca.

B. Zona de uso sostenido:

Esta zona sólo se encuentra en la subcuenca Pueblo Viejo y su objetivo es el uso sostenible de los recursos naturales, sin afectar negativa y permanentemente sus diversos ecosistemas. Su extensión es de 2,218.411 hectáreas, equivalentes al 14.91% del total de la cuenca.

C. Zona de amortiguamiento:

Esta zona tiene como objetivos primordiales: el amortiguamiento de la zona núcleo, la restauración y el uso sostenible de los recursos naturales, sin afectar negativa y permanentemente sus diversos ecosistemas. El uso y aprovechamiento sostenible de los recursos son la vía para mejorar la calidad de vida de los habitantes. Es fundamental lograr la participación y la educación ambiental de las comunidades en el mantenimiento y mejoría de las condiciones de la reserva y sus recursos.

La zona de amortiguamiento en la subcuenca Pasabién ocupa una extensión de 3,521.571 hectáreas, que corresponden al 34.92% de la totalidad de la cuenca. Esta zona en la subcuenca Pueblo Viejo tiene una extensión de 5,304.248 hectáreas, que corresponden al 35.65% de la totalidad de la cuenca. La superficie restante en cada subcuenca se considera área de influencia de la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas, con una extensión de 1,149.654 hectáreas, equivalente al 11.40% en la subcuenca Pasabién y 458.263 hectáreas de superficie correspondientes al 03.08% en la subcuenca Pueblo Viejo.

Geología

La subcuenca Pasabién tiene dos tipos geológicos: la parte baja presenta aluviones del Cuaternario (Qa) y la parte alta y media de la cuenca tiene rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico (Pzm) (SIG - MAGA 2,001).

La geología de la subcuenca Pueblo Viejo esta definida por cuatro tipos: la parte baja presenta aluviones del Cuaternario (Qa), la parte media está formada por rocas sedimentarias (Carbonífero Pérmico (CPsr) y la parte alta, por rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico (Pzm) y Terciario (I) (SIG - MAGA 2,001).

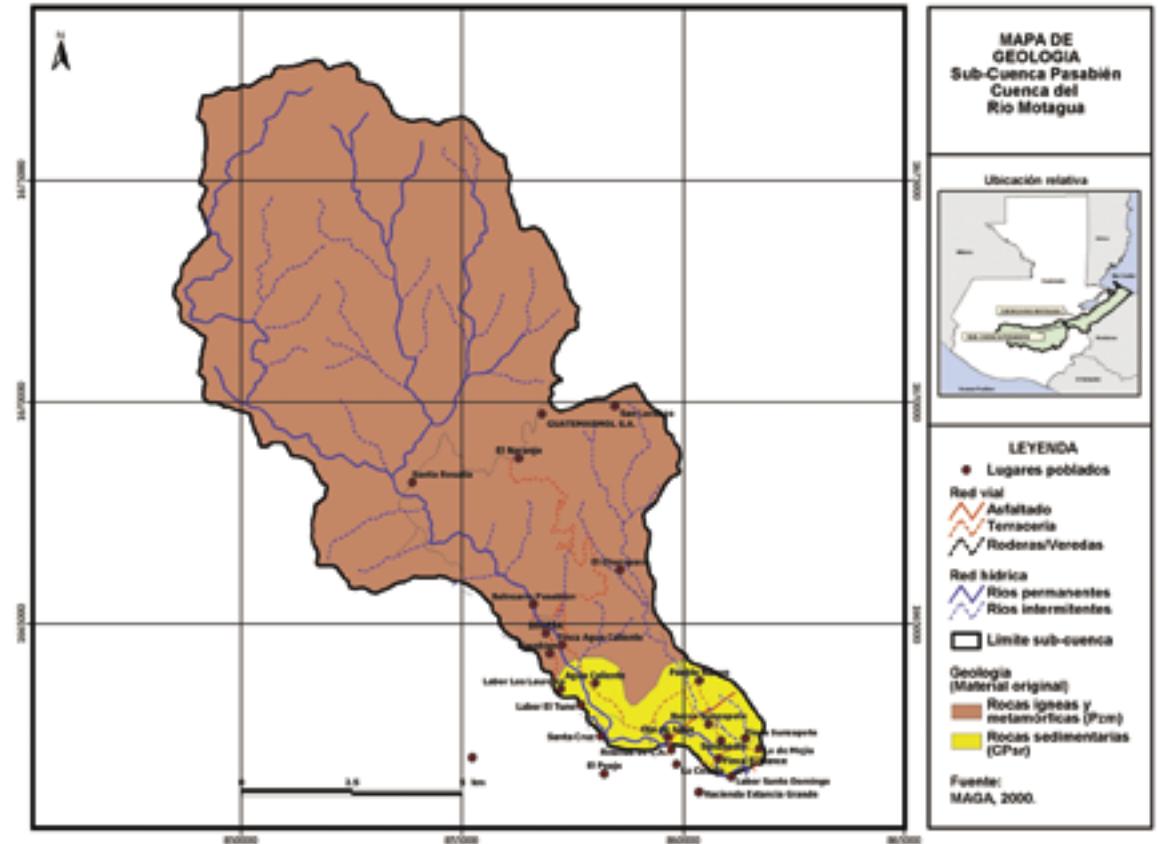


Figura 7. Geología de la subcuenca río Pasabién.

El conocimiento profundo de la geología de las subcuencas estudiadas es muy importante en la determinación de la recarga y regulación hidrológica de la RBSM. En este sentido se puede afirmar que más del 90 % de la superficie de las cuencas está constituido por un material impermeable que no favorece acuíferos profundos, más bien desarrolla acuíferos someros o superficiales, al alcance de las comunidades ubicadas en las partes altas de la cuenca. Las características de baja permeabilidad del suelo

también favorecen los procesos de erosión y la posibilidad de desastres naturales (inundaciones, deslizamientos en masa, derrumbes ocasionados por eventos extremos de precipitación).

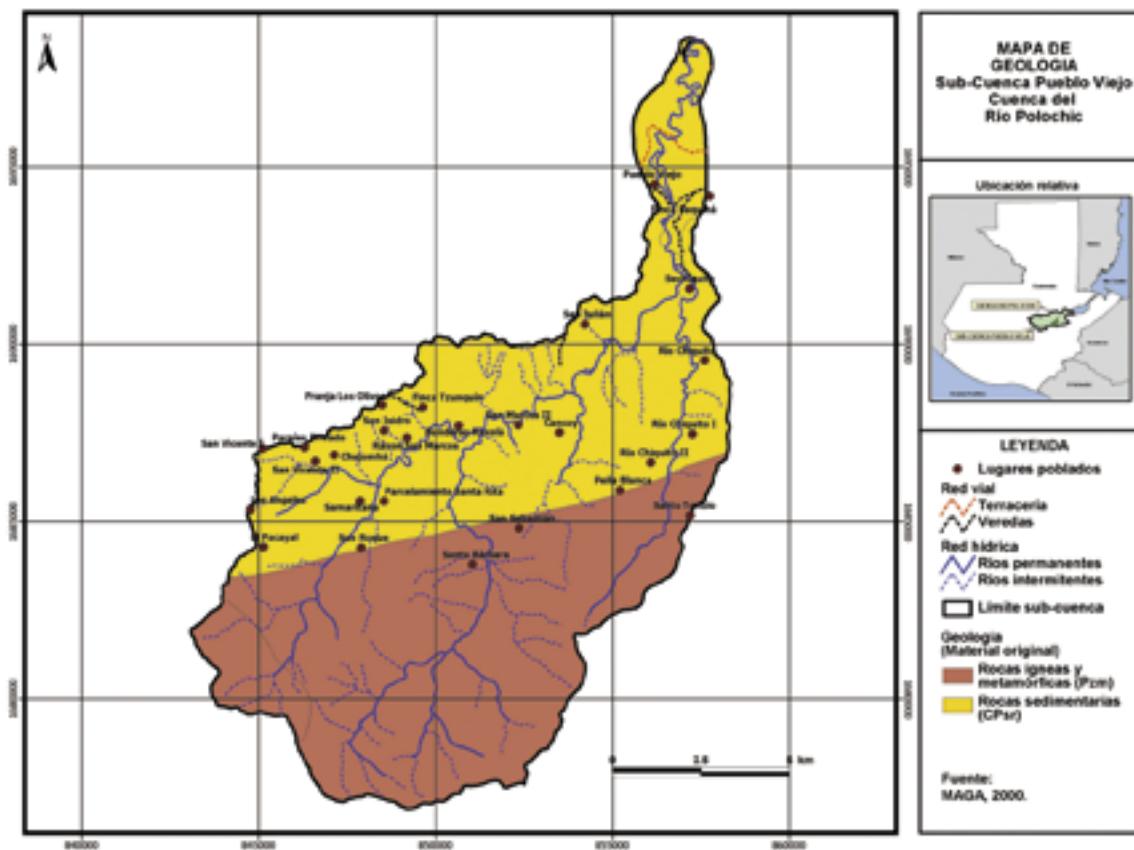


Figura 8. Geología de la subcuenca río Pueblo Viejo.

A. Aluviones del Cuaternario (Qa):

Geología formada por rocas sedimentarias, estos materiales han sido depositados por acción de las aguas de los ríos. En la subcuenca Pasabién los aluviones cuaternarios constituyen un 07.63%, con una extensión de 769.461 hectáreas. En la subcuenca Pueblo Viejo ocupan una superficie de 824.279 hectáreas, que equivalen al 05.54%.

B. Rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico (Pzm):

Cubren una extensión de 9,315.222 hectáreas, que equivalen al 92.37% de la superficie total de la subcuenca Pasabién, mientras se extienden 6,912.633 hectáreas, 46.46% en la subcuenca Pueblo Viejo. Estas rocas metamórficas sin dividir presentan características como: filitas, esquistos cloróticos y granatíferos, esquistos y gneisses de cuarzo – mica – feldspato, mármol y migmatitas.

C. Rocas sedimentarias del Carbonífero Pérmico (CPsr):

Esta unidad geológica presente solo en la subcuenca Pueblo Viejo, ocupa una extensión de 6,478.177 hectáreas, el 43.54% de la subcuenca. Presenta lutitas, areniscas, conglomerados y filitas. Incluye las formaciones Santa Rosa, Sacapulas, Tactic y Macal.

D. Rocas ígneas y metamórficas del Terciario (I):

Este tipo de rocas constituyen la unidad geológica más pequeña de la subcuenca Pueblo Viejo, que se extiende sobre 663.589 hectáreas, el 04.46% del total de la subcuenca y contiene rocas plutónicas sin dividir, que incluyen granitos y dioritas del Pre-Pérmico, Cretácico y Terciario.

Suelos

De acuerdo con la primera aproximación al Mapa de Clasificación Taxonómica de los Suelos de la República de Guatemala, a escala 1:250,000, elaborado por el Ministerio de Agricultura de Guatemala y el Programa de Emergencia por Desastres Naturales (MAGA-BID), los órdenes de suelos presentes en ambas subcuencas son: alfisoles, entisoles, ultisoles e inceptisoles. Siguiendo la descripción detallada por subórdenes se puede inferir la alta variabilidad e intensidad de factores formadores de suelo, clima, material parental, topografía, regímenes hidrológicos, principalmente. Por ejemplo, existen suelos en las partes altas que pueden estar bajo mucha humedad durante más de 270 días al año. Contrastantemente tenemos suelos en la parte baja de la subcuenca del río Pasabién suelos con menos de 100 días de humedad.

A continuación se describen los principales órdenes de suelos existentes en las subcuencas de estudio.

A. Orden Alfisol (alf):

Suelos con un horizonte interno con alto contenido de arcilla, con relación a los horizontes superficiales; además presentan alta saturación de bases (mayor de 35%).

Los alfisoles son suelos maduros con un grado de desarrollo avanzado, pero que todavía tienen un alto contenido de bases en los horizontes interiores. Generalmente son suelos con buen potencial de fertilidad.

B. Orden Entisol (ent):

Suelos con poca o ninguna evidencia de desarrollo de su perfil y, por consiguiente, de los horizontes genéticos. El poco desarrollo se debe a condiciones extremas, tales como, el relieve (que incide en la erosión o, en su defecto, en la deposición superficial de materiales minerales y orgánicos) o el exceso de agua. De acuerdo al relieve, estos suelos están presentes en áreas muy accidentadas (cimas de montañas y volcanes) o en partes planas. Este orden de suelos para el estudio se clasifica en tres subórdenes: Orthents (Eo), Psamments Ep y Fluvents (Ef).

C. Orden Inceptisol (ept):

Son suelos incipientes o jóvenes, sin evidencia de fuerte desarrollo de sus horizontes, pero más desarrollados que los entisoles. Tienen diferentes condiciones de clima y son abundantes en materiales originarios. Algunos subórdenes presentes que denotan alta cantidad de humedad en la región corresponden al Udepts.

D. Orden Ultisol (ult):

Estos son suelos que normalmente presentan una elevada alteración de sus materiales minerales. Presentan un horizonte interior con alto contenido de arcilla (argílico) que tiene baja saturación en las bases (menor de 35%). La mayor parte de los ultisoles son suelos pobres debido al lavado que han sufrido. Por sus bajos niveles de productividad demandan tecnologías no convencionales y ser manejados en forma extensiva, pero no con cultivos o actividades productivas exigentes en nutrientes.

Cuadro 1.

Clasificación taxonómica de suelos de la subcuenca Pasabién

Orden	Suborden	Símbolo	Extensión hectáreas	%
Entisol	Orthents	Eo	2,179.3	21.61
Entisol – Inceptisol	Orthents – Ustepts	Eo Ps	3,134.319	31.08
Entisol – Inceptisol	Psamments – Fluvents – Ustepts – Orthents	Ep Ef Ps Eo	900.562	08.93
Inceptisol – Entisol	Ustepts – Orthents	Ps Eo	419.523	04.16
Inceptisol – Alfisol	Ustepts – Ustalfs	Ps Ls	3,240.209	32.13
Ultisol – Inceptisol	Udult – Udepts	Um Pd	210.77	02.09
Total			10,084.683	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIG MAGA.

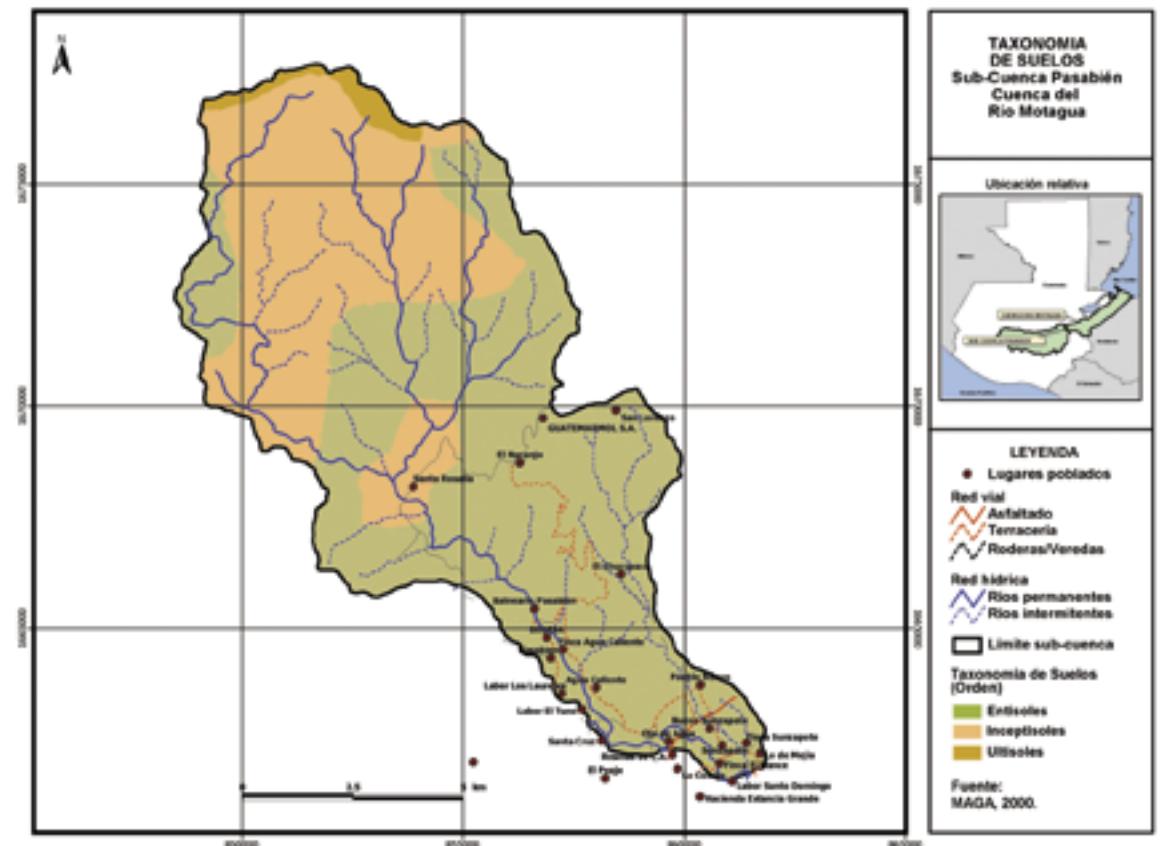


Figura 9. Taxonomía de suelos de la subcuenca Pasabién.

Cuadro 2.

Clasificación taxonómica de suelos de la subcuenca Pueblo Viejo

Orden	Suborden	Símbolo	Extensión hectáreas	%
Ultisol Udalfs	Udult Udalfs	Um Ld	3,018.883	20.29
Ultisol Inceptisol	Udult Udepts	Um Pd	10,304.973	69.26
Alfisol Inceptisol Ultisol	Udalfs Udepts Udult	Ld Pd Um	773.691	05.20
Inceptisol Entisol	Udepts Orthents Aquepts	Pd Eo Eq	483.557	03.25
Inceptisol Entisol	Aquepts Aquepts Orthents	Pq Eq Eo	297.573	02.00
Total			14,878.677	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos SIG MAGA.

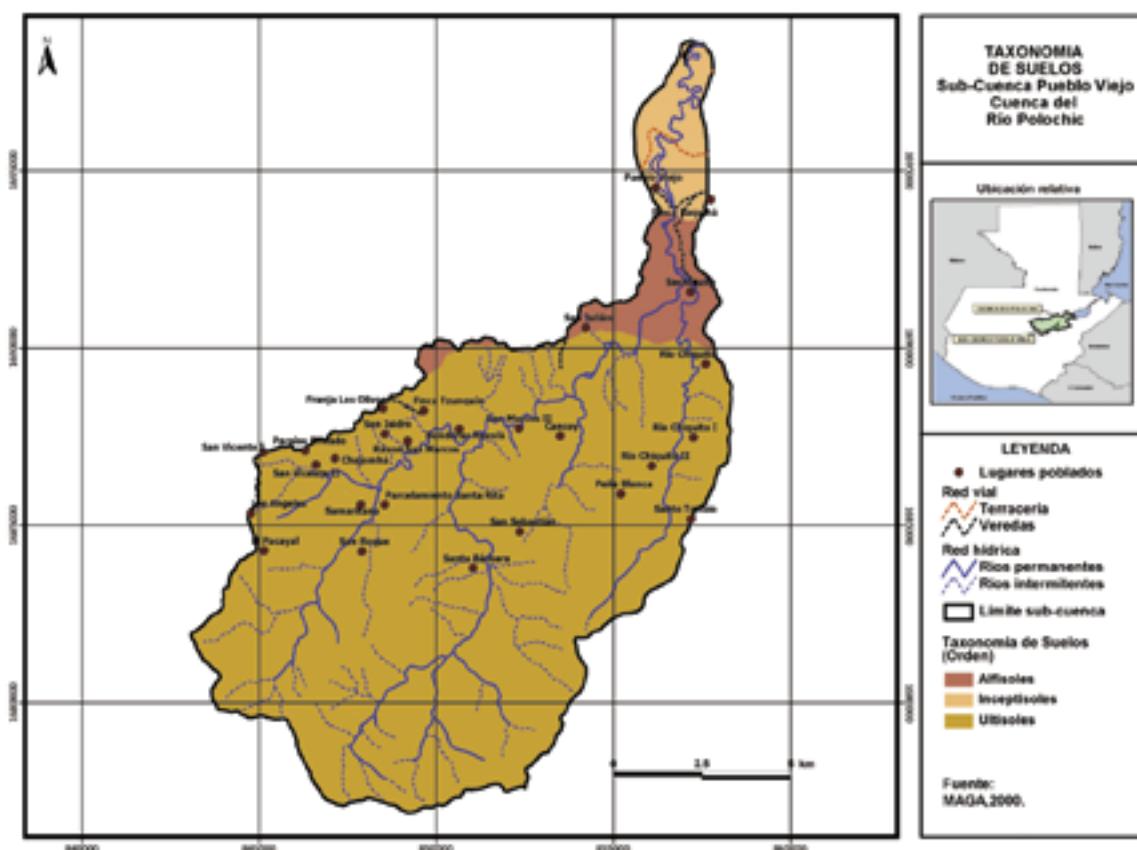


Figura 10. Taxonomía de suelos de la subcuenca Pueblo Viejo.

Clima

De acuerdo con la clasificación climática realizada para Guatemala, siguiendo la metodología de Koppen, en la parte alta de ambas cuencas el clima es templado y húmedo, con invierno benigno. Predominan las plantas mesotermas (Cwig). La parte media presenta un clima caliente y húmedo, la temperatura del mes más frío es mayor que 18°C, dominan las plantas megatermas (Awig). Estos dos climas tienen lluvias en verano. Hay por lo menos un mes con precipitación menor de 60 mm. Es de tipo isotermal, o sea con diferencia de temperatura entre el mes más frío y el más caliente menor que 5°C. El mes más caliente es el que está antes del solsticio de verano y de la temporada lluviosa.

Las partes bajas de ambas cuencas son diferentes. En la subcuenca Pasabién predomina el clima seco, prosperan las plantas xerófitas, el suelo es semiárido y la temperatura media del mes más caliente es menor que 22°C (Bs). En la parte baja de la subcuenca Pueblo Viejo el clima es caliente y húmedo, la temperatura del mes más frío es mayor de 18°C, dominan las plantas megatermas, hay lluvias en verano, la precipitación del mes más seco es mayor de 60 mm. Es de tipo isotermal con una diferencia de temperatura entre el mes más frío y el más caliente menor de 5°C. El mes más caliente es el que está antes del solsticio de verano y de la temporada lluviosa (Afig).

A. Estaciones climáticas:

Se utilizó información de las estaciones climáticas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH, y de la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas, RBSM.

Son útiles los datos de las estaciones: Albores, San Agustín Acasaguastlán, El Progreso con una ubicación altitudinal de 1,300 msnm (se considera la estación climática representativa en función de la altitud en la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas), Pasabién, Río Hondo, Zacapa a una altitud de 260 msnm, ambas del INSIVUMEH, y la estación climática ubicada en el caserío La Bolsa, Gualán, Zacapa a una altitud de 1,000 msnm de la RBSM.

Cuadro 3.

Datos climáticos de promedios mensuales y anuales de la estación Los Albores

Meses													
Ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual	
Precipitación mm													
20.9	22.9	15.2	62.5	166.7	309.6	257.6	322.2	419.9	270.3	138.3	47.0	2047.1	
Días de lluvia													
4.9	3.8	3.8	4.8	11.4	16.8	16.9	17.3	22.1	20.9	16.1	9.7	148.3	
Temperatura media °C													
15.8	16.5	17.9	19.1	19.0	18.9	18.1	17.9	17.8	17.0	15.7	15.0	17.4	

Fuente: Elaboración propia con base en datos del INSIVUMEH.

Cuadro 4.

Datos climáticos de promedios mensuales y anuales de la estación Pasabién

Meses													
Ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual	
Lluvia mm													
1.9	0.8	5.3	37.0	94.5	189.8	81.9	155.0	164.8	99.1	23.3	7.0	860.5	
Días de lluvia													
0.5	0.5	0.9	1.9	7.8	13.2	9.1	10.5	12.5	7.9	3.1	1.4	69.1	
Temperatura media °C													
25.3	26.1	28.0	29.5	29.5	26.2	27.7	28.0	27.7	26.9	25.7	24.8	27.1	
Humedad relativa media %													
74.7	71.5	69.6	69.0	72.0	77.2	77.6	78.0	79.6	80.0	79.2	78.3	75.6	

Fuente: Elaboración propia con base en datos del INSIVUMEH.

Cuadro 5.

Datos climáticos mensuales de la estación climática La Bolsa 2006

Meses													
Ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual	
Precipitación mm													
123.9	46.5	112.8	91.2	155.4	426.0	353.6	218.4	304.5	172.5	78.0	66.6	2149.3	
Días de lluvia													
15	14	12	10	16	23	28	24	23	22	10	10	207.0	
Temperatura media °C													
13.0	14.9	16.6	18.3	18.5	17.0	15.6	16.6	16.9	16.0	14.7	12.1	15.9	
Humedad relativa media %													
87.5	84.2	80.6	80.5	85.4	90.1	90.2	87.9	88.2	93.2	86.5	93.0	87.3	

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la RBSM.

Se utilizaron los registros de la estación Telemán, Panzós, Alta Verapaz, a una altitud de 30 msnm de INSIVUMEH y la estación climática de la RBSM ubicada en el caserío San Vicente, del mismo municipio a una altitud de 950 msnm.

Cuadro 6.

Datos climáticos de promedios mensuales y anuales de la estación Telemán

Meses													
Ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual	
Precipitación mm													
58.4	37.1	51.9	86.1	201.2	310.6	500.3	470.7	480.8	193.8	143.6	85.5	2620.1	
Días de lluvia													
11.9	7.5	6.8	6.4	13.3	18.2	23.8	22.4	25.1	16.3	14.6	11.1	177.4	
Temperatura media °C													
24.5	25.0	26.1	27.9	28.0	28.5	27.6	27.6	27.5	26.8	25.3	24.4	26.6	

Fuente: Elaboración propia con base en datos del INSIVUMEH.

Cuadro 7.

Datos climáticos mensuales y anuales de la estación climática San Vicente, año 2006

Meses												
Ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
Precipitación mm												
261.9	91.4	169.9	169.1	156.2	667.5	981.5	479.8	354.3	307.1	344.9	X	3 983.8
Días de lluvia												
20	16	14	14	14	25	28	23	23	15	22	X	214
Temperatura media ambiental °C												
16.5	16.5	17.9	19.3	22.6	24.0	23.8	25.8	26.0	24.1	20.0	X	21.5
Humedad relativa media %												
93.1	87.8	87.5	89.8	56.8	27.9	23.6	10.7	10.2	14.7	55.4	x	50.7

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la RBSM.

Zonas de vida

Según el trabajo elaborado por de la Cruz, con la metodología de Holdridge, la subcuenca Pasabién está definida por cinco zonas de vida y la de Pueblo Viejo por tres, estas son: el bosque pluvial montano bajo subtropical (bp-MB), el bosque muy húmedo subtropical cálido (bmh-S(c)), el bosque muy húmedo subtropical frío (bmh-S(f)), el bosque húmedo subtropical templado (bh-S(t)), el bosque seco subtropical (bs-S) y el monte espinoso subtropical (me-S).

Cuadro 8.

Zonas de vida de la subcuenca Pasabién

Zona de vida	Símbolo	Extensión Ha	%
Bosque pluvial montano bajo subtropical	Bp-MB	1,725.489	17.11
Bosque muy húmedo subtropical frío	bmh-S(f)	2,944.727	29.20
Bosque húmedo subtropical templado	Bh-S(t)	4,736.776	46.97
Bosque seco subtropical	Bs-S	432.633	04.29
Monte espinoso subtropical	me-S	245.058	02.43
Total		10,084.683	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIG- MAGA.

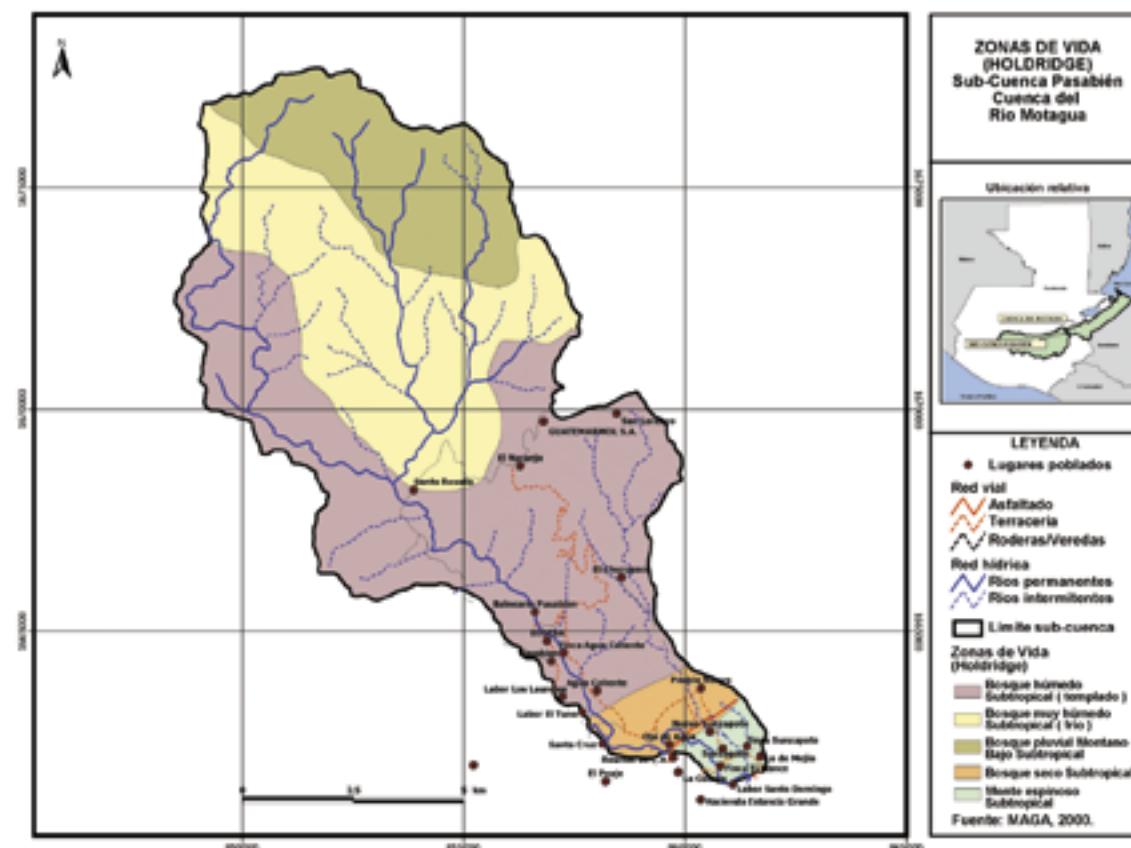


Figura 11. Zonas de vida de la subcuenca Pasabién.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 9.

Zonas de vida de la subcuenca Pueblo Viejo

Zona de vida	Símbolo	Extensión Ha	%
Bosque pluvial montano bajo subtropical	Bp-MB	1,645.582	11.06
Bosque muy húmedo subtropical frío	Bmh-S(f)	3,462.268	23.27
Bosque muy húmedo subtropical cálido	Bmh-S(c)	9,770.827	65.67
Total		14,878.677	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIG – MAGA.

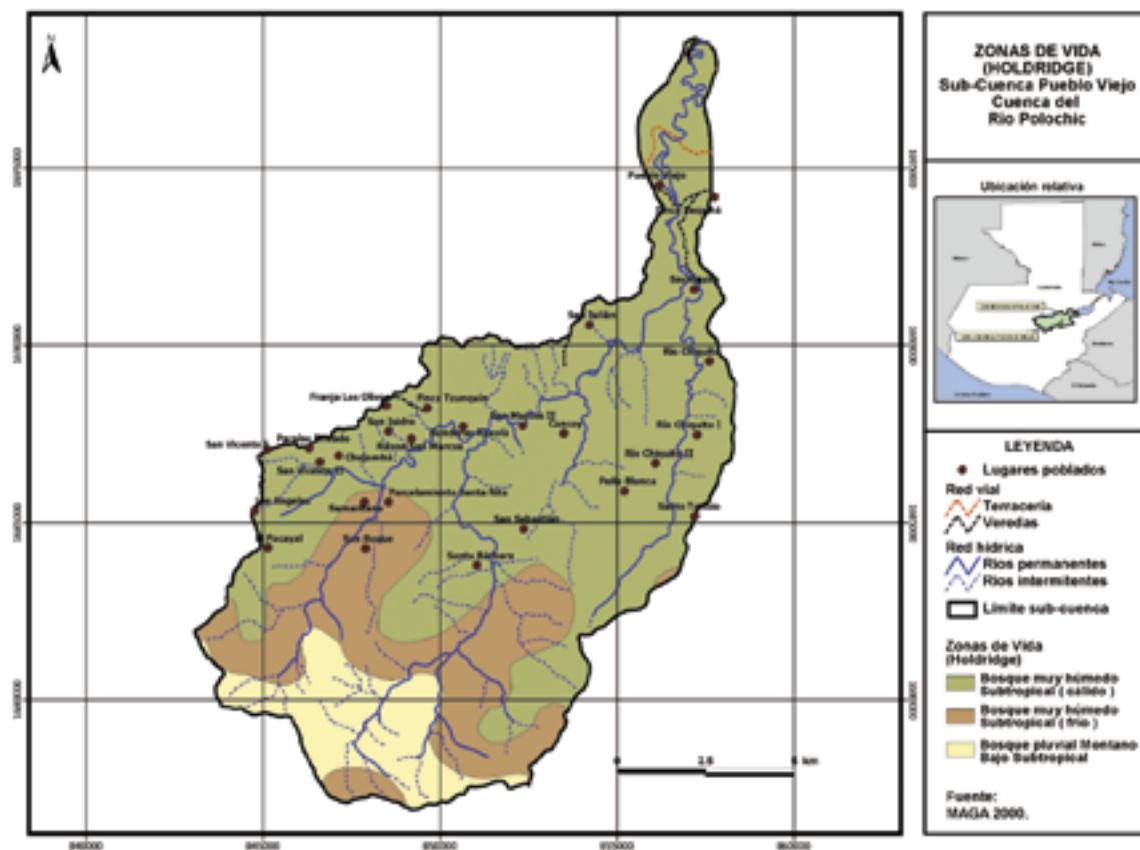


Figura 12. Zonas de vida de la subcuenca Pueblo Viejo.

Fuente: Elaboración propia.

Cobertura vegetal y uso de la tierra, 1999

El SIG – MAGA, ofrece un estudio sobre el uso de la tierra en el año 1999. El nivel de levantamiento de dicho estudio fue a una escala de 1:250,000.

La información se utilizó para determinar la cobertura forestal de las subcuenas y así poder establecer la reducción de los recursos forestales de cada área.

La cobertura forestal en el año 1999, para la subcuenca Pasabién, era de 3,887.645 hectáreas, correspondientes al 38.55% de la extensión total de la subcuenca.

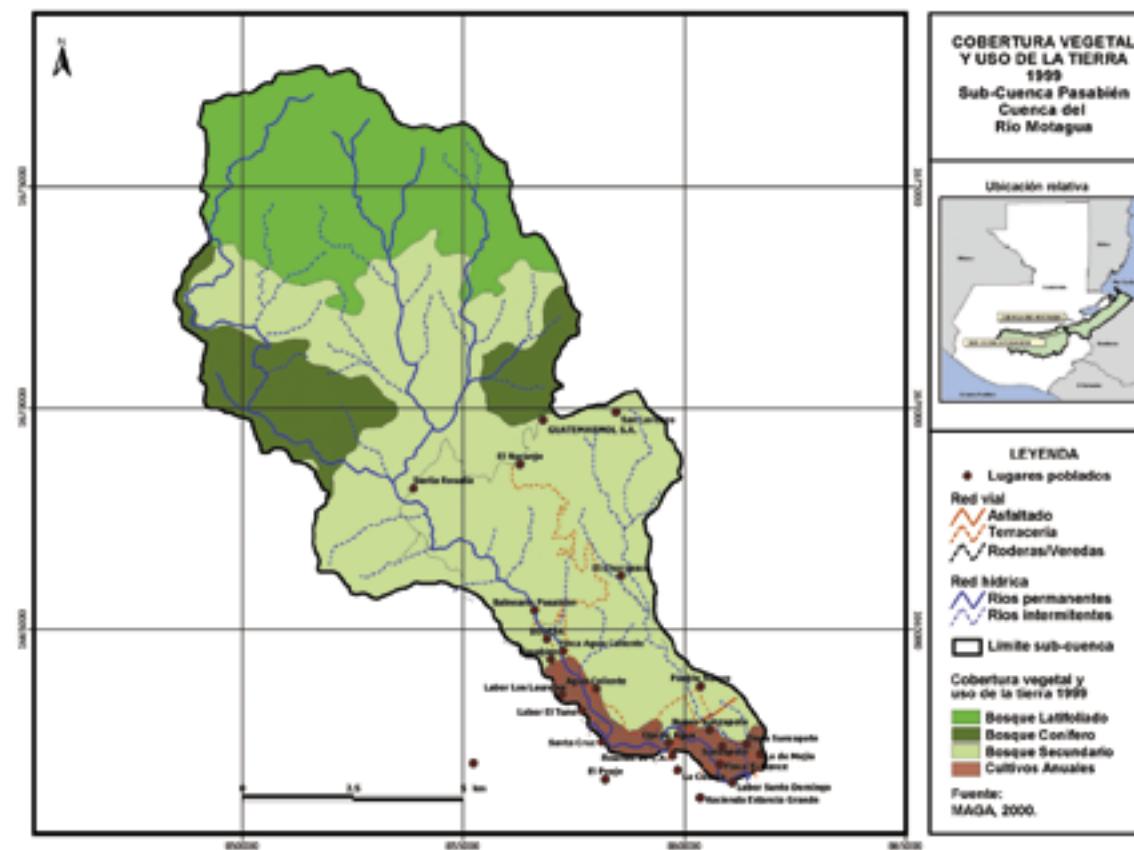


Figura 13a. Uso de la tierra en la subcuenca Pasabién 1999.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 10.

Uso de la tierra en la subcuenca Pasabién, 1999

Uso de la tierra 1999	Extensión Ha	%
Bosque latifoliado	2,645.212	26.23
Bosque conífero	1,242.433	12.32
Agricultura limpia anual	1,539.931	15.27
Arbustos con altura de 1.5 a 5m. se incluye bosque secundario y regeneración	4,223.466	41.88
Asocio agricultura limpia anual – Horticultura – Ornamentales	433.641	04.30
	10,084.683	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIG – MAGA.

La subcuenca Pueblo Viejo, en 1999, tenía una cobertura forestal de 9,944.907 hectáreas, correspondientes al 66.84% de la extensión total de la cuenca.

El cultivo de hule también se consideró como cobertura forestal, ya que tiene una función reguladora hídrica y de protección de suelos. Cubría una pequeña superficie de la subcuenca ese año.

Cuadro 11.

Uso de la tierra en la subcuenca Pueblo Viejo 1999

Uso de la tierra	Extensión Ha	%
Bosque latifoliado	9,882.417	66.42
Cultivo hule	62.490	00.42
Cultivo café	278.231	01.87
Pastos cultivados	440.409	02.96
Agricultura limpia anual	4,215.129	28.33
	14,878.676	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos SIG – MAGA.

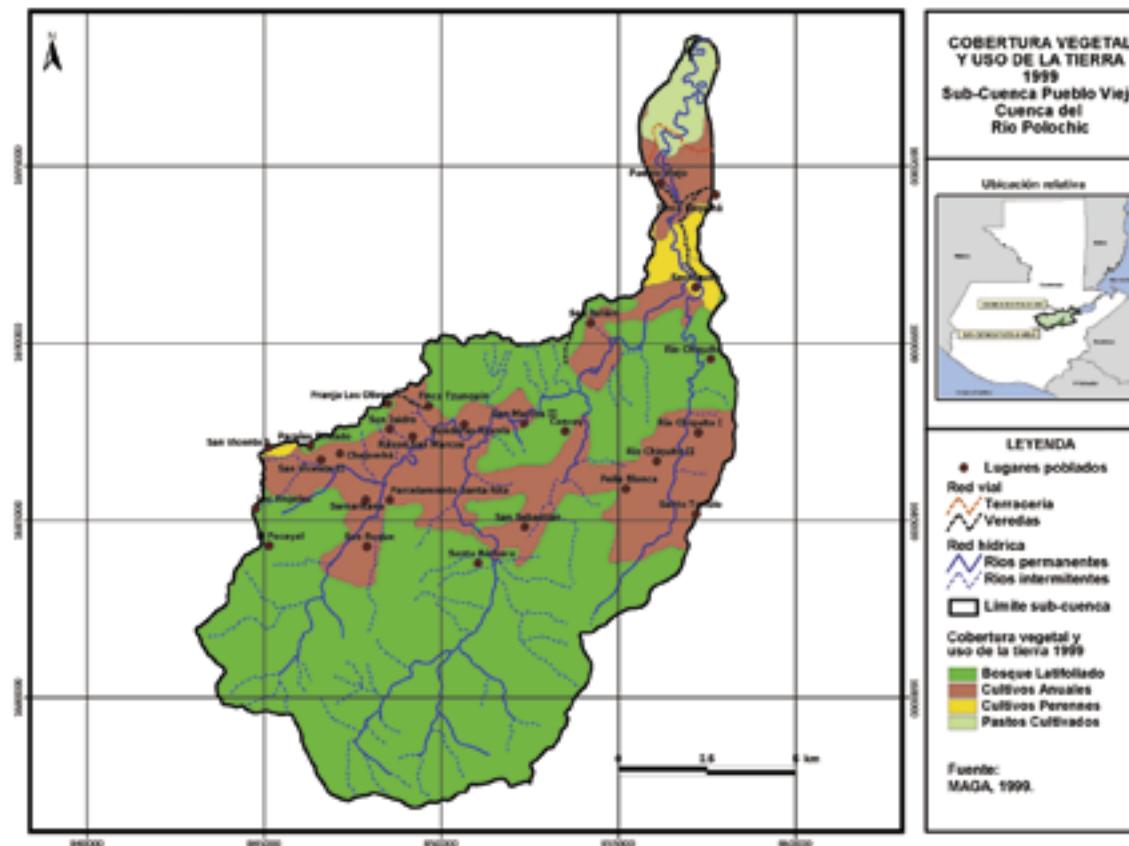


Figura 13b. Uso de la tierra en la subcuenca Pueblo Viejo 1999

Fuente: Elaboración propia.

Uso de la tierra en el 2003

El último estudio sobre cobertura vegetal y uso de la tierra lo realizó el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, MAGA. Los resultados de este trabajo son del año 2003, y fue finalizado y presentado en el 2005. La escala del estudio es 1:50,000 lo que nos brinda un detalle más preciso. La subcuenca Pasabién tiene una cobertura boscosa de 3,079.864 hectáreas, equivalentes al 30.54 % de su extensión total. Los arbustos y matorrales forman parte de la zona de vida del bosque seco.

Cuadro 12.

Cobertura vegetal y uso de la tierra en la subcuenca Pasabién 2003

Cobertura vegetal y uso de la tierra	Extensión Ha	%
Bosque latifoliado	2,154.09	21.36
Bosque conífero	681.725	06.76
Bosque mixto	244.049	02.42
Arbustos y matorrales	5,836.011	57.87
Granos básicos	708.954	07.03
Hortalizas – Ornamentales	322.71	03.20
Pastos naturales – Herbazales	09.076	0.09
Cítricos	54.457	0.54
Melon o sandía con riego	05.042	0.05
Papaya	04.034	0.04
Centro poblado	22.18	0.22
Río	04.034	0.04
Minas descubiertas	37.313	0.37
	10,084.683	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIG – MAGA.

Cuadro 13.

Cobertura vegetal y uso de la tierra en la subcuenca Pueblo Viejo 2003

Cobertura vegetal y uso de la tierra	Extensión Ha	%
Bosque latifoliado	8,040.439	54.04
Bosque mixto	78.857	00.53
Hule	1,002.823	06.74
Arbustos y matorrales	1,557.797	10.47
Cardamomo	2,581.450	17.35
Granos básicos	864.45	05.81
Pastos naturales – Yerbazales	563.902	03.79
Pastos cultivados	102.663	00.69
Río	86.296	00.58
	14,878.677	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIG – MAGA.

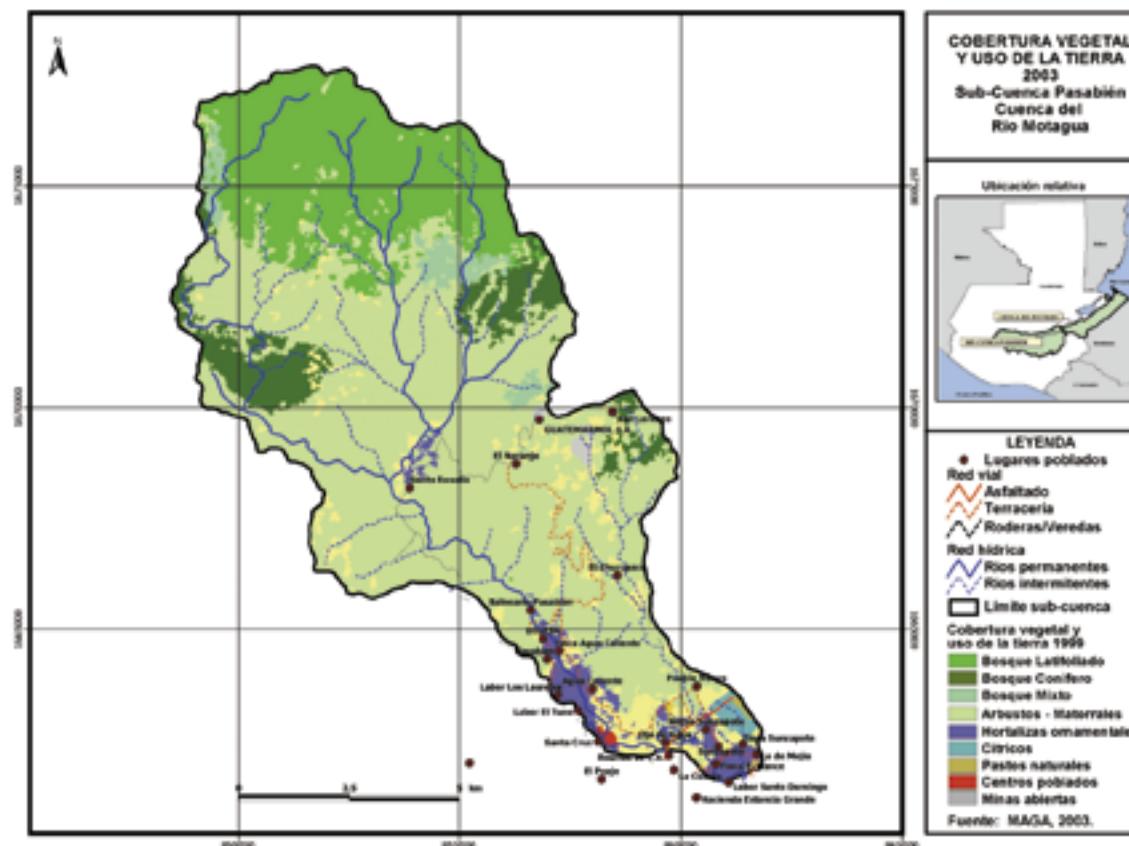


Figura 14. Cobertura vegetal y uso de la tierra en la subcuenca Pasabién 2003.

Fuente: Elaboración propia.

La cobertura forestal de la subcuenca Pueblo Viejo en el 2003 era de 9,122.119 hectáreas, equivalentes al 61.31% de su extensión. Esta superficie incluye las plantaciones de hule por sus funciones en la regulación hídrica.

El hule en su mayoría pertenece a la empresa Agrícola Campesina, ECA, de Pueblo Viejo. Estas plantaciones son incentivos que otorga por un año el Programa de Incentivos Forestales, PINFOR, del Instituto Nacional de Bosques, INAB, del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. El monto a recibir es de Q5,500.00 (US\$709.68, US\$1.00 = Q7.75), por la fase de establecimiento.

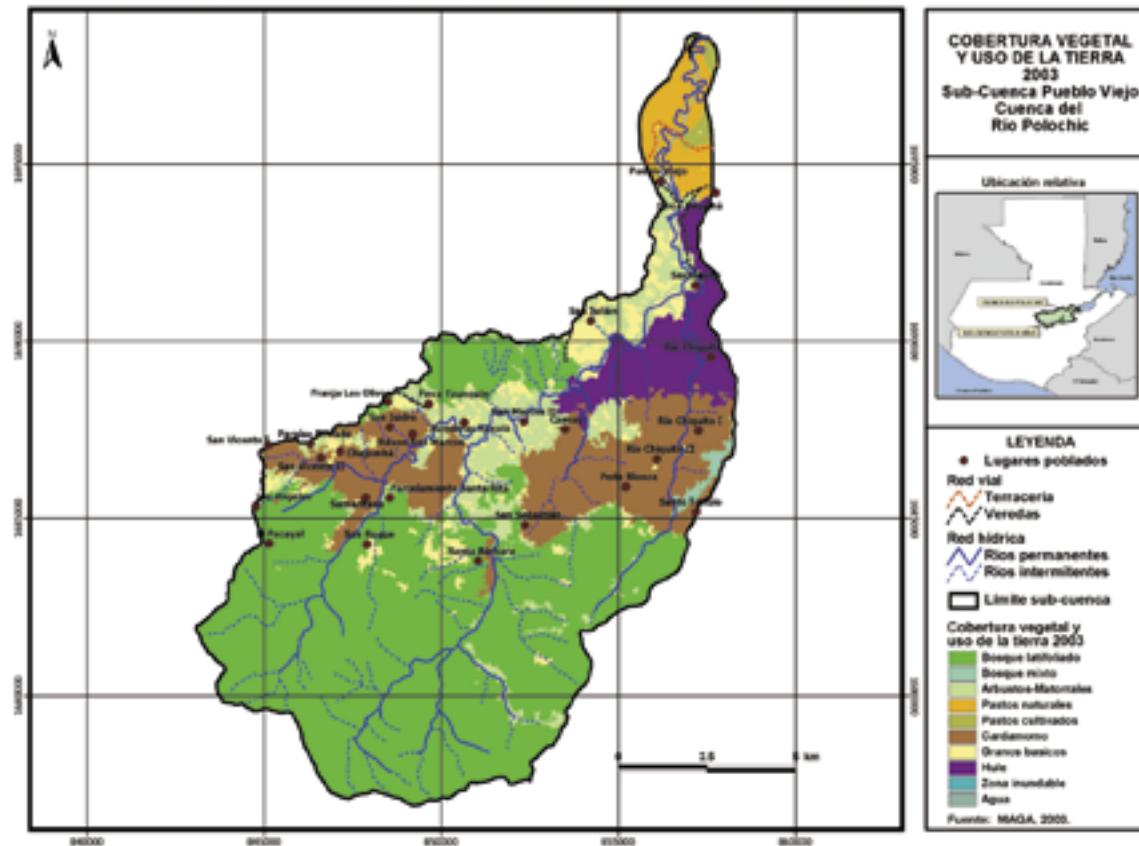


Figura 15. Cobertura vegetal y uso de la tierra en la subcuenca Pueblo Viejo, 2003.

Fuente: Elaboración propia con base en datos SIG – MAGA.

Hidrología

En ambas subcuencas los ríos permanentes nacen en la zona nuclear que corresponde a la zona de vida del bosque pluvial montano bajo y el bosque muy húmedo subtropical frío. Es importante mencionar que la mayoría de los bosques ribereños o de galería están degradados principalmente en las partes bajas de la subcuenca. Los parámetros físicos de calidad monitoreados, son datos tomados *in situ*: oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y la temperatura. Los parámetros químicos de calidad monitoreados son: ph (tomado *in situ*), fosfato, nitritos, nitratos y amonio; estos últimos son analizados *ex situ*.

La red hidrológica de la subcuenca Pasabién está formada por los siguientes ríos: Del chorro, El Repollal, El Portón y Pasabién. Además, varias quebradas alimentan el cauce de los diversos ríos, entre las cuales se mencionan: El Manguito, Del Sillón, La colmena, Del Payán, Poza Negra, Ranchitos, Del Puerto. Existe también gran cantidad de corrientes efímeras que alimentan los cauces principalmente en los meses de lluvias.

La red hídrica en el área de la microcuenca se encuentra compuesta por 5 ríos: Chiquito, Pueblo Viejo, Raxon Tzunun, Santo Toribio y otro sin nombre. El mapa nos refiere la estructura y composición de la red hídrica y el sistema de drenaje que desemboca en el río.

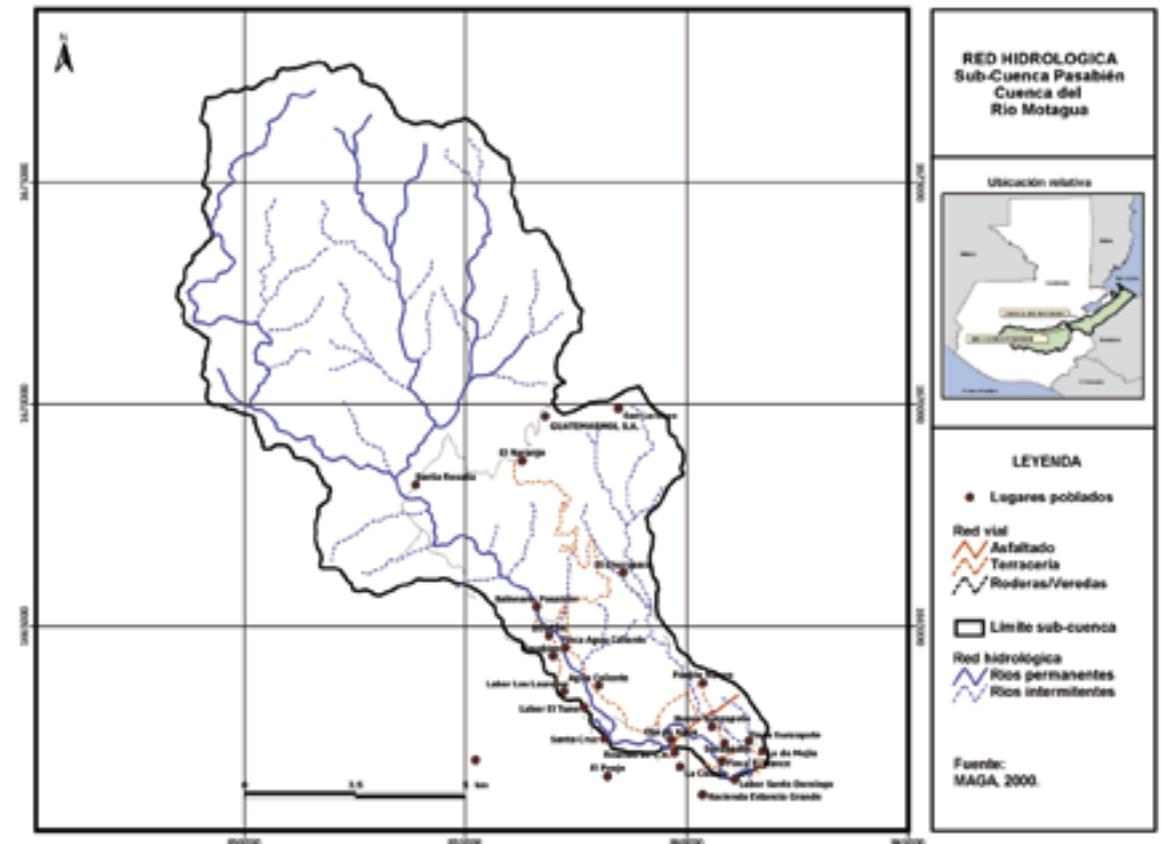


Figura 16a. Red hidrológica de la subcuenca Pasabién.

Fuente: SIG Fundación Defensores de la Naturaleza

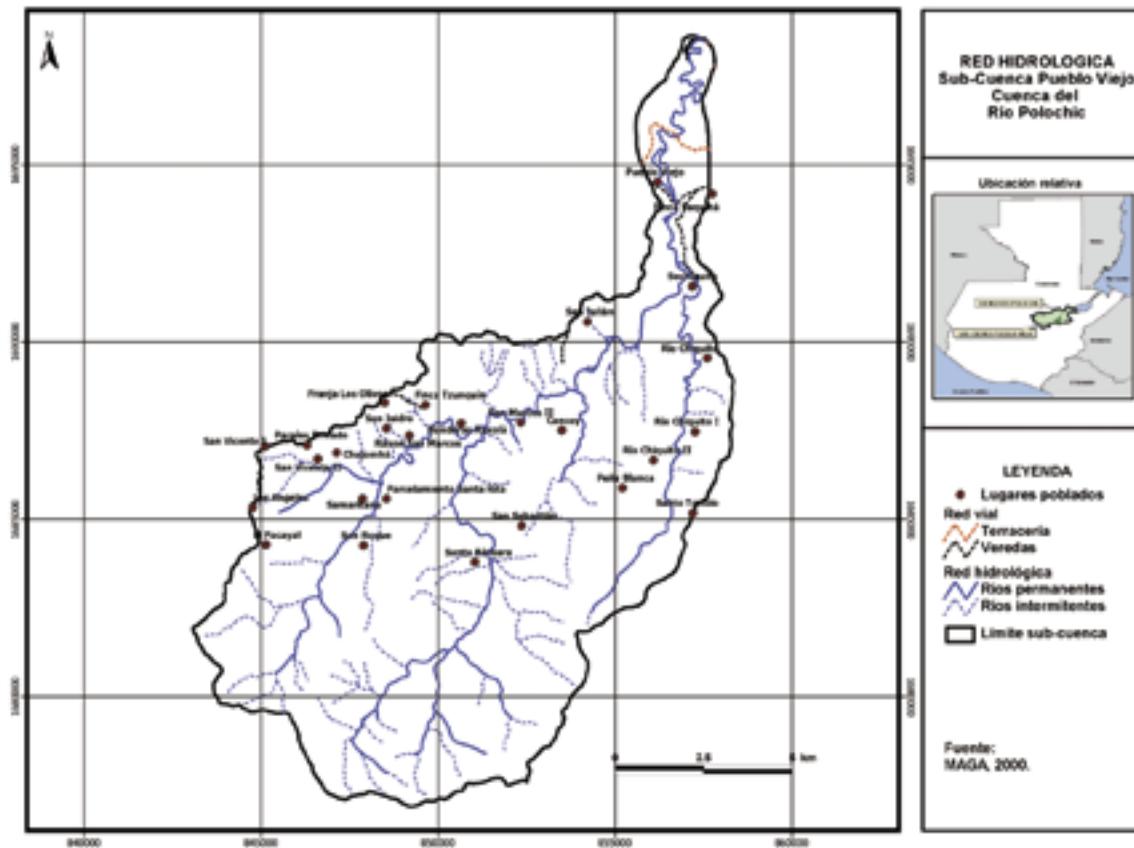


Figura 16b. Red hidrológica de la subcuenca Pueblo Viejo.



Consideraciones Metodológicas

Es importante resaltar que en Guatemala no existe información hidrológica y climática confiable para la realización de un trabajo detallado. Por ello, para desarrollar este trabajo no se encontró una base de datos consistente (al menos 30 años), deseable para la evaluación de recursos hidrológicos y recursos naturales asociados. Sin embargo, si se tuvo acceso a información, primaria y secundaria, aunque limitada y de escala poco detallada, que fue muy importante para la realización de la evaluación hidrológica puntual que se realizó para cumplir con lo objetivos de este estudio.

En tal sentido se utilizaron métodos indirectos, tales como modelos de erosión de suelos, y sedimentación para aproximarse a la problemática asociada a los recursos hidrológicos. Los datos mostrados en este trabajo deben considerarse técnicamente adecuados, sin embargo, constituyen una aproximación inicial, que deberá ser afinada en un futuro cercano para darle mayor rigor científico.

Es importante destacar que existe información cartográfica con poca compatibilidad para la comparación, sin embargo en este estudio se utilizó para definir las tendencias históricas. Ejemplo de lo anterior es el Mapa de Cobertura del Suelo 2003, emanado por el Ministerio de Agricultura y el Mapa de Dinámica de la Cobertura Forestal 1991-1996-2001 elaborado por el Instituto Nacional de Bosques y colaboradores.

Otro aspecto importante de mencionar es que se realizó una laboriosa tarea en la recopilación de datos para estimar la cantidad y la calidad de agua “producida” por las cuencas bajo estudio.

Un aporte importante de este trabajo es la validación de la metodología de estimación de recarga hídrica propuesta por el Instituto Nacional de Bosques (INAB), fundamental para priorizar las áreas de captación y regulación hidrológica.

Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos de trabajo planteados se desarrolló la metodología que se presenta a continuación de manera sintética.

Definición y análisis de la naturaleza, origen y dimensión de la problemática hídrica (cantidad y calidad) de la cuenca y su relación con el uso del suelo de las comunidades de la parte alta

Para tal tarea fue necesario generar y recopilar la siguiente información: uso del suelo, poblados y la cobertura del suelo (su dinámica, tendencia y su relación con los poblados existentes), así como la capacidad de uso del suelo y el conflicto que genera dicho uso.

Para el estudio técnico de los recursos hídricos es importante analizar también la oferta y la demanda. En este sentido se recopiló la información disponible, se realizaron entrevistas con personas calificadas en el tema y con especial conocimiento del área de estudio.

La oferta hídrica se definió, caracterizó y evaluó cuantitativa y cualitativamente.

Los aspectos cuantitativos se analizaron con la estimación de la recarga hídrica y el presupuesto hídrico de la cuenca. Esto se llevó a cabo con el método de balance hídrico de suelos, propuesto por el Instituto Nacional de Bosques (INAB, 2005)². Posteriormente, se estudiaron las tendencias del balance hídrico y su relación con el uso del suelo a través de un modelo empírico de las condiciones históricas de la cobertura vegetal, especialmente de 1999, cuando se da una eliminación del manto boscoso para el cultivo de maíz. Es importante mencionar que para la obtención de los datos de referencia iniciales se hizo una exhaustiva recopilación de información de campo.

Para la estimación cualitativa de los recursos hidrológicos de la cuenca, se recopiló información de campo con respecto a la calidad del agua (parámetros físicos y químicos). Posteriormente se realizó una estimación de la erosión, de acuerdo con el Mapa de Susceptibilidad de Erosión, generado por el Ministerio de Agricultura de Guatemala. Toda la información anterior se utilizó como referencia para la realización de un modelo y la calibración en gabinete del método RUSLE, con herramientas de sistemas de información geográfica.

Como insumos básicos se utilizaron los mapas generados por el Ministerio de Agricultura denominados: Factor K, Factor R, Factor Ls y Factor C,

² Ver en anexos la metodología detallada.

generados con base en el Mapa de Cobertura del Suelo del 2003. Con ello obtuvimos la estimación de la erosión actual en TM/ha/año en la cuenca. A partir de estos valores y los valores de referencia recopilados en el campo se estimó el factor de sedimentación.

Con base en lo anterior se consideró la tendencia de la erosión de acuerdo al cambio de uso del suelo. En este sentido se simuló (nuevamente por el método RUSLE y con instrumentos de sistemas de información geográfica) la recuperación de la cobertura forestal perdida desde 1991 hasta 2003. Es decir, se simuló la erosión en TM/ha/año en el año 1991. Para la implementación de este modelo se utilizó el Mapa de Dinámica Forestal 1991-1996-2003, elaborado por el Instituto Nacional Forestal y colaboradores.

Definición del impacto del problema hídrico en los usuarios de agua en la parte baja

Los aspectos de demanda se analizaron utilizando para ello información de fuentes secundarias y primarias. Se realizó un análisis de la percepción de actores clave de la problemática hídrica y se visitaron los sitios más relevantes en la parte baja de la cuenca para este estudio.

Selección de áreas críticas del problema

Con toda la información recopilada se procedió a definir las áreas críticas mediante el análisis de la información anterior. Para ello se analizaron el aspecto social, el económico, la recarga hídrica, la susceptibilidad a la erosión, las tierras forestales de captación y regulación hidrológica, principalmente.

Definición y descripción de la problemática

Se hizo una síntesis y descripción del problema, tomando en cuenta el mayor número posible de elementos.



Resultados y Discusión

Definición de la naturaleza, origen y dimensión del problema del agua (cantidad y calidad) de la cuenca. Relación entre esta problemática y el uso del suelo de las comunidades de la parte alta de la cuenca.

Oferta hídrica, aspectos cuantitativos

A. Hidrología general:

El primer paso fue recopilar información con respecto a la hidrología de las subcuencas estudiadas.

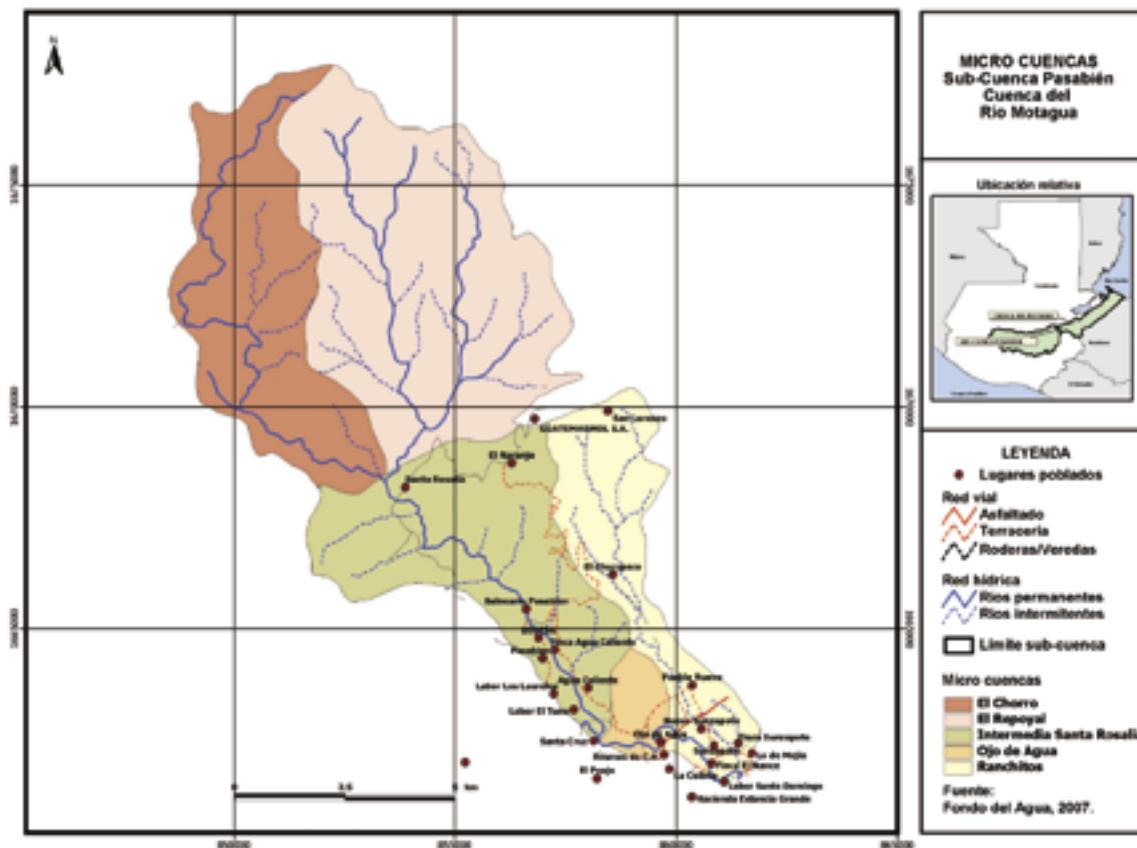


Figura 17. Microcuencas de Pasabién

Subcuenca Pasabién:

Es tributaria de la cuenca Río Motagua y drena hacia la vertiente del Atlántico. En ella se encuentra una hidroeléctrica, cuyo embalse se ubica a 800 msnm y tiene una capacidad de almacenamiento de 70,000 m³.

Su longitud es de 43.594 Km. y está formada por los ríos El Chorro, El Repollal y El Portón, además de las quebradas: El Manguito, El Ciprés, Del Sillón, La Colmena, Payán, Poza Negra, Ranchitos y Puerto.

De acuerdo con la información recabada por Defensores de la Naturaleza, en el 2005 el caudal específico fue de 19.135 litros/segundo/km². El caudal promedio mensual fue de 1,929.75 litros por segundo y el caudal total anual de 21,226.23 litros por segundo. La subcuenca tiene una extensión total de 10,084.683 hectáreas. En ese año el caudal mínimo se registró en el mes de febrero con 130 litros/segundo y el caudal máximo se presentó en agosto con 6,000 litros/segundo. La cobertura forestal de la subcuenca en el 2003 era de 3,079.864 hectáreas.

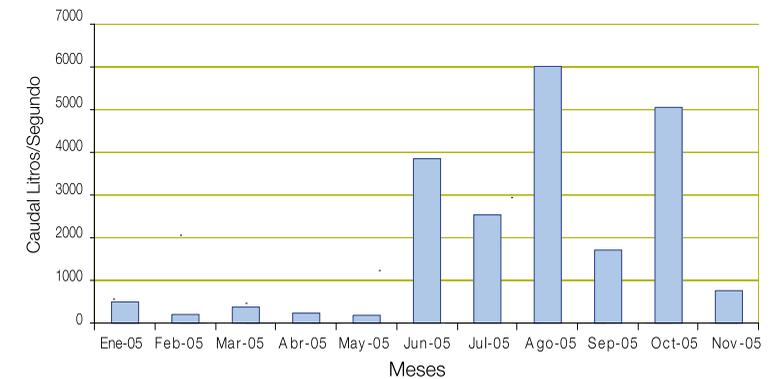


Figura 18. Caudales subcuenca Pasabién, 2005.

Subcuenca Pueblo Viejo:

Es tributaria de la cuenca Río Polochic y drena hacia la vertiente del Atlántico. Tiene un balance hídrico positivo y el área se caracteriza por la abundancia del vital líquido. La longitud de sus corrientes es de 53.645 kilómetros. La conforman las microcuencas de los ríos: Raxon Tzunún, Santo Toribio, Caquiepec, Chiquito y las quebradas: Chajomjá y Cancoy (ver figura 19).

Según los datos de la Reserva de Biosfera Sierra de la Minas el comportamiento de caudales en el 2005 fue el siguiente (ver figura 20).

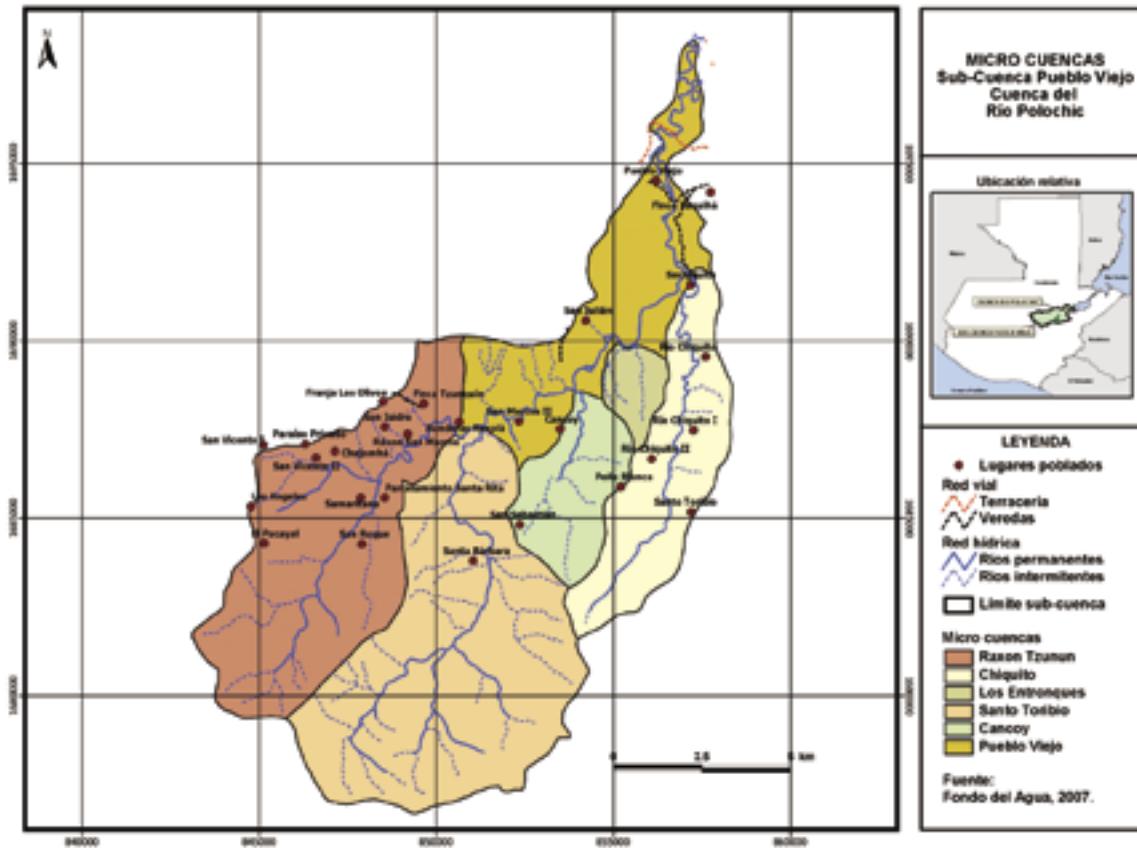


Figura 19. Microcuencas de Pueblo Viejo

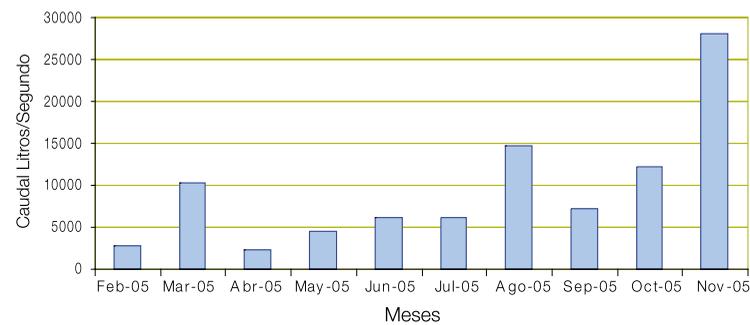


Figura 20. Caudales subcuenca Pueblo Viejo, 2005

De acuerdo con Defensores de la Naturaleza en el 2005, el caudal específico de la subcuenca fue de 63.37 litros/segundo/km². El caudal promedio mensual fue de 9,428.7 l/seg y el caudal total anual fue de 94,287 l/seg.

La extensión total de la subcuenca es 14,878.677 hectáreas y la cobertura forestal era de 9,122.119 hectáreas.

B. Estimación de recarga hídrica de Pasabién:

El primer paso para la estimación de la recarga hídrica es la sobreposición de los mapas de geología, de taxonomía y de cobertura de suelos. A continuación se presentan los resultados (cuadro 11 y figura 21) y se muestran las unidades de mapeo definidas para las subcuencas en estudio.

De los 11 tipos de cobertura vegetal sólo se consideraron seis (bosque latifoliado, bosque conífero, bosque mixto, arbustos, granos básicos y hortaliza - ornamentales) los otros cinco presentan extensiones menores a la unidad de mapeo (melón - sandía, papaya, mango, pastos, cítricos) y luego de la sobreposición son aún menos significativos. La unidad de mapeo 11 es inaccesible por lo tanto no se realizó la respectiva prueba de infiltración.

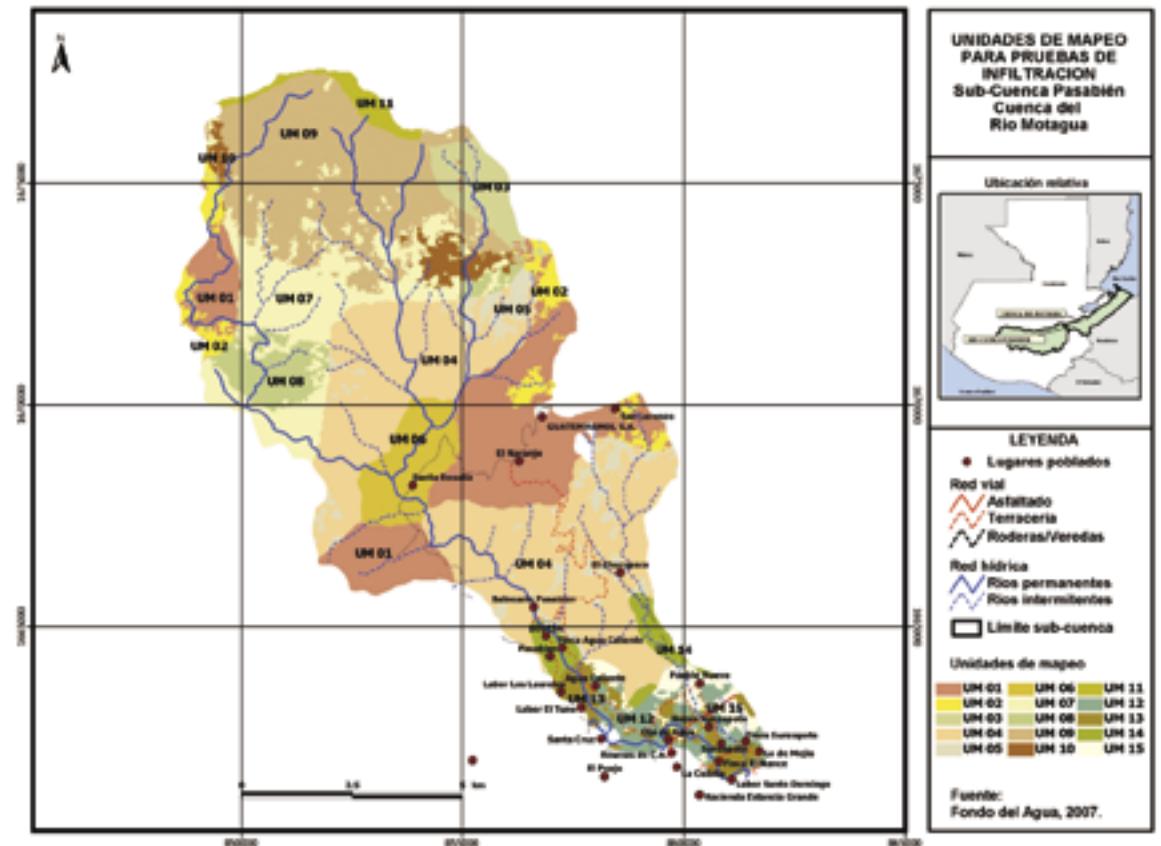


Figura 21. Unidades de mapeo para elaboración de pruebas de infiltración de la subcuenca Pasabién

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIG - MAGA.

Cuadro 14.

Unidades de mapeo de la subcuenca Pasabién

Unidad de Mapeo	Geología	Taxonomía de Suelos	Cobertura Vegetal	Extensión Hectáreas	%	
1	Pzm	Eo	Arbustos – matorrales – granos básicos	1566.513	15.53	
2			Bosque conífero – bosque mixto	287.605	02.85	
3			Bosque latifoliado	285.997	02.84	
4		Eo – Ps	Arbustos – matorrales	2715.881	26.93	
5			Granos básicos – hortaliza – ornamental – Mango – bosque conífero – bosque latifoliado	337.869	03.35	
6		Ps – Eo	Arbustos – matorrales – granos básicos – hortaliza – ornamental	447.212	04.43	
7		Ps – Ls	Arbustos – matorrales – granos básicos	1093.075	10.84	
8			Bosque conífero	316.296	03.14	
9			Bosque latifoliado	1631.520	16.18	
10			Bosque mixto	166.598	01.65	
11		Um – Pd	Bosque latifoliado – arbustos y matorrales	222.023	02.20	
12	Qa	Ep – Ef – Ps – Eo	Granos básicos	285.844	02.83	
13		Ep – Ef – Ps – Eo				
		Eo – Ps	Hortaliza – ornamental – mango – melón – sandía – pastos naturales	256.149	02.54	
14	Pzm	Ep – Ef – Ps – Eo	Arbustos – matorrales – granos básicos – hortaliza – ornamental – mango	211.643	02.10	
15	Qa	Ep – Ef – Ps – Eo	Arbustos – matorrales – cítricos	197.482	01.96	
		Eo – Ps				
				Río	3.674	00.04
				Minas	37.059	00.37
				Poblado	22.243	00.22
				Total	10,084.683	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIG-MAGA

Cuadro 15.

Valores de láminas (mm) por año de recarga hídrica y precipitación de cada unidad de mapeo (UM) y % de Pp que se recarga %Pp / RecHid

UM	Extensión ha	Rec Hid mm/año	Pp mm/año	% Pp/RecHid
01	1566.513	839.57	2264.2	37
02	287.605	1,201.80	2,894.9	42
03	285.997	819.14	3,104.8	26
04	2715.881	299.45	911.9	33
05	337.869	2,121.52	3,200.00	66
06	447.212	810.35	1,658.7	49
07	1093.075	1,076.34	1,823.7	59
08	316.296	1,452.12	2,425.8	60
09	1631.520	1,808.74	2,855.9	63
10	166.598	487.51	1853.5	26
11	222.023			
12	285.844	241.56	819.1	29
13	256.149	228.11	724.9	31
14	211.643	04.16	838.6	0
15	197.482	289.13	892.5	32
	3.674	Río		
	37.059	Minas		
	22.243	Poblados		
	10,084.683			

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior indica cuáles unidades de mapeo presentan mayor recarga hídrica, además muestra una comparación con respecto a la precipitación. Las unidades de mapeo cinco y nueve con bosque latifoliado y siete y ocho con bosque conífero, infiltran más de la mitad de la precipitación del lugar. La unidad que reporta la menor recarga hídrica es la catorce, que tiene pastos.

El clima también es muy importante en la recarga hídrica. Las unidades que captan y regulan volúmenes considerables están ubicadas en la parte media y alta de la subcuenca, donde aumenta la precipitación y se reduce la evapotranspiración potencial.

Cuadro 16.

Análisis físico de suelos con las muestras de las pruebas de infiltración (PI) de la subcuenca Pasabién.

PI	No. UM	Densidad aparente gr/cc	Constantes de humedad		%			Textura
			Capacidad de campo 1/3 atm	Punto de marchitez permanente 15 atm	Arcilla	Limo	Arena	
01	6	1.4815	12.15	04.64	14.49	30.74	54.77	Franco arenoso
02	4	1.4286	17.75	07.92	22.89	24.07	53.04	Franco arcillo arenoso
03	13	1.3333	12.03	05.32	14.49	32.84	52.67	Franco arenoso
04	14	1.2121	18.29	11.26	29.19	16.42	59.39	Franco arcillo arenoso
05	15	1.1765	31.32	15.27	33.77	26.54	39.69	Franco arcilloso
06	12	1.3793	22.34	11.22	33.77	24.44	41.79	Franco arcilloso
07	10	1.4286	13.55	5.86	19.07	32.84	48.09	Franco
08	1	1.1429	43.97	32.03	56.87	11.84	31.29	Arcilloso
09	9	0.7692	70.19	49.43	27.47	28.64	43.89	Franco arcillo arenoso
10	8	0.7547	72.05	50.20	16.97	43.34	39.69	Franco
11	7	1.2121	22.40	12.37	29.59	22.34	48.09	Franco arcillo arenoso
12	3	0.9091	38.27	21.06	29.74	22.34	47.92	Franco arcillo arenoso
13	2	1.1765	27.92	13.57	27.26	29.02	43.72	Franco arcilloso
14	5	0.7692	57.21	41.04	23.06	34.94	42.00	Franco

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 17.

Valores de láminas en mm/día de las unidades de mapeo de los factores recarga hídrica (Rec Hid), precipitación (Pp), evapotranspiración Real (ETR), escorrentía (ESC) y retención (RET) de la subcuenca Pasabién

UM	Uso actual	Pp mm/año	Rec Hid mm/año	ETR mm/año	ESC mm/año	RET mm/año
01	Bosque encino	2264.2	839.57	556.02	527.22	454.58
02	Bosque coníferas	2,894.9	1,201.80	504.17	683.61	579.54
03	Bosque latifoliado	3,104.8	819.14	476.27	1,272.97	621.18
04	Arbustos – bosque seco	911.9	299.45	463.39	25.36	123.69
05	Bosque latifoliado	3,200.0	2,121.52	476.28	00.00	640.06
06	Árboles dispersos	1,658.7	810.35	543.88	108.38	209.94
07	Arbustos	1,823.7	1,076.34	519.14	00.00	228.22
08	Bosque coníferas	2,425.8	1,452.12	565.89	00.00	486.50
09	Bosque latifoliado	2,855.9	1,808.74	518.84	00.00	571.80
10	Bosque pino-encino	1853.5	487.51	548.18	532.97	375.62
11	No se tiene acceso al área.					
12	Arbustos – bosque seco	819.1	241.56	458.64	07.47	111.43
13	Pastos	724.9	228.11	399.29	00.00	97.50
14	Pastos	838.6	04.16	231.89	488.45	114.10
15	Arbustos – bosque seco	892.5	289.13	482.26	00.00	121.11

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 18.

Volúmenes totales m³/año, con base en la extensión de las unidades de mapeo. Precipitación (Pp), recarga hídrica (RecHid), escorrentía (ESC), retención (RET) y evapotranspiración real (ETR) de la subcuenca Pasabién.

UM	Área Ha	Uso Actual de la Tierra	Pp m ³ /año	%	RecHid m ³ /año	%	ESC m ³ /año	%	RET m ³ /año	ETR m ³ /año	%	
1	1566.513	Bosque Encino	35,468,987	105	13,151,973	37	8,258,970	23	7,121,055	20	8,710,126	25
2	287.605	Bosque Coníferas	8,325,877	103	3,456,437	42	1,966,097	24	1,666,786	20	1,450,018	17
3	285.997	Bosque Latifoliado	8,879,635	103	2,342,716	26	3,640,656	41	1,776,556	20	1,362,118	15
4	2715.881	Arbustos – Bosque Seco	24,766,119	100	8,132,706	33	688,747	3	3,359,273	14	12,585,121	51
5	337.869	Bosque Latifoliado	10,811,808	101	7,167,958	66	0	0	2,162,564	20	1,609,202	15
6	447.212	Arboles Dispersos	7,417,905	101	3,623,982	49	484,688	7	938,877	13	2,432,297	33
7	1093.075	Arbustos	19,934,409	100	11,765,203	59	0	0	2,494,616	13	5,674,590	28
8	316.296	Bosque Coníferas	7,672,708	103	4,592,997	60	0	0	1,538,780	20	1,789,887	23
9	1631.52	Bosque Latifoliado	46,594,580	102	29,509,955	63	0	0	9,329,031	20	8,464,978	18
10	166.598	Bosque Pino-Encino	3,087,894	105	812,182	26	887,917	29	625,775	20	913,257	30
11	222.023	Bosque Latifoliado	6,340,755	102	4,015,819	63	0	0	1,269,528	20	1,151,944	18
12	285.844	Arbustos – Bosque Seco	2,341,348	100	690,485	29	21,353	1	318,516	14	1,310,995	56
13	256.149	Pastos	1,856,824	100	584,301	31	0	0	249,745	13	1,022,777	55
14	211.643	Pastos	1,774,838	100	8,804	0	1,033,770	58	241,485	14	490,779	28
15	197.482	Arbustos – Bosque Seco	1,762,527	100	570,980	32	0	0	239,170	14	952,377	54
TOTAL	10,021.71	TOTAL	187,036,215	102	90,426,499	48	16,982,198	9	33,331,758	18	49,920,466	27

En los cuadros anteriores se presentan los cálculos del balance hídrico de los suelos. Uno de los principales resultados es la escorrentía (ESC), que para las coberturas forestales de 5 unidades es de cero, mientras que con una cobertura forestal de 3 unidades se obtiene la mayor escorrentía (41%), porque tiene una de las más bajas velocidades de infiltración y la pendiente es del 40%. Es importante mencionar que la mayoría de las coberturas forestales tiene más retención; estas cantidades de agua son devueltas a la atmósfera por evaporación.

Las láminas de evapotranspiración real (ETR) son menores en áreas con pastos. Las coberturas forestales tienen más pérdidas por este factor, igual que los arbustos debido a su ubicación altitudinal y al clima.

Los volúmenes de cada variable se estimaron de acuerdo a su lámina calculada (mm) y a su extensión (ha y m²). Se observan los aportes de cada área en función de su cobertura.

Las áreas con cobertura forestal representativa son las unidades 02, 03, 05, 08, 09 y 10. Se considera la unidad 02 como completamente forestal, aun-

que sólo ocupa la mitad de la unidad, lo que da como resultado volúmenes altos en el balance hídrico.

La cobertura forestal (3,247.908 ha) tiene un aporte de 511898,064 m³/año, que equivalen al 57.39% de la recarga hídrica total de la subcuenca.

Eso significa que un manejo adecuado del 32.21 % de la extensión total de la subcuenca garantiza más del 50% de recarga hídrica disponible para satisfacer las necesidades de los diferentes sectores del área.

Las principales pérdidas en el sistema ocurren por escorrentía, evapotranspiración real y retención. A continuación se describen los volúmenes calculados.

Los volúmenes de escorrentía en general son menores en áreas con cobertura forestal (61494,670 m³/año) que con otro tipo de cobertura vegetal (101487,528 m³/año). Los valores promedio son 1,999.65 m³/ha/año para bosques y 1,548.25 m³/ha/año para otra cobertura. Los resultados indican que en el bosque existe mayor escorrentía pero se debe al cálculo con base en la extensión. Al aumentar la cobertura forestal estos valores se reducen. Cuatro de estas unidades con cobertura forestal tienen suelos con texturas franco arcillo arenosas, que son fácilmente erosionables y además garantizan la recarga hídrica, pero si se agrega a esto características topográficas como laderas (laderas escarpadas y pendiente entre 25 y 60%) la cobertura vegetal, principalmente la forestal, se torna muy importante para la protección de los suelos.

La evapotranspiración real es mayor en áreas con cobertura forestal, reportando 5,154.52 m³/ha/año, mientras para otro tipo de cobertura vegetal es de 4,898.15 m³/ha/año. Esto indica que los árboles son grandes consumidores de agua.

La cobertura forestal presenta los datos más altos con respecto a la retención o intercepción. El agua se queda en el dosel (principalmente árboles adultos y maduros) y retorna a la atmósfera a través de la evaporación.

Otra función principal de este tipo de cobertura es reducir la velocidad de impacto del agua en el suelo. Los volúmenes promedio para bosques son de 5,656 m³/ha/año y para otras coberturas vegetales son de 2,209 m³/ha/año (menos de la mitad del promedio del bosque).

En el cálculo del área total no se incluyen la superficies de poblado, minas y ríos, pues su aporte a la recarga podrían ser casi nulos. La unidad 11 se trabajó con los valores de la unidad 09 por ser la más próxima.

C. Elaboración del Mapa de Recarga Hídrica:

El principal resultado del estudio es conocer aquellas áreas que aportan más al sistema y poder así elaborar las recomendaciones respectivas para su conservación y protección, así como para el uso y manejo de los recursos hídricos y los recursos asociados.

Cuadro 19.

Recarga hídrica promedio (m³/ha/año) y su clasificación por unidad de mapeo de la subcuenca Pasabién

UM	Área ha	Uso actual de la tierra	Recarga hídrica m ³ /ha/año	Clasificación recarga hídrica
01	1566.513	Bosque encino	8,395.7	Alta
02	287.605	Bosque coníferas	12,018.0	Muy alta
03	285.997	Bosque latifoliado	8,191.4	Alta
04	2715.881	Arbustos – bosque seco	2,994.5	Media
05	337.869	Bosque latifoliado	21,215.2	Muy alta
06	447.212	Árboles dispersos	8,103.5	Alta
07	1093.075	Arbustos	10,763.4	Muy alta
08	316.296	Bosque coníferas	14,521.2	Muy alta
09	1631.52	Bosque latifoliado	18,087.4	Muy alta
10	166.598	Bosque pino-encino	4,875.1	Media
11	222.023	Bosque latifoliado	18,087.4	Muy alta
12	285.844	Arbustos – bosque seco	2,415.6	Baja
13	256.149	Pastos	2,281.1	Baja
14	211.643	Pastos	41.6	Baja
15	197.482	Arbustos – bosque seco	2,891.3	Media
Total	10,021.707			

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados anteriores indican las áreas que aportan más a la recarga hídrica de la subcuenca. Con base en la lámina que infiltra, las áreas boscosas y los arbustos (con texturas franco arcillo arenosas) son las que se clasifican con muy alta recarga, con un rango de 10,763.4 – 21,215.2 m³/ha/año y un promedio de 15,782.1 m³/ha/año. Para las unidades representativas de cobertura forestal el promedio es de 16,165.95 m³/ha/año.

Lo anterior indica que existe gran disponibilidad de agua. Si el volumen diario adecuado del líquido para una persona es de 200 litros y consideramos

un núcleo familiar de cinco personas, tenemos un consumo de 1,000 litros/día ó 1 m³/día. Para el mes serían necesarios 30 m³, por lo que se necesitan 360m³ de agua al año por familia.

Con los valores promedios obtenidos, una hectárea de bosque nos puede garantizar un abastecimiento hídrico para 44.90 familias de cinco individuos.

Las áreas de mayor recarga hídrica ocupan aproximadamente el 40% de la subcuenca y aportan el 67% al sistema.

Cuadro 20.

Análisis de la clasificación de zonas de recarga hídrica de la subcuenca Pasabién

Clasificación	Volumen m ³ /año	%	Extensión ha	%
Muy alta	60,508,370	66.91	3,888.39	38.80
Alta	19,118,671	21.14	2,299.72	22.95
Media	9,515,867	10.52	3,079.96	30.73
Baja	1,283,591	1.42	753.64	7.52
Total	90,426,499	100.00	10,021.707	100.00

Fuente: Elaboración propia.

La zona de muy alta recarga hídrica puede garantizar un suministro de agua para 174,588.71 familias ó 827,943 personas, de acuerdo con las demandas estimadas anteriormente.

Es necesario establecer áreas de protección en las márgenes de las corrientes permanentes (bosques de galería). La longitud de estos ríos principales es de 43,594 metros y las leyes del país establecen una franja de protección para los ríos de al menos 100 metros de cada lado, por lo que se estimó un área de protección de 871 hectáreas.

D. Balance hídrico:

Uno de los resultados más relevantes es el balance hídrico, que indica cuáles son las principales pérdidas o salidas de la subcuenca. En el estudio, las salidas presentan un valor mayor al de las entradas (1.94% más, que es igual a 31624,796 m³/año ó una lámina igual a 35.9 mm/año) La precipitación es la materia prima de la recarga hídrica.

La mayor pérdida en el sistema es la evapotranspiración real con 26.69%.

Cuadro 21.

Balance hídrico de la subcuenca Pasabién

Entrada	m ³ /año	Salidas	m ³ /año	%
Precipitación	187,036,215	Evapotranspiración real	49,920,466	26.69
		Retención	33,331,758	17.82
		Escurrentía	16,982,198	9.08
		Recarga hídrica	90,426,499	48.35
		Total	190,660,921	101.94

Fuente: Elaboración propia.

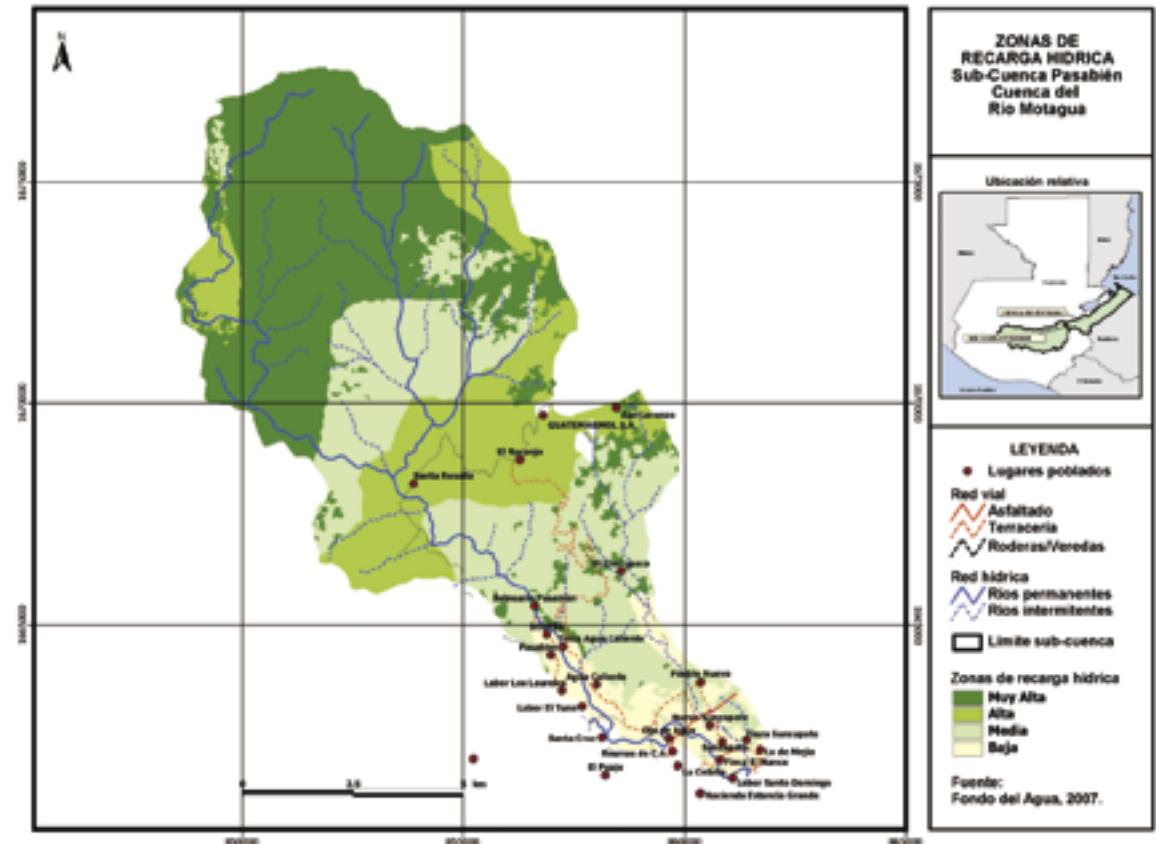


Figura 22. Zonas de recarga hídrica de la subcuenca Pasabién

Fuente: Elaboración propia.

La recarga hídrica natural potencial para la subcuenca es aproximadamente el 50% de la precipitación anual; el mayor aporte proviene de las áreas con cobertura forestal de tipo latifoliado.

La escorrentía equivale a un caudal de 538.502 litros/segundo (168.4 mm/año), 9.08% de la precipitación total. Esto contrasta con lo reportado por la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas, como caudal mensual, que es de 1,929.75 litros/segundo (603.5 mm/año), es decir el 31.92% de la precipitación de la subcuenca.

E. Recarga hídrica de Pueblo Viejo:

A continuación se presentan los valores de láminas (mm) por año de recarga hídrica y precipitación de cada unidad de mapeo y el porcentaje de precipitación que se recarga.

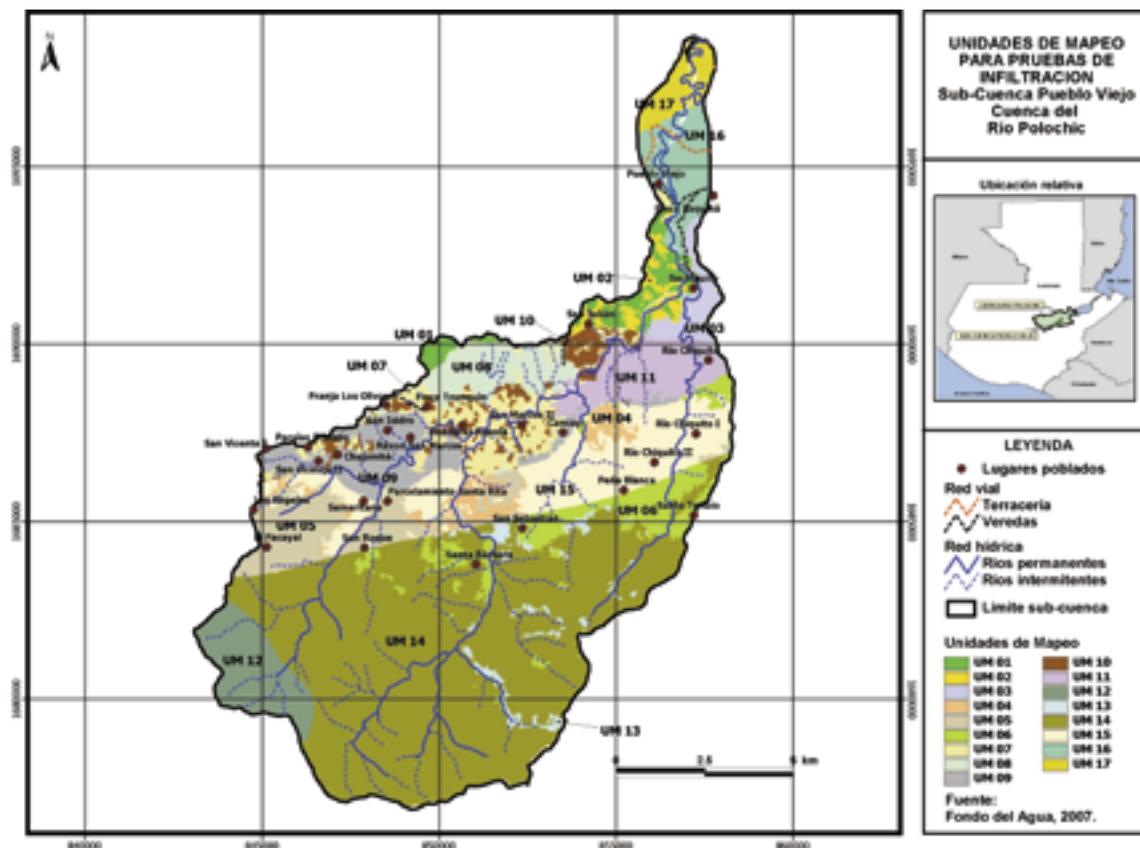


Figura 23. Unidades de mapeo para elaboración de pruebas de infiltración de la subcuenca Pueblo Viejo

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 22.
Unidades de mapeo de la subcuenca Pueblo Viejo.

Unidad de mapeo	Geología	Taxonomía de suelos	Cobertura vegetal	Extensión hectáreas	%
1	CPsr	Ld - Pd - Um	Arbustos - matorrales - Bosque latifoliado	318.404	02.14
2			Granos básicos	208.301	01.40
3			Hule	244.01	01.64
4	CPsr	Um - Pm	Arbustos - matorrales	325.843	02.19
5			Bosque latifoliado - bosque mixto	810.888	05.45
6			Cardamomo - granos básicos - hule	1,533.991	10.31
7			Pd - Eo - Eq	Arbustos - matorrales - granos básicos	737.982
		Um - Ld	Arbustos - matorrales		
8	I	Um - Ld	Bosque latifoliado	553.487	03.72
9			Cardamomo	729.055	04.90
10			Granos básicos	345.185	02.32
11			Hule	629.368	04.23
12	Pzm	Um - Pd	Bosque latifoliado	654.662	04.40
13			Arbustos - matorrales	208.301	01.40
14			Bosque latifoliado - bosque mixto	6,037.769	40.58
15			Cardamomo - granos básicos	665.077	04.47
16	Qa	Ld - Pd - Um	Arbustos - matorrales - granos básicos - hule - pastos cultivados - pastos naturales	508.851	03.42
17		Pq - Eq - Eo	Arbustos - matorrales - granos básicos - pastos cultivados y naturales	282.695	01.90
Río				84.808	00.57
Total				14,878.677	100.00

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIG - MAGA.

Estos resultados indican las áreas de mayor recarga hídrica y se establece además la relación con la precipitación. Las Unidades 01, 03-05, 07-09, 12-17, con arbustos y matorrales dieron un resultado de 85% Pp / RecHid. Las zonas con cardamomo y pastos alcanzaron entre 70 y 74 % Pp / RecHid. El bosque latifoliado y los arbustos y pastos, con suelos arcillosos, registraron entre 60 y 75 % Pp / RecHid. El hule como cobertura recarga la mitad de la precipitación, mientras que las áreas mixtas cubiertas con maíz, cardamomo y hule en suelo arcilloso recargan menos del 50%.

Cuadro 23.

Valores de láminas (mm) por año de recarga hídrica y precipitación de cada unidad de mapeo (UM) y % de Pp que se recarga %Pp / RecHid de la subcuenca Pueblo Viejo

UM	Extensión ha	Pp mm/año	Rec Hid mm/año	% Pp/RecHid
01	318.404	3292.9	2126.8	65
02	208.301	2813.5	145.3	05
03	244.01	2763.1	1397.7	51
04	325.843	3574.0	3038.8	85
05	810.888	5072.4	3410.1	67
06	1,533.991	3627.7	921.3	25
07	737.982	3574.0	3038.8	85
08	553.487	3788.6	2292.3	61
09	729.055	4294.0	3075.9	72
10	345.185	2813.5	145.3	05
11	629.368	2915.9	732.3	25
12	654.662	4214.3	2571.6	61
13	208.301	3554.5	2372.9	67
14	6,037.769	4214.3	2571.6	61
15	665.077	4012.8	2808.6	70
16	508.851	2646.1	1970.6	74
17	282.695	2626.6	1583.6	60
	84.808	Río		
	14,878.677	Total		

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, existe mucha variación en las unidades de esta subcuenca en donde el tipo de suelo y la pendiente influyen los valores obtenidos. Más adelante se analizarán los otros factores del balance hídrico.

De los ocho tipos de cobertura vegetal sólo se consideraron seis (bosque latifoliado, arbustos y matorrales, granos básicos, hule y pastos cultivados) los otros dos tienen extensiones menores a la unidad de mapeo (bosque mixto y pastos cultivados) y luego de la sobreposición son aún menos significativos. La unidad de mapeo 12 es inaccesible por lo tanto no se realizará la respectiva prueba de infiltración.

Cuadro 24.

Análisis físico de suelos con las muestras de las pruebas de infiltración (PI) de la subcuenca Pueblo Viejo

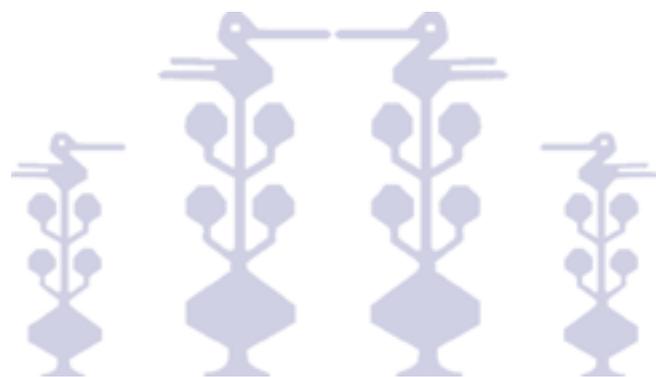
PI	Densidad aparente gr/cc	Constantes de humedad		%			Textura
		Capacidad de campo 1/3 atm	Punto de marchitez permanente 15 atm	Arcilla	Limo	Arena	
01	1.2121	17.53	11.30	31.08	23.10	45.82	Franco arcillo arenoso
02	1.1111	33.80	14.17	35.28	54.22	10.50	Franco arcillo limoso
03	1.1111	32.25	15.55	47.88	46.20	05.92	Arcillo limoso
04	1.1111	25.83	17.16	49.98	29.40	20.62	Arcilloso
05	0.7692	51.33	35.36	29.36	37.42	33.22	Franco arcilloso
06	1.1429	12.43	04.17	10.46	18.52	71.02	Franco arenoso
07	0.7547	55.78	39.34	48.26	37.04	14.90	Arcilloso
08	1.1111	40.04	20.91	48.64	45.44	05.92	Arcilloso
09	0.9524	29.51	15.59	17.14	30.74	52.12	Franco arenoso
10	1.0526	29.40	18.49	33.94	24.44	41.62	Franco arcillo arenoso
11	1.1111	40.00	12.85	31.84	64.34	03.82	Franco limoso
12	0.8163	0.8163	27.00	36.04	49.64	14.32	Franco arcillo limoso
13	1.3333	1.3333	05.78	15.04	24.44	60.52	Franco arenoso
14	1.1765	1.1765	08.12	23.44	49.64	26.92	Franco

Fuente: Elaboración propia.

De estos datos se extraen resultados finales del balance hídrico y permiten establecer el comportamiento de las velocidades de las pruebas de infiltración. Con base en las texturas se puede establecer cuál será la recarga hídrica. Las texturas livianas como las arenas favorecerán la recarga, el inconveniente es que parte del agua se traslada a capas más profundas, lo que reduce la disponibilidad en el suelo. Las texturas pesadas, como las arcillas, limitan la recarga. Entonces, las texturas medias son las que aportarán más volumen a la recarga y disponibilidad de agua en el suelo.

A lo anterior hay que agregar el factor de la pendiente del terreno. Su importancia se debe al tiempo de contacto del agua con la superficie. Las áreas con altas pendientes reducen la infiltración de la lluvia que se convierte en escorrentía superficial y en el suelo sin ninguna protección provoca erosión hídrica. Por ello es fundamental el bosque, pues cumple la función de proteger el suelo, la captación y la regulación hidrológica. La foresta reduce el impacto de las gotas y aumenta el tiempo de contacto del agua en el suelo, lo que reduce la escorrentía.

El cuadro 25 indica los aportes de cada unidad de mapeo de acuerdo con los cálculos del balance hídrico. La escorrentía (ESC) en las unidades con bosque latifoliado, arbustos, cardamomo y pastos con pendiente 0 no existe; las que sí presentan valores importantes son las coberturas de granos básicos (suelo arcilloso), cardamomo y hule con porcentajes (con base en la precipitación) de 67, 43 y 31 % respectivamente. Hay datos bajos reportados también en el bosque latifoliado y hule. En general las coberturas vegetales con alturas mínimas de entre 2 y 3 metros también cumplen con una función protectora de los suelos, igual que las masas forestales.



Cuadro 25.

Valores de láminas en mm/año de las unidades de mapeo de los factores recarga hídrica (Rec Hid), precipitación (Pp), evapotranspiración real (ETR), escorrentía (ESC) y retención (RET) de la subcuenca Pueblo Viejo

UM	Uso actual	Pp mm/año	Rp mm/año	ETR mm/año	ESC mm/año	Ret mm/año
01	Arbustos	3292.9	2126.8	771.0	0.0	395.1
02	Maíz	2813.5	145.3	437.1	1893.5	337.6
03	Hule	2763.1	1397.7	765.6	86.5	552.6
04	Arbustos	3574.0	3038.8	753.7	0.0	428.9
05	Bosque latifoliado	5072.4	3410.1	647.8	0.0	1014.5
06	Cardamomo	3627.7	921.3	719.8	1560.4	435.3
07	Arbustos	3574.0	3038.8	753.7	0.0	428.9
08	Bosque latifoliado	3788.6	2292.3	738.5	0.0	757.7
09	Cardamomo	4294.0	3075.9	702.8	0.0	515.3
10	Maíz	2813.5	145.3	437.1	1893.5	337.6
11	Hule	2915.9	732.3	771.2	905.4	583.2
12	No se tiene acceso al área					
13	Arbustos	3554.5	2372.9	755.1	0.0	426.5
14	Bosque latifoliado	4214.3	2571.6	708.4	91.4	842.9
15	Cardamomo	4012.8	2808.6	722.7	0.0	481.5
16	Pastos	2646.1	1970.6	732.4	0.0	318.0
17	Pastos	2626.6	1583.6	746.5	0.0	315.7

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 26.

Volúmenes totales m³/año, con base en la extensión de las unidades de mapeo de precipitación (Pp), recarga hídrica (RecHid), escorrentía (ESC), retención (RET) y evapotranspiración real (ETR) de la subcuenca Pueblo Viejo.

UM	Area Ha	Uso Actual Tierra	Pp m ³ /año	%	Ret m ³ /año	%	ESC m ³ /año	%	ETR m ³ /año	%	Rec Hid m ³ /año	%
1	318.404	Arbustos	10,487,871	100	1,258,545	12	0	0	2,455,521	23	6,773,795	65
2	208.301	Maíz	5,866,123	100	703,935	12	3,947,897	67	911,433	16	302,858	5
3	244.01	Hule	6,719,883	101	1,343,977	20	210,250	3	1,861,930	28	3,399,093	51
4	325.843	Arbustos	11,629,923	101	1,395,591	12	0	0	2,452,491	21	7,888,370	68
5	810.888	Bosque Latifoliado	41,121,857	100	8,224,371	20	0	0	5,251,765	13	27,645,672	67
6	1,533.99	Cardamomo	55,586,749	100	6,670,410	12	23,909,839	43	11,029,411	20	14,116,789	25
7	737.982	Arbustos	26,326,370	103	3,159,164	12	0	0	5,551,644	21	18,384,061	70
8	553.487	Bosque Latifoliado	20,939,334	100	4,187,867	20	0	0	4,081,837	19	12,669,606	61
9	729.055	Cardamomo	31,281,513	100	3,753,782	12	0	0	5,119,991	16	22,407,739	72
10	345.185	Maíz	9,689,653	100	1,162,758	12	6,521,130	67	1,505,503	16	500,261	5
11	629.368	Hule	18,320,411	103	3,664,082	20	5,688,853	31	4,845,278	26	4,601,063	25
12	654.662	Bosque Latifoliado	27,553,300	100	5,510,660	20	597,476	2	4,631,779	17	16,813,382	61
13	208.301	Arbustos	7,407,656	100	888,919	12	0	0	1,573,551	21	4,945,186	67
14	6,037.77	Bosque Latifoliado	254,221,126	100	50,844,225	20	5,512,629	2	42,735,206	17	155,129,036	61
15	665.077	Cardamomo	26,641,100	100	3,196,932	12	0	0	4,797,868	18	18,646,279	70
16	508.851	Pastos	13,452,782	99	1,616,543	12	0	0	3,723,375	28	8,018,391	60
17	282.695	Pastos	7,409,640	101	890,623	12	0	0	2,105,942	28	4,467,342	60
	14,793.87	TOTAL	574,655,291	102	98,472,383	17	46,388,074	8	104,634,525	18	334,708,923	58

Fuente: Elaboración propia.

Se estimó en lámina (mm) el aporte de cada unidad de muestreo y los factores. Los volúmenes fueron calculados a partir de la extensión (ha y m²). Con esta tabla podemos conocer las contribuciones al sistema en función de la cobertura vegetal.

El área con mayor aporte de recarga hídrica es la unidad 14 (bosque latifoliado), que contribuye con un 46.35% del total. Las áreas con cobertura

forestal latifoliada tienen una recarga de 212,257,696 m³/año, 63.42% del total y cubren una extensión de 8,050 hectáreas, correspondientes al 54.57% de la subcuenca.

Otra cobertura considerada como forestal es el hule que tiene un aporte de 8,000,157 m³/año (02.39% de la recarga hídrica total) y cubre una superficie de 872 hectáreas (05.9% de la subcuenca).

El manejo adecuado de esta subcuenca, al menos del 50%, nos garantiza un recarga hídrica mayor en un 60% que la calculada con cobertura boscosa que se encuentra ubicada principalmente en la zona núcleo del área protegida.

Las principales pérdidas en el balance hídrico suceden por la evapotranspiración real y la retención o intercepción. El bosque latifoliado es el que más volumen pierde por este factor, seguido por el cardamomo, de acuerdo a lámina (mm/año). Los bosques tienen más pérdidas en algunos factores y favorecen otros.

La escorrentía es menor en las áreas con cobertura vegetal forestal, de arbustos y cardamomo. Los pastos no reportan valores, pero eso se debe a la pendiente de las unidades.

Existe mayor escorrentía en la cobertura de cardamomo. Esta unidad tiene una de las menores velocidades de infiltración, principalmente cuando ocurren precipitaciones intensas; además estos suelos están húmedos durante todo el año.

Las pérdidas por evapotranspiración real se describen en promedios de acuerdo con la cobertura vegetal: bosque latifoliado: 6,781.23 m³/ha/año; hule: 7,683.84 m³/ha/año; arbustos: 7,599.04 m³/ha/año; cardamomo: 7,113.04 m³/ha/año; pastos: 7,394.47 m³/ha/año y maíz: 4,371.38 m³/ha/año. La mayor pérdida reportada por este factor es para los arbustos. Estos datos tienen variaciones de acuerdo con la ubicación altitudinal de las unidades.

De acuerdo con el volumen total de metros cúbicos por año, el bosque latifoliado (UM14) es el que más contribuye, debido a su extensión.

La unidad 12 se trabajó con los datos de campo de la UM 14 por no tener acceso al área.

F. Elaboración del Mapa de Recarga Hídrica:

El objetivo principal del estudio es establecer aquellas áreas que más contribuyen a la subcuenca para elaborar recomendaciones para su conservación y protección, haciendo énfasis en el uso y manejo adecuado de los recursos hídricos y recursos asociados.

El cuadro 27 nos indica cuáles son las áreas que más recarga hídrica tienen en la subcuenca. Cuando el uso de la tierra es la siembra de maíz la recarga es baja (suelos arcillosos, reportan la menor velocidad de infiltración en la subcuenca). En las áreas clasificadas con recarga hídrica muy alta

encontramos suelos que tienen todo el tiempo humedad disponible, de acuerdo al balance hídrico.

Las unidades con muy alta recarga tienen cobertura de tipo bosque latifoliado y reportan un promedio de recarga hídrica de 27,580.17 m³/ha/año. Los arbustos tienen un promedio de 26,443.45 m³/ha/año, el cardamomo tiene 22,685.84 m³/ha/año y los pastos presentan un promedio menor con 17,770.87 m³/ha/año.

Cuadro 27.

Recarga hídrica promedio (m³/ha/año) y su clasificación por unidad de mapeo en la subcuenca Pueblo Viejo

UM	Área ha	Uso de la tierra	Recarga hídrica m ³ /ha/año	Clasificación recarga hídrica
01	318.404	Arbustos	21,267.80	Muy alta
02	208.301	Maíz	1,452.56	Baja
03	244.01	Hule	13,976.54	Muy alta
04	325.843	Arbustos	30,388.35	Muy alta
05	810.888	Bosque latifoliado	34,100.99	Muy alta
06	1,533.991	Cardamomo	9,212.81	Muy alta
07	737.982	Arbustos	30,388.35	Muy alta
08	553.487	Bosque latifoliado	22,923.12	Muy alta
09	729.055	Cardamomo	30,758.74	Muy alta
10	345.185	Maíz	1,452.56	Baja
11	629.368	Hule	7,323.04	Alta
12	654.662	Bosque latifoliado	25,716.40	Muy alta
13	208.301	Arbustos	23,729.30	Muy alta
14	6,037.769	Bosque latifoliado	25,716.40	Muy alta
15	665.077	Cardamomo	28,085.97	Muy alta
16	508.851	Pastos	19,705.73	Muy alta
17	282.695	Pastos	15,836.02	Muy alta
Total	14,793.869			

Fuente: Elaboración propia.

El uso de la tierra para el cultivo del maíz registra la más baja recarga con 1,452.56 m³/ha/año. El hule presenta datos medios (clasificación baja y alta recarga hídrica) con un promedio de 10,649.786 m³/ha/año.

Si una persona necesita al año un volumen de agua de 72 m³/año (200 litros/días), una hectárea de terreno con bosque latifoliado, de recarga hídrica muy alta, puede abastecer a 383 personas por año.

Cuadro 28.

Clasificación de zonas de recarga hídrica de la subcuenca Pueblo Viejo

Clasificación	Vol m ³ /ha/año	%	Extensión ha	%
Muy alta	329,304,740.68	98.39	13596.8	92.01
Alta	4,601,063.37	1.37	628.3	4.25
Baja	803,119.35	0.24	552.9	3.74
	334,708,923.41	100.00	14,778.00	100.00

Fuente: Elaboración propia.

La subcuenca es una zona de recarga hídrica muy alta en casi su totalidad, las actividades productivas deben estar sujetas a un manejo especial o ser de bajo impacto para el suelo.

La zona de muy alta recarga tiene la disponibilidad de suministrar el vital liquido a 4,573,677 personas.

Es importante mantener los bosques de galería para la protección de los ríos. Las corrientes permanentes de la subcuenca tienen una longitud de 53,645 metros y las leyes del país establecen áreas de protección a las riberas de los ríos de al menos 100 metros a cada lado. Según estos parámetros, el área protegida de Pueblo Viejo será igual a 1,072.9 hectáreas.

G. Balance hídrico:

Aquí se indican las principales pérdidas o salidas de la subcuenca. En el estudio las salidas presentan un valor mayor al de las entradas, 01.66%, que equivale a 9,548,614 m³/año o una lámina igual a: 64.2 mm/año (precipitación = materia prima para que exista recarga hídrica).

La recarga hídrica para la subcuenca es más del 50% de la precipitación de la zona y se da principalmente en aquellas áreas con cobertura forestal de tipo latifoliado. Las mayores pérdidas de la subcuenca ocurren por la evapotranspiración real que equivale a un 18.21% de la precipitación.

La escorrentía equivale a un caudal de 1,470.96 litros/segundo (311.7 mm/año) o sea el 8.07% de la precipitación. Haciendo una comparación con

Cuadro 29.

Balance hídrico de la subcuenca Pueblo Viejo

Entrada	m ³ /año	Salidas	m ³ /año	%
Precipitación	574,655,291	Evapotranspiración real	104,634,525	18.21
		Retención	98,472,383	17.14
		Escorrentía	46,388,074	8.07
		Recarga hídrica	334,708,923	58.25
		Total	584,203,905	101.66

Fuente: Elaboración propia.

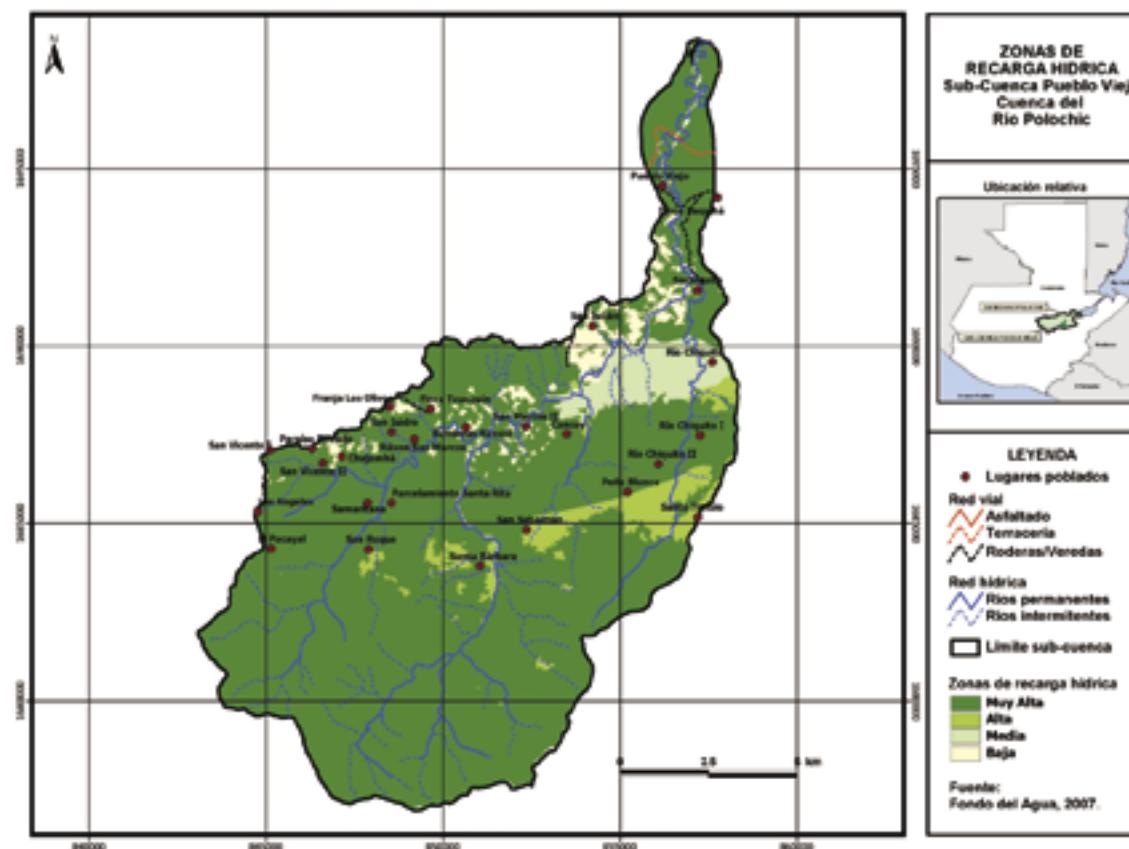


Figura 24. Zonas de recarga hídrica de la subcuenca Pueblo Viejo.

Fuente: Elaboración propia.

los datos tomados por la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas (caudal mensual) se estimó un caudal de 9,428.7 litros/segundo (1,998.4 mm/año) es decir 45.86% de la precipitación media estimada para la subcuenca. Esta gran diferencia se debe al aporte de otras subcuencas vecinas. Esto se comprenderá mejor con el estudio hidrogeológico.

H. Tendencias y escenarios del balance hídrico:

Las tendencias de deforestación entre 1999 y el 2003 mostraron una relación directamente proporcional al aumento relativo de la escorrentía. En la subcuenca Pasabién este incremento fue del 1.38 % al 9.08 % y en la subcuenca Pueblo Viejo fue menor al 0.38% en 1999 y del 8 % del total del balance hídrico en 2003.

Cuadro 30.

Balance hídrico, de acuerdo con la cobertura vegetal en la subcuenca Pasabién, 2003 y 1999

Pasabién 1999				
Entrada	m ³ /año	Salidas	m ³ /año	%
Precipitación	208,776,094	Evapotranspiración real	50,649,190	26.69
		Retención	37,194,138	16.62
		Escorrentía	3,082,198	1.38
		Recarga hídrica	139,850,389	59.37
Total		190,660,921	101.94	

Pasabién 2003				
Entrada	m ³ /año	Salidas	m ³ /año	%
Precipitación	187,036,215	Evapotranspiración real	49,920,466	26.69
		Retención	33,331,758	17.82
		Escorrentía	16,982,198	9.08
		Recarga hídrica	90,426,499	48.35
Total		190,660,921	101.94	

En la subcuenca Pasabién, este aumento de escorrentía debida a la deforestación afecta directamente la recarga hídrica que disminuye de 59% en 1999 a 48% en 2003. Los demás valores muestran un comportamiento constante en ambos escenarios (ver cuadros 26 y 27). En el caso de la subcuenca Pueblo Viejo la deforestación y el aumento de escorrentía afectan de igual manera y la acción deforestadora baja de 64, en 1999, % a 58%, en 2003. Se puede inferir que la deforestación afecta directamente los valores de escorrentía y de manera inversa la recarga hídrica.

Cuadro 31.

Balance hídrico de acuerdo con la cobertura vegetal en la subcuenca Pueblo Viejo, 2003 y 1999

Pueblo Viejo 1999				
Entrada	m ³ /año	Salidas	m ³ /año	%
Precipitación	601,573,700	Evapotranspiración real	106,789,883	17.75
		Retención	98,472,383	17.75
		Escorrentía	172,236	0.03
		Recarga hídrica	387,866,858	64.47
Total		584,203,905	100.00	

Pueblo Viejo 2003				
Entrada	m ³ /año	Salidas	m ³ /año	%
Precipitación	574,655,291	Evapotranspiración real	104,634,525	18.21
		Retención	98,472,383	17.14
		Escorrentía	46,388,074	8.07
		Recarga hídrica	334,708,923	58.25
Total		584,203,905	101.66	

Oferta hídrica, aspectos cualitativos

A. Monitoreo hídrico en la subcuenca Pasabién:

Con los registros de monitoreo hídrico (TDS) de la subcuenca se estimaron las pérdidas de suelo, lo que da una erosión total por acción del agua de 0.741 ton/ha/año.

Es importante mencionar los datos de sedimentación reportados por la hidroeléctrica, que en el período de funcionamiento vio azolverse dos veces completamente el embalse (70,000 m³), un volumen total de 140,000 m³ en ocho años. De acuerdo con estos datos tenemos un volumen de erosión de 17,500 m³/año que ocurre en una extensión de 6,671.45 hectáreas.

De acuerdo con la densidad aparente promedio de los suelos de la parte alta de la subcuenca que es de 1.3 gr/cc se estimó una erosión total de 3.2 ton/ha/año. Este es un dato más exacto para la parte alta y media de la subcuenca.

Se cuenta con datos bimensuales de calidad hídrica a diferentes altitudes o puntos de la subcuenca. Los puntos son: 01 Parte alta (A) arriba del

embalse (800 msnm). 02 Parte media (M) Balneario Pasabién, abajo del desfogue de la casa de máquinas de la hidroeléctrica (300 msnm). 03 Parte baja (B) puente La Ceiba (200 msnm).

Parámetros físicos

A continuación se describen ampliamente los parámetros físicos del agua muestreada en la cuenca Pasabién:

Cuadro 32.

Parámetros físicos de la subcuenca Pasabién, 2005

Mes	Ene	Mar	May	Jul	Sep	Nov
Oxígeno disuelto mg / litro						
A	8.02	7.58	8.02	5.49	2.49	2.56
M	8.59	8.99	8.56	5.47	2.74	5.49
B	6.25	6.39	7.99	5.49	5.22	3.72
Conductividad eléctrica micro simmons /cm						
A	9.91	34.5	31.2	41.1	27.4	22.1
M	18.64	84.8	56.9	95.7	32.2	151.5
B	133.9	519	470	195	125.9	91.5
Sólidos disueltos totales mg/litro						
A	4.2	16	14.4	20.6	12.6	10
M	8.4	40.1	26.7	45.4	15.1	72.2
B	63.7	251	227	93.3	59.9	43.3
Temperatura °C						
A	18	21.7	21.4	22.3	22.8	19.1
M	16.1	24.8	20.9	23.7	21.8	20.9
B	26.5	30.1	28	26.6	26.2	22.6

La concentración de oxígeno disuelto a lo largo de la subcuenca tiene un aumento entre la parte alta y media debido al uso del agua por la hidroeléctrica en las turbinas de generación, lo que aumenta la concentración. Posteriormente en la parte baja la concentración se reduce por factores de contaminación. Esta tendencia se mantiene a lo largo del año.

La conductividad eléctrica tiene relación directa con los sólidos disueltos totales. Estos parámetros aumentan según la ubicación entre la parte alta, media y baja de la subcuenca, lo que indica que existen pérdidas de suelo por los diferentes usos de la tierra en las partes medias y bajas del área.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la RBSM

Parámetros químicos

Cuadro 33.

Parámetros químicos de la subcuenca Pasabién, 2005

Mes	Ene	Mar	May	Jul	Sep	Nov
pH						
A	7.63		7.8	6.88	7.07	7.14
M	7.63		7.86	7.99	7.17	8.33
B	7.9		8.36	7.81	7.65	7.92
Fosfatos (PO4 3-) miligramos / litro						
A	0.04	0.08	0.04	0.28	0.05	0.11
M	0.08	0.08	0.07	0.51	0.15	0.07
B	0.27	0.33	0.27	0.01	0.12	0.26
Nitritos (NO2 -N) miligramos / litro						
A	0.006	0.004	0.003	0.014	0.003	0.001
M	0.004	0.002	0.004	0.005	0.003	0.001
B	0.005	0.003	0.004	0.006	0.003	pdn
Nitratos (NO3 -N) miligramos / litro						
A	2.7	12	1.4	2.5	0.9	pdn
M	2.5	11.2	1.1	0.9	1.7	pdn
B	2.5	8.2	1.8	0.8	0.8	1.5
Amoníaco (NH3 -N) miligramos / litro						
A	0	0.02	pdn	0	0	0.18
M	0	0.05	0	Pdn	0	0.18
B	0	0	0.01	0	0	0.15

El pH se mantiene entre los rangos permisibles durante todo el año. Este parámetro tiene relación directa con el amoníaco que puede causar la muerte de peces. En la subcuenca las concentraciones son bajas, lo permisible es 1.5 mg/l, que no se registra en ningún punto.

La concentración de fosfatos para la mayoría de los puntos registró valores permisibles de acuerdo con lo establecido por la Organización Mundial de la Salud (1.3 mg/l). Cualquier aumento en esta concentración se debe a: descargas fecales, detergentes y fertilizantes orgánicos, lo que puede provocar eutrofización acelerada.

El límite máximo permisible de nitritos, de acuerdo con COGUANOR, es de 0.010 mg/l y no existen registros mayores que esa cantidad.

El límite máximo permisible para nitratos es de 10 mg/l y solo existe un registro arriba de este rango, para el mes de marzo, en la parte media de la subcuenca.

Fuente: Elaboración propia con base en datos RBSM.

En marzo no se tienen datos de pH. Nitritos, nitratos y amoníaco presentan datos anormales para ese mes.

De acuerdo con los registros, el agua de la subcuenca Pasabién se mantiene con una alta calidad, pero existe un problema con los nitratos en el mes de marzo. Es importante establecer con certeza cuál es la fuente de contaminación que aumenta estas concentraciones, aunque intuitivamente se puede decir que se debe a la aplicación de fertilizantes; asimismo es de gran importancia identificar los patrones de las prácticas agrícolas de la zona.

B. Erosión hídrica de Pueblo Viejo:

Los registros de monitoreo hídrico de la RBSM de la subcuenca permitieron conocer la pérdida por acción del agua con los valores de TDS, siendo esta de 0.233 ton/ha/año. Este es un dato aproximado con informaciones bimensuales y caudales mensuales.

Parámetros físicos

Cuadro 34.

Parámetros físicos de la subcuenca Pueblo Viejo, 2005

Feb	Abr	May	Jul	Sep	Nov
Oxígeno disuelto mg/litro*					
12.82	11.45	0.02	01.11	01.88	16.11
Conductividad eléctrica micro simmons /cm					
42.0	-	30.6	26.4	34.9	0.79
Sólidos disueltos totales mg/litro					
-	-	14.1	12.1	16.2	04.2
Temperatura °C					
28.0	29.7	28.0	24.1	26.9	24.1

* Para el oxígeno disuelto existe una reducción drástica en el mes de mayo, los otros parámetros no sobrepasan los límites permisibles.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la RBSM.

Parámetros químicos

Cuadro 35.

Parámetros químicos de la subcuenca Pueblo Viejo, 2005

Feb	Abr	May	Jul	Sep	Nov
pH					
7.83	7.65	6.70	6.94	6.05	7.50
Fosfatos (PO4 3-) miligramos / litro					
0	0.06	0.31	0.19	0.87	0.19
Nitritos (NO2 -N) miligramos / litro					
0	0.015	0.003	0.007	0.004	0.008
Nitratos (NO3 -N) miligramos / litro					
-	2.18	-0.5	0.4	0.8	0.2
Amoníaco (NH3 -N) miligramos / litro					
0.005	-	0.07	-	-0.002	0.03

La calidad del agua de la subcuenca tiene un comportamiento estable a lo largo del tiempo y ningún parámetro reporta arriba de los niveles permisibles.

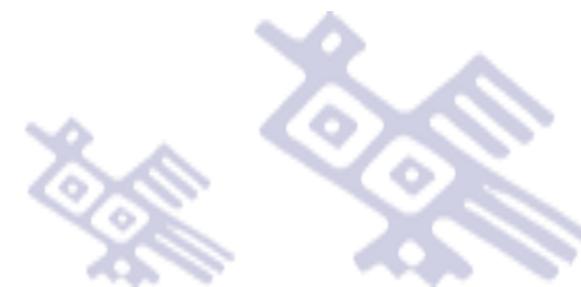
Fuente: Elaboración propia con base en datos RBSM.

C. Modelo de erosión:

En la página siguiente se presentan los resultados de los cálculos de erosión de acuerdo con el Mapa de Susceptibilidad de Erosión (MAGA, 2003).

Los resultados muestran una susceptibilidad de erosión bastante alta en ambas cuencas: 8,7 TM/ha/año en la subcuenca Pasabién y 9.6 TM/ha/año en la subcuenca de Pueblo Viejo.

Estos datos sirvieron, junto a aquellos de acumulación de sedimentos en un embalse hidroeléctrico en Pasabién, para validar y calibrar los modelos de erosión utilizando RUSLE y el factor de ajuste para obtener la sedimentación de las dos subcuencas.



Cuadro 36.

Resultados de erosión estimada de acuerdo con el Mapa de Susceptibilidad a la erosión, subcuenca Pasabién (MAGA. 2003)

Subcuenca Pasabien	Sin Erosión	Erosión Tolerable	Erosión Moderada	Erosión Severa	Total
Área (ha)	1,700.0	6,875.0	1,575.0	75.0	10,225.0
Erosión potencial promedio (TM/ha)		5.0	30.0	100.0	
Erosión potencial total (TM)		34,375.0	47,250.0	7,500.0	89,125
% de erosión		38.6	53.0	8.4	100.0
% de superficie total	16.6	67.2	15.4	0.7	100.0
Promedio de erosión / ha	8.7 TM/ha/año				

Cuadro 37.

Resultados de erosión estimada de acuerdo con el Mapa de Susceptibilidad a la erosión, subcuenca Pueblo Viejo (MAGA. 2003)

Subcuenca Pueblo Viejo	Sin Erosión	Erosión Tolerable	Erosión Moderada	Erosión Severa	Total
Área (ha)	2,625.0	9,250.0	2,875.0	100.0	14,850.0
has		5.0	30.0	100.0	
erosX/ha		46,250.0	86,250.0	10,000.0	142,500.0
% de erosión		32.5	60.5	7.0	100.0
% de superficie total	17.7	62.3	19.4	0.7	100.0
Promedio de erosión / ha	9.6 TM/ha/año				

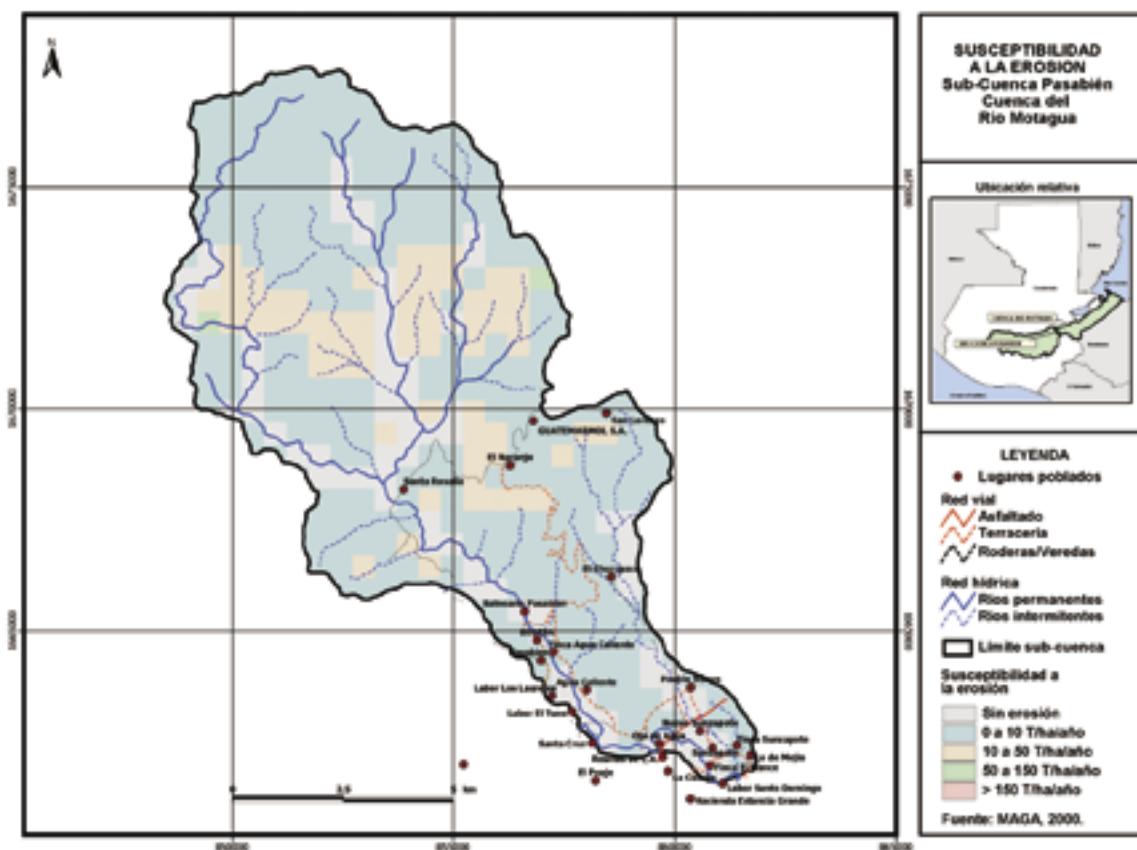


Figura 25a. Susceptibilidad a la erosión de la subcuenca Pasabién

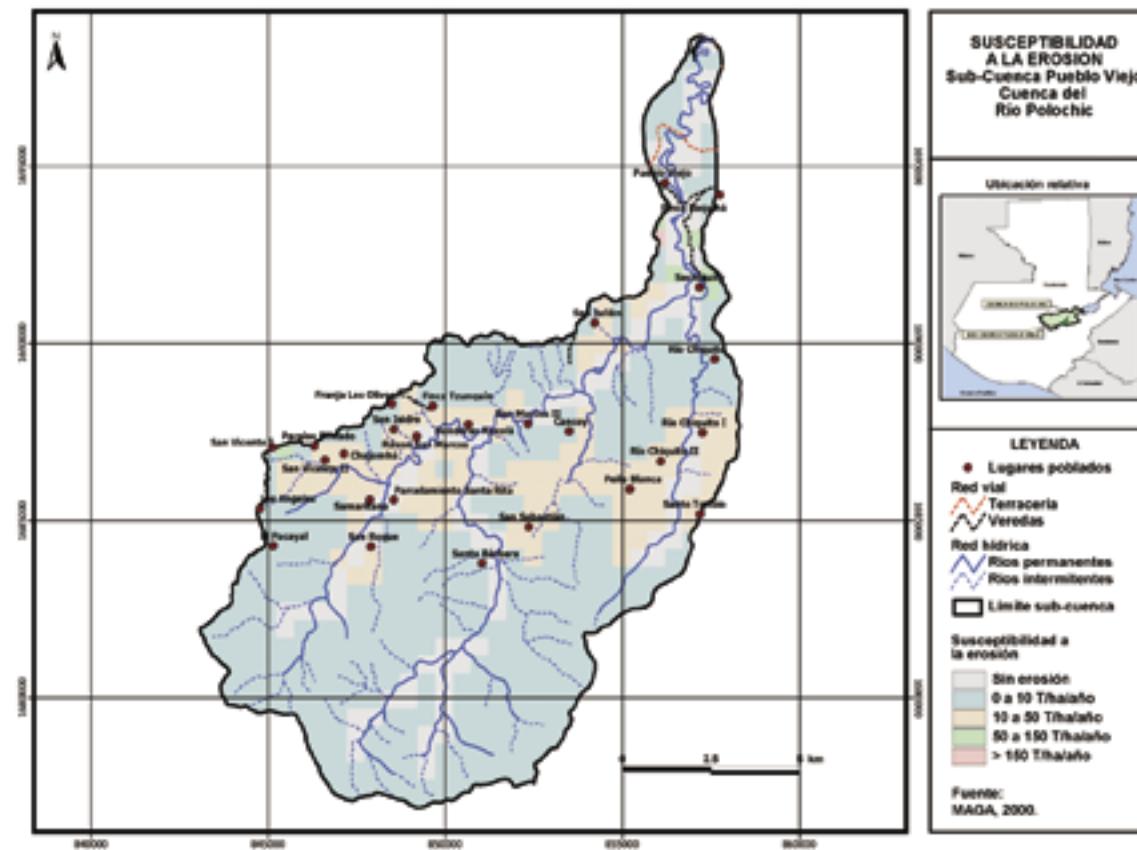


Figura 25b. Susceptibilidad a la erosión de la subcuenca Pueblo Viejo

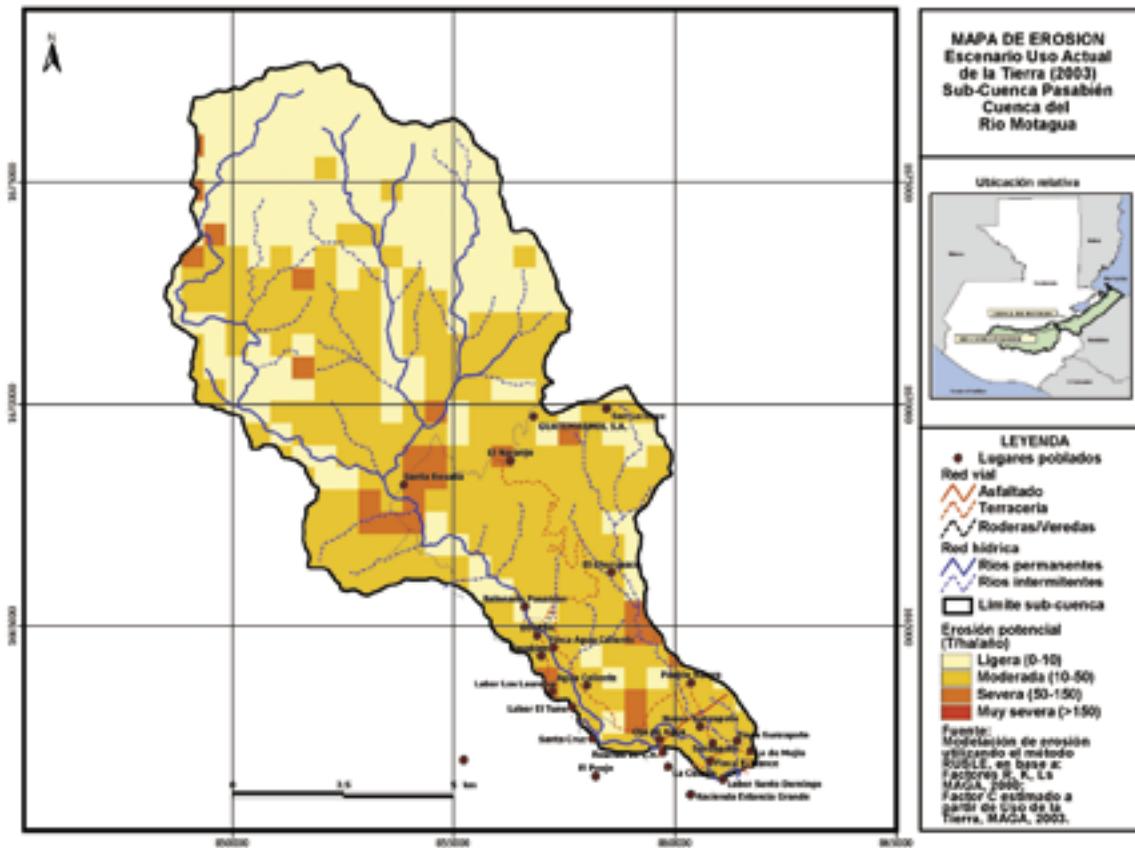


Figura 26a. Mapa de Erosión (escenario uso actual de la tierra (2003)) subcuenca Pasabién

En este sentido se corrió el modelo con información cartográfica emanada por el Ministerio de Agricultura en el 2003, obteniéndose, principalmente, los siguientes resultados:

Se evidenció que el aporte de sedimentos en las partes medias y bajas de las subcuencas es crítico. El aporte total de erosión en las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo es de 236,000 y 586,000 TM/año, lo que corresponde a 23.5 y 38.7 TM/ha/año, respectivamente. Esto es alarmante si se considera que los valores de erosión tolerables por hectárea, de acuerdo con varios autores, oscila entre 4 y 12 TM/ha/año. Es aún más preocupante la evidencia de que existen áreas (5% para la subcuenca Pasabién y 32 % de la subcuenca Pueblo Viejo) que aportan en promedio 100% o más TM/ha/año.

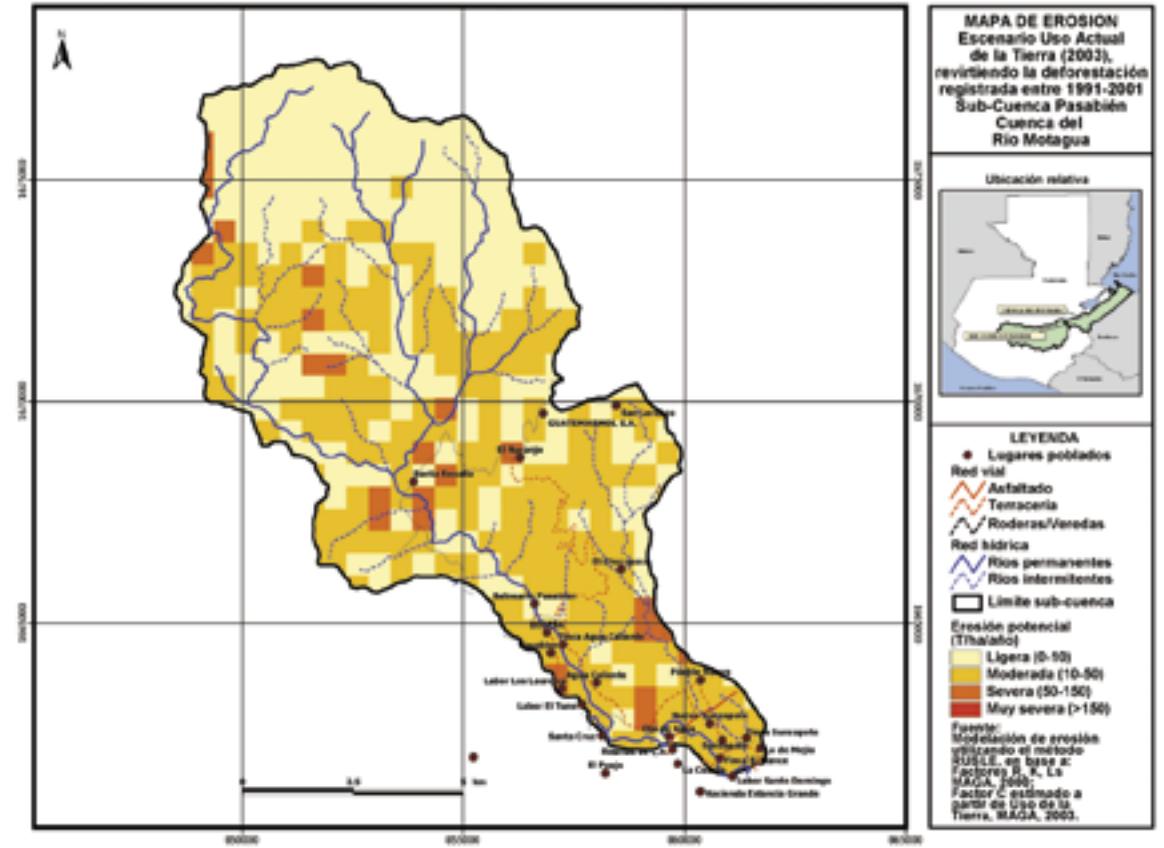
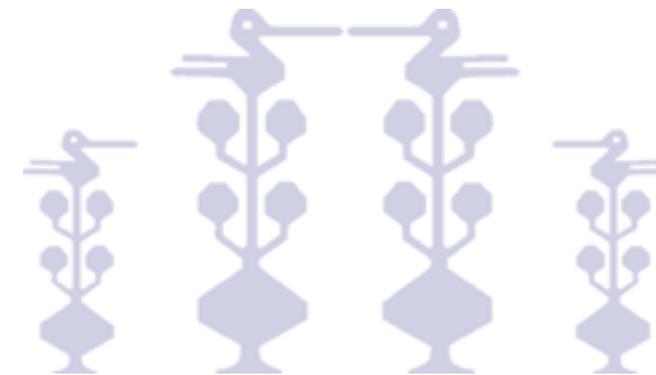


Figura 26b. Mapa de Erosión (Escenario uso actual de la tierra (2003)) subcuenca Pasabién, revertiendo erosión registrada entre 1991-2003.



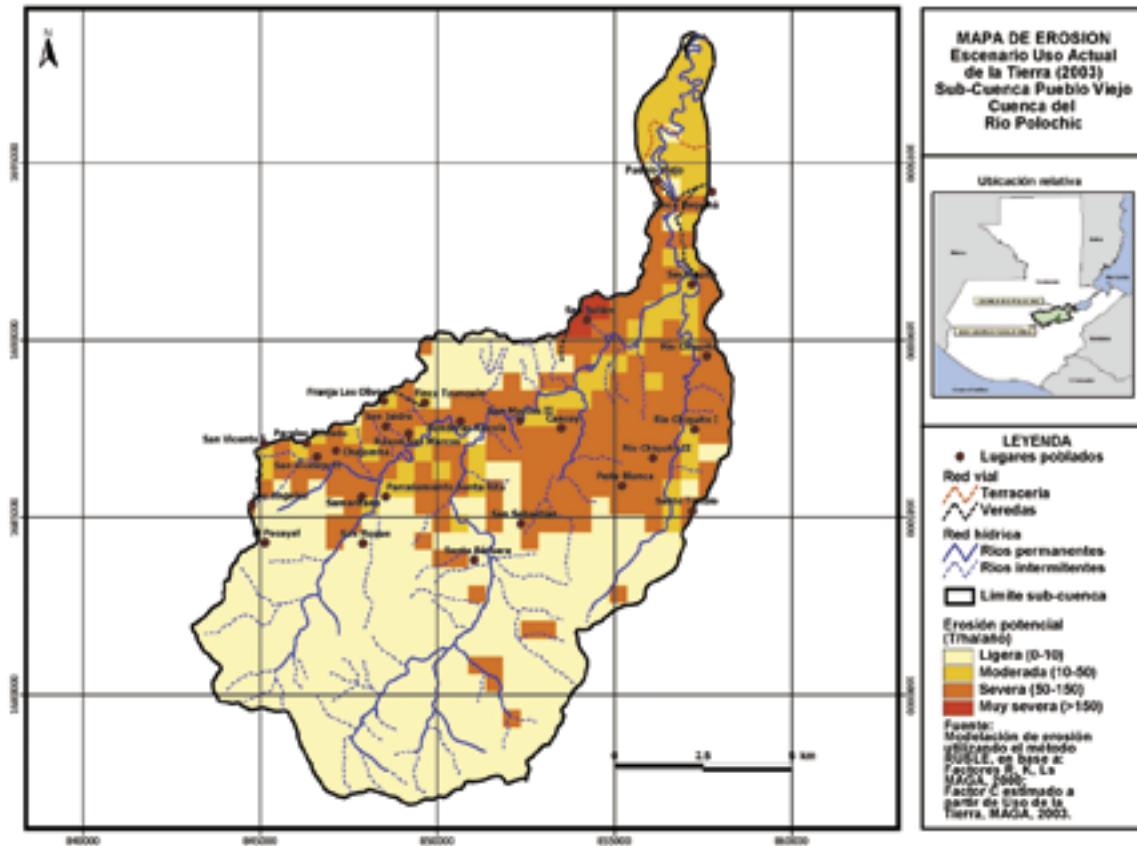


Figura 27a. Mapa de Erosión (escenario uso actual de tierra (2003)) subcuenca Pueblo Viejo

En la subcuenca Pasabién 550 hectáreas (5.5 % de la superficie total), ubicadas en la parte media de la subcuenca aportan el 23.3 % de la erosión. En Pueblo Viejo 4,700 hectáreas (32% de la superficie total de la subcuenca) aportan el 84 % de la erosión. Las áreas que presentan una mayor de erosión están ubicadas en la parte media de la cuenca. En la subcuenca de Pueblo Viejo es importante destacar que la áreas pobladas son las que aportan mayor erosión, con un promedio de 100 TM/ha (erosión severa) y 150 TM/ha (muy severa).

Los modelos realizados evidenciaron que el incremento de la erosión está ligado a la deforestación. En este sentido se estimó una deforestación de aproximadamente 900 y 600 ha para las subcuencas de Pasabién y Pueblo

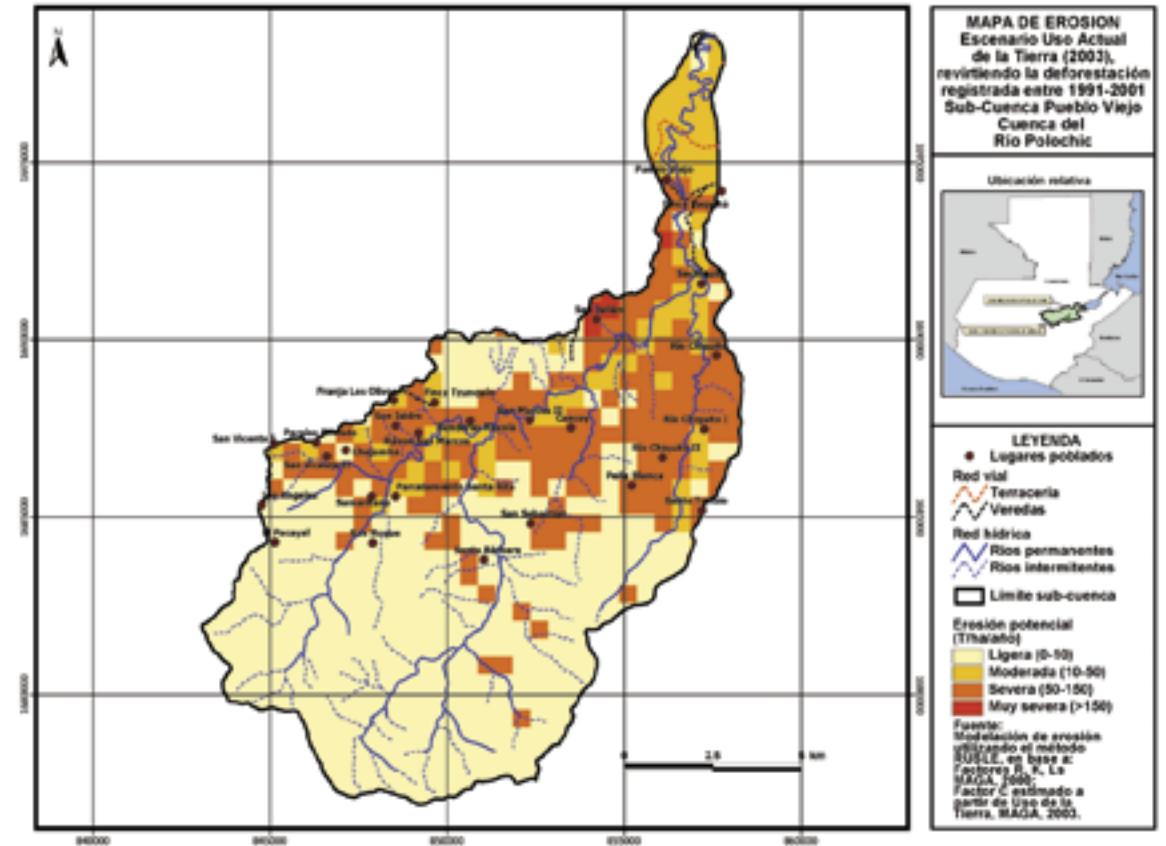


Figura 27b. Mapa de Erosión (Escenario uso actual de la tierra (2003)) subcuenca Pueblo Viejo, revertiendo erosión registrada entre 1991-2003

Viejo, respectivamente, durante el período 1991 – 2003. Esta deforestación incidió en una tasa de incremento anual de erosión de 1,645 y 3,750 TM/año, respectivamente. Es decir, que el cambio de uso del suelo ha influido gravemente en el aumento de la erosión en las subcuencas, que ha llegado a niveles muy críticos.

Asimismo se evidenció que en las subcuencas en estudio, el mayor cambio (aumento) de aporte de sedimentos durante los últimos quince años se ha dado en las regiones pobladas. Esto es más notorio en la cuenca del río Pueblo Viejo. En Pasabién se observó una situación similar, aunque con datos cuantitativamente menores.

Cuadro 38.

Datos del suelo de los modelos de erosión para 2003 y 1991 en las cuencas Pasabién y Pueblo Viejo

Escenario Cobertura del Suelo 2003							
Cuenca / Estrato de erosión	Ligera	Moderada	Severa	Muy severa	TOTAL	Erosión TM/ha/año	Sediment. TM/ha/año
Erosión promedio	5	30	100	200			
PASABIEN / Area (ha)	4,175.0	5,350.0	550.0	0.0	10,075.0	23.5	3.3
%	41.4	53.1	5.5	0.0	100.0		
Erosión total TM	20,875.0	160,500.0	55,000.0	0.0	236,375.0		
%	8.8	67.9	23.3	0.0	100.0		
<hr/>							
PUEBLO VIEJO / Area (ha)	8,350.0	1,875.0	4,650.0	75.0	14,950.0	38.7	5.4
%	55.9	12.5	31.1	0.5	100.0		
Erosión total TM	41,750.0	56,250.0	465,000.0	15,000.0	578,000.0		
%	7.2	9.7	80.4	2.6	100.0		

Escenario Cobertual del suelo 1991							
Cuenca / Estrato de erosión	Ligera	Moderada	Severa	Muy severa	TOTAL	Erosión TM/a/año	Sediment. TM/ha/año
Erosión promedio	5	30	100	200			
PASABIEN / Area (ha)	4,825.0	4,750.0	500.0	0.0	10,075.0	21.5	3.0
%	47.9	47.1	5.0	0.0	100.0		
Erosión total TM	24,125.0	142,500.0	50,000.0	0.0	216,625.0		
%	11.1	65.8	23.1	0.0	100.0		
<hr/>							
PUEBLO VIEJO / Area (ha)	8,850.0	1,875.0	4,125.0	100.0	14,950.0	35.7	5.0
%	59.2	12.5	27.6	0.7	100.0		
Erosión total TM	44,250.0	56,250.0	412,500.0	20,000.0	533,000.0		
%	8.3	10.6	77.4	3.8	100.0		

Cuadro 38. continuación....

Dinamica y tendencias	Deforestación (ha)	Erosión (TM)	Erosión (TM/ha/año)	
Incremento Pasabien (2003-1991)	902.16	19,750.0	2.0	0.3
Incremento Pueblo Viejo (2003-1991)	604.26	45,000.0	3.0	0.4
Tasa de incremento anual Pasabien		1,645.8	0.167	0.024
Tasa de incremento anual Pueblo Viejo		3,750.0	0.254	0.034
Tasa porcentual de incremento anual Pasabien			8.51	8.78
Tasa porcentual de incremento anual Pueblo Viejo			7.88	7.57

Definición de comunidades demandantes con condiciones para implementar trabajo de desarrollo y conservación de suelos

Luego de definir que la región poblada de las partes medias de las cuencas tiene que ver con el aumento de escorrentía y erosión del suelo, se recopiló información sobre aquellas comunidades usuarias más adecuadas para implementar proyectos de desarrollo y conservación de suelos. En este sentido se hace referencia al estudio de sistemas de vida en las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo, en el que se definen como comunidades elegibles, las siguientes:

En Pasabién las comunidades seleccionadas para poder implementar un proyecto de compensación equitativa por servicios ambientales, tomando encuenta la legalidad de la tierra, la disponibilidad del área, la ausencia de conflictos de tierra y otros tipos de conflictos sociales, son: San Lorenzo Mármol, Santa Rosalía Mármol, Pasabién, Monte Grande, Ojo de Agua, Agua Caliente, Sunzapote.

En Pueblo Viejo son diez las comunidades que podrían ser proveedoras de servicios hidrológicos, dentro de los parámetros que se han definido para el presente proyecto: Río Chiquito I, Pueblo Viejo, Cancoy, San Vicente II, Los Ángeles, Franja Los Olivos, Chajomhá, Paraíso Privado, Canaán y Río Colorado. Se ha identificado el ingenio Guadalupe como un usuario potencial de esos servicios, pues ha mostrado un gran interés en este esquema de compensación equitativa, principalmente por la generación de una conciencia ambiental en los diversos actores de la microcuenca.

Definición de tierras forestales de captación y regulación hidrológica

A continuación se presentan los resultados obtenidos implementando la metodología propuesta por INAB para priorizar tierras forestales de captación y regulación hidrológica.

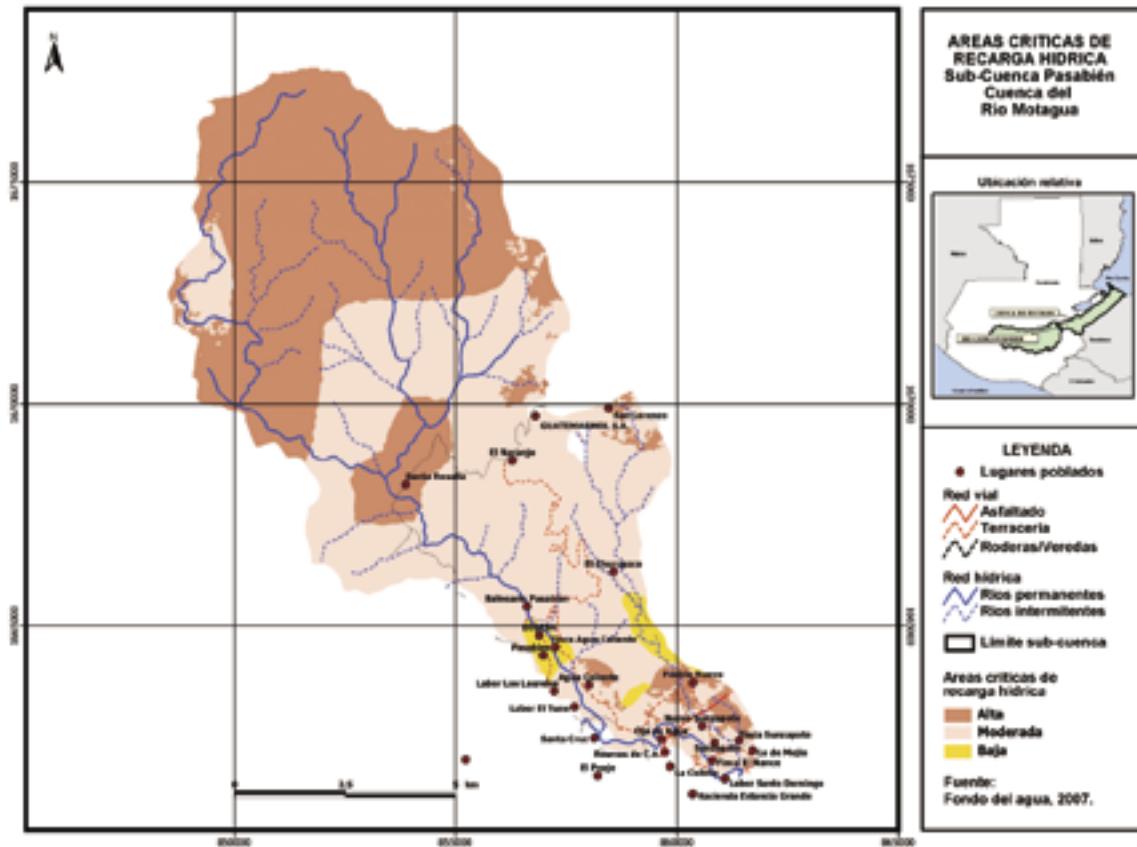


Figura 28. Áreas críticas de recarga hídrica de Pasabién

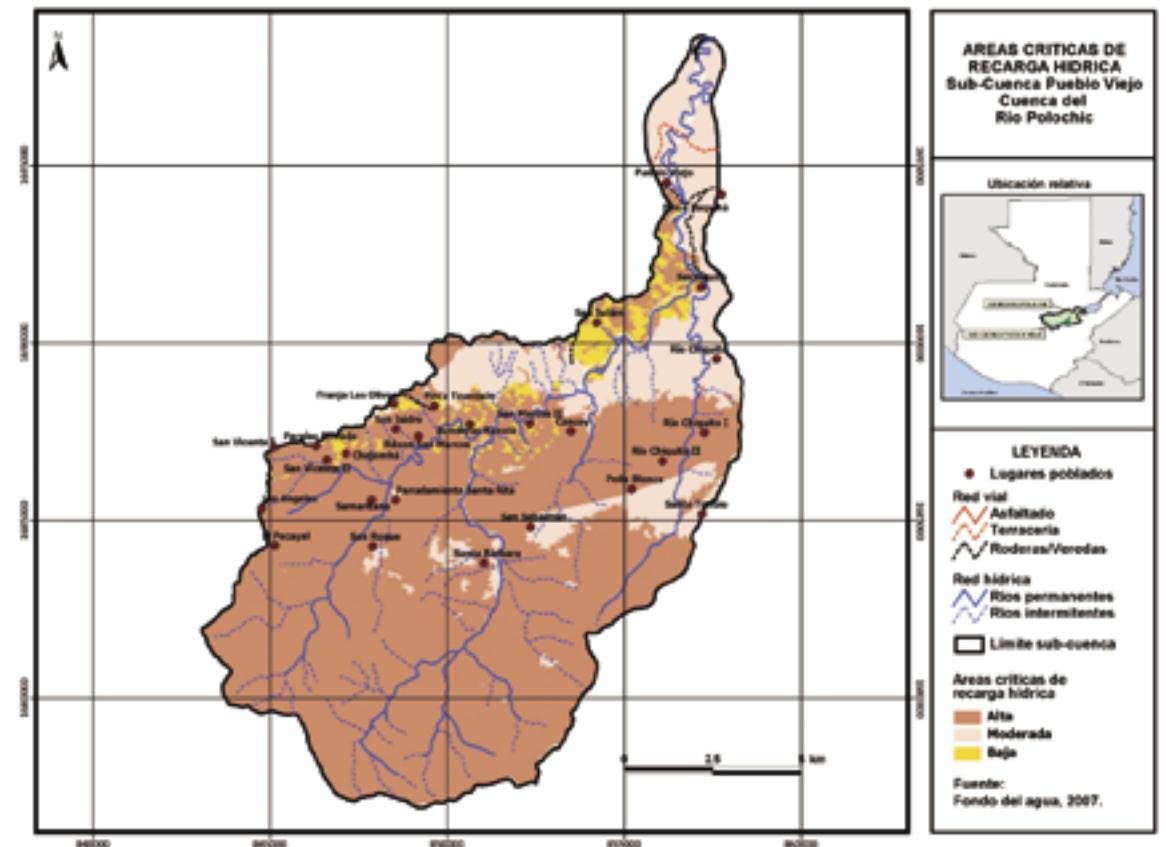


Figura 29. Prioridad de áreas por la metodología de delimitación de tierras forestales de captación y regulación hidrológica.

Estos mapas y los resultados cuantitativos correspondientes se utilizaron como insumos adicionales para seleccionar las áreas críticas de captación y regulación hidrológica, es decir aquellas de aptitud preferentemente forestal que además son importantes por su función de captación y regulación hidrológica. Como podemos observar en la subcuenca Pasabién las áreas críticas se distribuyen principalmente en las tierras ubicadas en la parte alta de la cuenca. En términos generales el 20% de extensión superficial garantiza más del 50% de la producción hídrica.



Cuadro 39.

Resultados de recarga hídrica, de acuerdo con la zonificación de tierras forestales de captación y regulación hidrológica propuesta por INAB.

Subcuenca Pasabien

UM	Extensión	Extensión			Recarga Hídrica m³/año	Recarga Hídrica m³/año		
		Alta	Moderada	Baja		Alta	Moderada	Baja
1	1566.513		1,566.51		13,151,973			13,151,973
2	287.605	287.61			3,456,437	3,456,437		
3	285.997	286.00			2,342,716	2,342,716		
4	2715.881		2,715.88		8,132,706			8,132,706
5	337.869		337.87		7,167,958			7,167,958
6	447.212	447.21			3,623,982	3,623,982		
7	1093.075	1,093.08			11,765,203	11,765,203		
8	316.296	316.30			4,592,997	4,592,997		
9	1631.52	1,631.52			29,509,956	29,509,956		
10	166.598	166.60			812,182	812,182		
11	222.023	222.02			4,015,819	4,015,819		
12	285.844		285.84		690,485			690,485
13	256.149		256.15		584,301			584,301
14	211.643			211.64	8,804			8,804
15	197.482	197.48			570,980	570,980		
	10,021.71	4,647.81	5,162.26	211.64	90,426,499	60,690,272	29,727,423	8,804

Subcuenca Pueblo Viejo

UM	Extensión Ha	Extensión			Recarga Hídrica m³/año	Recarga Hídrica m³/año		
		Alta	Moderada	Baja		Alta	Moderada	Baja
1	318.404	318.404			6,773,795	6,773,795		
2	208.301			208.301	302,858			302,858
3	244.01		244.010		3,399,093			3,399,093
4	325.843	325.843			9,888,370	9,888,370		
5	810.888	810.888			27,645,672	27,645,672		
6	1,533.99		1,533.991		14,116,789			14,116,789
7	737.982	737.982			22,384,061	22,384,061		
8	553.487		553.487		12,669,606			12,669,606
9	729.055	729.055			22,407,739	22,407,739		
10	345.185			345.185	500,261			500,261
11	629.368		629.368		4,601,063			4,601,063
12	654.662	654.662			16,813,382	16,813,382		
13	208.301	208.301			4,945,186	4,945,186		
14	6,037.77	6,037.769			155,129,036	155,129,036		
15	665.077	665.077			18,646,279	18,646,279		
16	508.851		508.851		10,018,391			10,018,391
17	282.695		282.695		4,467,342			4,467,342
	14,793.87	10,487.98	3,752.40	553.49	334,708,923	284,633,520	49,272,284	803,119

Definición de la problemática asociada a los recursos hídricos en las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo

La problemática en torno a los recursos hidrológicos en las subcuencas estudiadas se define y se sintetiza de la siguiente manera:

“El recurso hidrológico y los recursos naturales renovables asociados son manejados insosteniblemente, lo que los ha llevado a niveles severos de degradación. Esto a su vez ha causado pérdidas de competitividad ya que se desaprovechan las ventajas comparativas de las subcuencas respecto a los recursos hídricos que captan y regulan.”.

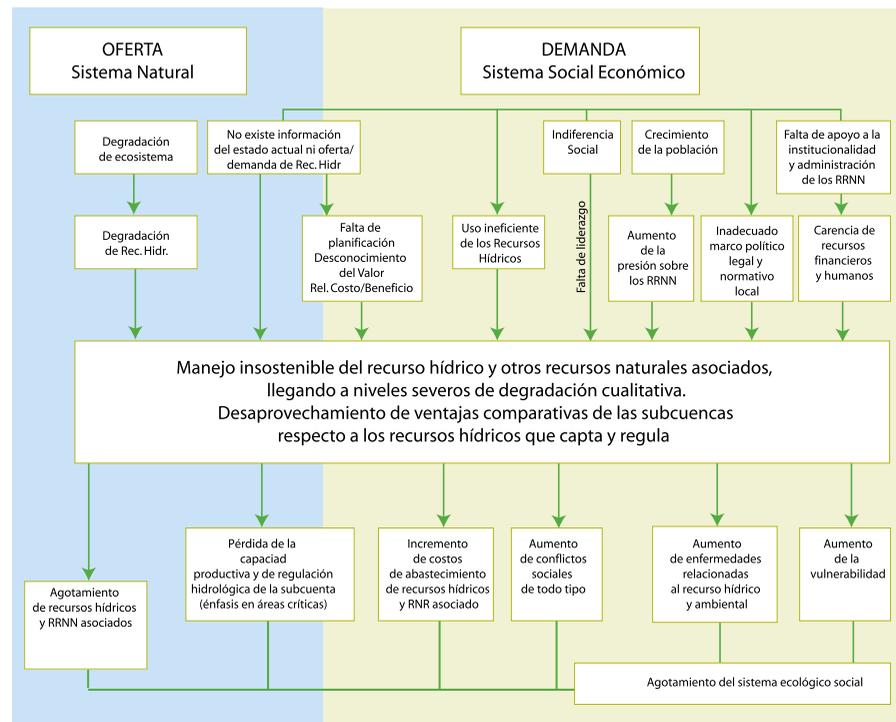


Figura 30. Causas y efectos de la problemática asociada con los recursos hidrológicos en las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo

Para el análisis técnico de causas y efectos de este problema, presentado desde el punto de vista antropocéntrico, es necesario separar la oferta (por parte de los sistemas naturales) y la demanda (por parte del sistema social económico).

Las causas en el campo de la oferta son:

- Evidente deterioro de la calidad, disminución de la cantidad y desequilibrio en la distribución en el tiempo de los recursos hidrológicos.
- Deterioro de los recursos naturales renovables asociados a la captación y regulación hidrológica (suelo y bosque).
- Se desconocen aspectos de la oferta hídrica, el estado actual y capacidad de uso de los recursos hidrológicos y los recursos naturales asociados.

Las causas en el campo de la demanda (sistema social económico y ambiental) son:

- Carencia de información adecuada de la demanda.
- No se forma conciencia en las comunidades sobre su papel en el deterioro ambiental ni sobre las alternativas de mejor uso.
- No se puede planificar adecuadamente el uso del agua.
- No se tiene conciencia del valor real del agua.
- Indiferencia social e inadecuada organización.
- Incapacidad institucional y administrativa sobre los recursos hídricos (ley o normas de uso de agua).
- Aumento de las demandas hídricas.
- Uso ineficiente de los recursos hídricos y falta de reglamentación.
- No existen recursos humanos ni financieros para afrontar el problema.

Los efectos en el campo de la oferta son:

- Agotamiento y deterioro de los recursos hídricos.
- Colapso del sistema ecológico.
- Pérdida de la capacidad productiva del sistema.

Los efectos en el campo de la demanda son:

- Incremento de los costos de abastecimiento y tratamiento de los recursos hídricos.

- Aumento de conflictos sociales de todo tipo.
- Aumento de enfermedades vinculadas con los recursos hídricos.
- Baja productividad de la cuenca y pérdida de capacidades de desarrollo.
- Aumento de la vulnerabilidad social ante eventos o desastres (especialmente por altas precipitaciones y sismos).
- Finalmente, el colapso del sistema ecológico y del social económico actual.

Cabe mencionar que la contaminación física ocasionada por la actividad agrícola y humana en general de la parte media de las subcuencas es un tema que merece especial atención; sin embargo no se cuenta con información precisa al respecto, a pesar de su urgencia. En este sentido se evidencia aún más la necesidad de establecer un programa de generación de información.



Conclusiones y Recomendaciones

La información existente con respecto a los recursos hidrológicos de las cuencas Pasabién y Pueblo Viejo es escasa y de corto plazo. Sin embargo el análisis de la información biofísica, hidrológica (cuantitativo y cualitativo) social y económica, generada o recopilada en este estudio, se constituye en un punto de partida para la implementación de pagos equitativos por servicios hidrológicos.

A manera de conclusión general se definió que, en ninguna de las dos cuencas se percibe un problema asociado con la cantidad anual de agua “producida” en la cuenca. Sin embargo, se evidenció que una grave problemática en aspectos cualitativos del agua, especialmente la presencia de erosión laminar. De acuerdo con los usuarios de recursos hidrológicos, la alta sedimentación genera dificultades de diversa índole en el uso del agua y en la productividad de la infraestructura de generación eléctrica en la cuenca Pasabién y provoca inundaciones de áreas de producción agrícola en la parte baja de la cuenca Pueblo Viejo. A continuación se describen los principales hallazgos en las cuencas estudiadas:

Aspectos cuantitativos

Ambas cuencas presentan, principalmente, alta y muy alta recarga hídrica anual (bruta): Pasabién recarga 90.4 millones m³/año y la cuenca de Pueblo Viejo 334.71 millones m³/año. Para dimensionar este volumen de agua “producida”, podemos mencionar que la subcuenca Pasabién podría abastecer a más de 800,000 personas al año y Pueblo Viejo a más de 2.5 millones de personas, ello sin tomar en cuenta el caudal ecológico.

Las áreas de mayor recarga o producción hídrica se encuentran en las microcuencas ubicadas en las partes altas. Esto se debe principalmente al aumento de la precipitación y a la disminución de la evapotranspiración. De acuerdo con la clasificación de Herrera, en la cuenca Pasabién, las áreas de muy alta recarga hídrica (mayor a 1,000 mm) se ubican mayormente en la zona núcleo. En el caso de Pueblo Viejo se encuentran distribuidas en toda la subcuenca.

En la subcuenca Pasabién cerca del 50% de la escorrentía espontánea es aportada por el bosque degradado de encino (15% de la cobertura total), que se encuentra en la parte media de la cuenca. En Pueblo Viejo, coberturas no forestales como maíz y cardamomo (aproximadamente el 15% de la superficie total) aportan más del 75% de la escorrentía superficial de la subcuenca.

El comportamiento de caudales a lo largo del año muestra una distribución muy diferenciada entre la estación lluviosa y la estación seca en estas cuencas. Es especialmente contrastante la situación de Pasabién, donde más del 90% de la escorrentía se distribuye de junio a octubre. Esto quiere decir que a pesar de que la cuenca presenta una alta producción hídrica, la distribución del caudal es irregular para abastecimiento de los usuarios, ya que el flujo superficial disminuye considerablemente en la estación seca (de diciembre a mayo). En la cuenca Pueblo Viejo este problema no es severo.

Las tendencias de deforestación entre 1999 y 2003 mostraron una relación directa con el aumento relativo de la escorrentía anual. En la subcuenca Pasabién este incremento fue del 1.38% al 9.08% y en la subcuenca Pueblo Viejo fue de menos del 0.38% en 1999 al 8% del total del balance hídrico en 2003.

Aspectos cualitativos

La calidad del agua superficial producida por las subcuencas bajo estudio, en la parte media y alta, puede considerarse apta para la utilización en agricultura e industria.

El total de erosión en Pasabién es de 236,000 TM/año y en Pueblo Viejo es de 586,000 TM/año, datos que corresponden a 23.5 y 38.7 TM/ha/año, respectivamente. Esto es alarmante si se considera que los valores de erosión tolerables por hectárea, de acuerdo a varios autores, oscilan entre 4 y 12 TM/ha/año. Es aún más alarmante constatar que existen áreas (5% en la subcuenca Pasabién y 32% en Pueblo Viejo) que alcanzan 100 o más TM/ha/año.

En la subcuenca Pasabién 550 hectáreas (5.5 % de la superficie total), ubicadas en la parte media de la subcuenca, presentan 23.3% de erosión. En Pueblo Viejo 4,700 hectáreas (el 32% de la superficie total) aportan el 84%. Las áreas que presentan mayor erosión están ubicadas en la parte media de ambas cuencas. En la subcuenca Pueblo Viejo, es importante subrayar, la parte media (región más densamente poblada) muestra una erosión severa (100 TM/ha) y muy severa (mayor 150 TM/ha).

Gracias a los modelos realizados se evidenció que el incremento de la erosión es muy sensible a la deforestación, sobre todo en la parte media de las cuencas. En este sentido se estimó una deforestación de 900 y 600 ha para las subcuencas de Pasabién y Pueblo Viejo, respectivamente, durante el período comprendido entre 1991 y 2003. Esta deforestación incidió, de acuerdo a las condiciones biofísicas, en un incremento anual de erosión de 1,645 TM/año para Pasabién y 3,750 TM/año para Pueblo Viejo.

La deforestación ha influido significativamente en el aumento de la erosión en las subcuencas; por ejemplo en la cuenca de Pueblo Viejo cada hectárea deforestada (parte media) representó un incremento de 8 m³/año de sedimentos en las áreas de producción agrícola (parte baja). Es importante mencionar que los productores agrícolas de la parte baja de esta cuenca (cerca de la confluencia de los ríos Pueblo Viejo y Polochic) se ven en la costosa necesidad de dragar el curso del río periódicamente. Además se pierden áreas importantes para producción agrícola intensiva.

Asimismo se evidenció que en las subcuencas en estudio, el mayor cambio (aumento) en la cantidad de sedimentos durante los últimos quince años se ha dado en la parte media. Esto es más notorio en la cuenca del río Pueblo Viejo. Es importante acotar que esta información biofísica es fundamental para la estimación del impacto económico, que deberá realizarse en un estudio complementario.

Usuarios

En cuanto a la demanda, destaca el hecho que el mayor problema relacionado con los recursos hídricos y recursos naturales asociados, es el manejo de sedimentos. En la subcuenca de Pueblo Viejo, los administradores de las plantaciones de caña del ingenio Guadalupe manifestaron enfrentar serias dificultades con el manejo de sedimentos que provocan grandes inundaciones. Asimismo, los administradores de la hidroeléctrica ubicada en la parte media de la subcuenca Pasabién manifestaron afrontar graves inconvenientes con la sedimentación que azolva una presa necesaria en la acumulación de agua para la generación de electricidad. Por otro lado, la población considera que su abastecimiento hídrico es aceptable, en términos generales.

Áreas críticas

De acuerdo con el análisis de la información anterior, sobre todo de su ubicación relativa en la cuenca y de la zonificación del área protegida de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, se definieron áreas críticas bajo dos puntos de vista: un enfoque de la subcuenca y otro de las comunidades. Dichas comunidades fueron seleccionadas con base en criterios de medio físico, servicios sociales, economía, producción, organización comunitaria, tenencia de la tierra, tomando en cuenta principalmente los informes de sistemas de vida correspondientes.

En lo referente a Pasabién, se recomienda trabajar sobre todo en la microcuenca Santa Rosalía Intermedia y con las comunidades siguientes: San Lorenzo Mármol, Santa Rosalía Mármol, Pasabién, Monte Grande, Ojo de Agua, Agua Caliente, Sunzapote.

En cuanto a Pueblo Viejo las áreas críticas abarcan parcialmente las microcuencas, Tzunun, río Chiquito, Santo Toribio y Tancoy, además, las comunidades Río Chiquito I, Pueblo Viejo, Cancoy, San Vicente II, Los Ángeles, Franja Los Olivos, Chajomhá, Paraíso Privado, Canaán y Río Colorado.

Es importante mencionar que la parte alta de Pasabién, una extensión superficial del 20% de la cuenca, garantiza la captación de más del 50% de la producción hídrica. Por lo tanto esta área es también considerada crítica. En el caso de Pueblo Viejo también es muy importante velar por la conservación de los bosques de la parte media y alta, ya que debido a sus características biofísicas esta zona es propensa a aportar sedimentos.

Estrategias generales

Por todo lo anteriormente mencionado y de acuerdo con la zonificación de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, las estrategias para revertir o disminuir el impacto de los problemas vinculados con los recursos hídricos y recursos naturales asociados deben incluir los siguientes objetivos: a) disminuir la deforestación y el avance de la frontera agrícola, sobre todo en las partes medias de las subcuencas, con especial atención en la subcuenca de Pueblo Viejo y en las comunidades críticas descritas anteriormente; b) implementar prácticas para disminuir la erosión en áreas de uso no forestal, con énfasis en las zonas cercanas a poblados ubicados en la parte media de las subcuencas (reforestación, implementación de

sistemas agroforestales u otras prácticas de conservación de suelos) y c) protección de las masas boscosas ubicadas en la parte alta (zona núcleo) de ambas subcuencas.

Por otro lado, se considera fundamental fortalecer la evaluación y monitoreo de los recursos hídricos y recursos naturales renovables asociados, de tal manera que esta acción sea continua y de mediano o largo plazo (ver anexos: Programa de Investigación de Recursos Hídricos de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas).

La puesta en marcha de un sistema de generación de información hidrológica, científica, rigurosa y confiable es fundamental para respaldar la implementación y evaluación de mecanismos de compensación, la negociación entre los distintos actores y la gestión de recursos hídricos en general. Es importante mencionar que en los últimos años se ha observado que el comportamiento de los recursos hidrológicos de las cuencas ha sido muy dinámico, probablemente por los cambios climáticos que afectan la región. Además con información hidro-climática confiable se pueden fortalecer esfuerzos de gestión de riesgos e implementación de sistemas de alertas tempranas de inundaciones y otros desastres relacionados con eventos extremos de precipitación.



Bibliografía

1. Ávalos C, O.A. “Determinación de las Áreas Principales de Recarga Hídrica Natural de la Subcuenca Río Belejeyá, Granados, Baja Verapaz”. Tesis de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005, p. 110.
2. Bosch & Hewlett. “A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evaporation”. *Journal of Hydrology* 55:3-23, 1982. En: Cavelier J.; Vargas G. Procesos hidrológicos. Ecología y conservación de bosques neotropicales Guariguata M., Catan G., eds.). 2001, pp. 145-165.
3. Bruijnzeel LA. *Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests*. Editors: Sadanandan Nambiar and Alan g. Brown. Canberra Australia: CSIRO, 1997, p. 571.
4. Bruijnzeel L.A. *Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: a state of knowledge review*. Amsterdam (Netherlands): UNESCO International Hydrological Programme, 1990, p. 224.
5. Bruijnzeel L.A. Land use and water resources research. (<http://www.luwr.com>). Venus Internet, 2000.
6. Cabrera, CA. “Estimación del Volumen y Calidad del Agua Subterránea y Establecimiento de Políticas de Explotación de las Aguas Subterráneas para las Aldeas de San José Pacul y Pachali del Municipio de Santiago Sacatepéquez, Guatemala”. Tesis de Ingeniería Agrícola. Universidad de San Carlos, Facultad de Agronomía, Guatemala, 1998, p. 73.
7. CATIE, Marco conceptual del manejo de cuencas En “Fundamentos del Manejo de Cuencas”. Seminario Taller. Antigua Guatemala: CATIE, 1986, p.164
8. CEPAL. 1999. *Gestión de Cuencas Urbanas*. Santiago, Chile: CEPAL, p. 128.
9. CONAP. *Estudio Técnico para la Cordillera Alux como Reserva Forestal de Manantiales*. Guatemala: CONAP, 1992, p. 60.
10. CONAP. *Plan Maestro Reserva Protectora de Manantiales Cordillera Alux*. Guatemala: CONAP, 2004, p. 44.
11. Custodio B.y Llamas E. *Recarga Hídrica*. Madrid, España: Mundi-prensa, 2001, p. 1010.
12. Servicio Hidrológico Nacional y Servicio de Estados Territoriales de El Salvador. *Balance Hídrico Integrado y Dinámico de El Salvador*. San Salvador, El Salvador, 2005. 87 p.
13. FAO *Manual de Campo para la Ordenación de Cuencas Hidrográficas*. México, D. F. Guía FAO Conservación 13/6, 1992, p. 90.
14. FAO. “Relaciones tierra – agua en cuencas hidrográficas rurales”. *Boletín de Tierras y Aguas de la FAO* 9. Actas del taller electrónico organizado por la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, del 18 septiembre a 27 de octubre de 2000, FAO, 2002.
15. FDN (Fundación Defensores de la Naturaleza, GT). *Informe sobre el Comportamiento de la Calidad del Agua en la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas Durante el Año 2005*. Guatemala: FDN, 2006, p. 30.
16. FDN (Fundación Defensores de la Naturaleza, GT). *III Plan Maestro 2003 – 2008*. Reserva de Biosfera Sierra de las Minas. Guatemala: FDN, 2003, p. 106.
17. FDN (Fundación Defensores de la Naturaleza, GT). *Plan de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural de la Región Semiárida del Valle del Motagua*. Serie Técnica 1. Guatemala: FDN, 2006, p. 67.
18. Hamilton L.S. *Tropical Forested Watersheds: hydrologic and soils response to major uses and conversions*. Boulder, Colo, EE.UU. Westvies Press, 1983, p. 168.
19. Hernández, O. “Efectos en sedimentación del suelo derivados del uso del suelo en el embalse Santa Teresa, Cuenca del Río Polochic”. Informe técnico elaborado para WWF. Guatemala: WWF, 2007.
20. Herrera I, I. *Manual de Hidrología*. Guatemala: Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos, 1995, p. 223.

21. Herrera I, I. *Hidrogeología práctica*. Volumen I. Guatemala: Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2002, p. 190, 1ra. edición.
22. INAB (Instituto Nacional de Bosques, GT). *Consideraciones Técnicas y Propuesta de Normas de Manejo Forestal para la Conservación de Suelo y Agua*. Guatemala: INAB, 2005, p. 34, 2. ed.
23. INAB. (Instituto Nacional de Bosques, GT). UVG. (Universidad del Valle de Guatemala, GT). CONAP (Consejo Nacional de Areas Protegida, GT). *Dinámica de la Cobertura Forestal de Guatemala durante los años 1991, 1996 y 2001 y Mapa de Cobertura Forestal 2001*. Guatemala: Ediciones Superiores, S. A., 2006, p. 90.
24. INSIVUMEH, PNUD. ICM. *Estudio de Aguas Subterráneas del Valle de la Ciudad de Guatemala*. Guatemala, 1978, p. 538.
25. Israelsen J. “Relación suelo, planta, agua y atmósfera, y Sandoval 1989”. *Principios de Riego y Drenaje*. España: Mundiprensa, 1992, p. 456.
26. Linsley R. Jr. *Hidrología para Ingenieros*. México: McGraw-Hill, 1988, p. 386, segunda edición.
27. MAGA. Base de Datos de Mapas de la República de Guatemala, escala 1:250,000. Guatemala, 2000, 1 disco compacto, 8 mm.
28. Martínez de Azagra, NAVARRO y HEVA. *Hidrología Forestal, el Ciclo Hidrológico*. Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones. Valladolid, España, 1997, p. 275.
29. Municipalidad de Mixco, INSIVUMEH. Informe Final: Estudio de Aguas subterráneas del Municipio de Mixco. Guatemala, 1999, p. 59.
30. Rodas, O. “El papel del Bosque en el Ciclo Hidrológico”. Plan de Acción Forestal para Guatemala e Instituto Nacional de Bosques. Guatemala, 1997, p. 10.
31. Sandoval I, J. E. *Principios de Riego y Drenaje*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1989, p. 345.
32. Schosinsky, G; Losilla, M. “Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual”. *Revista Geológica de América Central*, no. 23, 2000, p. 44-54.
33. Stadmuller T, “Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo. Una revisión bibliográfica”. Turrialba, C.R.: CATIE. Proyecto Silvicultura de Bosques Naturales (Serie Técnica. Informe Técnico CATIE, 1994.
34. TRAGSA. *Ingeniería de Cuencas Semiáridas*. Madrid, España: Mundiprensa, 2003, p. 1012, segunda Edición.



Propuesta general de agenda de investigación y monitoreo de información hidrológica en las subcuencas Pasabién y Pueblo Viejo, Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas

Para contribuir sustancialmente a revertir la grave situación de las cuencas Pasabién, Pueblo Viejo u otras con problemática similar en cuanto al manejo insostenible de sus recursos hídricos, es fundamental profundizar en la calidad y detalle de la información existente, principalmente en los temas de capacidad de uso (grado de agotamiento) e impacto de prácticas que mejoren la calidad (sobre todo física) de los recursos hídricos, así como conocer la demanda actual y futura de estos recursos.

La generación y monitoreo de información de los recursos hídricos permitirá: acceder a la adecuada planificación y gestión de este patrimonio, generar normas locales de uso de recursos hídricos y recursos naturales renovables asociados, erradicar la indiferencia social y carencia de liderazgo, mejorar la eficiencia de los sistemas de abastecimiento, distribución y uso de los recursos hidrológicos, de tal manera que se mantenga el sistema ecológico y se mejoren las condiciones sociales del área.

Esfuerzos como el presente son fundamentales para desarrollar acciones vinculantes en temas estratégicos para la administración de la RBSM. Ya se ha evidenciado que existe interés y cualidades complementarias en diversas instituciones afines a la administración y aprovechamiento de los recursos hídricos de esta área protegida.

Un objetivo importante de la administración de la RBSM es la puesta en marcha de mecanismos de compensación o pagos por servicios ambientales, como la regulación hidrológica que brindan los bosques. De esta manera se podrá mejorar los procesos de conservación y manejo de los recursos naturales y servicios ambientales del área protegida.

Problema a resolver con la agenda de investigación hídrica

La administración de la RMSM enfrenta la carencia de información e instrumentos de fomento para el cumplimiento adecuado de los objetivos correspondientes a un área declarada como protectora de manantiales. En este caso, la protección de manantiales y recursos hídricos necesariamente implica la orientación de medidas para maximizar las externalidades positivas, principalmente hidrológicas, de la cobertura del suelo y la implementación de acciones para hacer más eficiente la captación (producción) y regulación hidrológica del área.

Los problemas identificados por la consultoría, que se pretende contribuir a resolver con la implementación de la agenda de investigación hidrológica en la RBSM, son:

- La carencia de información básica para la implementación de políticas de conservación de la RBSM y la gestión de mecanismos de compensación y monitoreo con énfasis en los recursos hídricos.
- Incertidumbre técnica y científica, es decir desconocimiento de la dinámica hidrológica local y del vínculo entre las acciones de uso del suelo en la regulación y producción hídrica. Incertidumbre respecto a los límites biofísicos del sistema y las demandas de la sociedad.
- Presiones sociales, ligadas a grupos que utilizan fuentes de agua superficial o agua subterránea, cuya estabilidad está asociada con la cobertura forestal de la Sierra de las Minas. Estos grupos tienden a rechazar las medidas de manejo adecuado del suelo.
- Presiones institucionales, relativas a la responsabilidad legal que recae sobre el administrador de la RBSM.
- Presiones de tipo logístico y presupuestario, en virtud del requerimiento de presupuesto y programas (recursos humanos, logísticos, financieros, etc.) dedicados a la generación y sistematización de información prioritaria para la consecución de los objetivos de manejo del área protegida.
- El evidente deterioro cualitativo y cuantitativo de los recursos hídricos y recursos naturales asociados que se intenta detener.

En cuanto a la incertidumbre técnica y el desconocimiento de la dinámica hidrológica local y del vínculo entre el uso del suelo y su impacto

hidrológico, la agenda de investigación y su respectivo programa debieran responder las siguientes interrogantes:

¿Cuánta agua es captada y cómo se regula en las cuencas Pasabién y Pueblo Viejo? y ¿cuál es su relación con la Sierra de las Minas en general?

¿Cuál es la dinámica cuantitativa y cualitativa, espacial y temporal del agua superficial y subterránea en la RBSM y su área de influencia?

¿Cómo se puede ordenar el territorio? y ¿cuáles prácticas de manejo de la cobertura y del suelo pueden maximizar la captación y regulación hidrológica en la RBSM?

¿Quiénes son los beneficiarios? y ¿cuánto y cómo utilizan los recursos hídricos producidos en la RBSM?

¿Cuáles mecanismos de fomento y prácticas de regulación y captación hidrológica y conservación de la cobertura forestal se pueden plantear de acuerdo a las características sociales y biofísicas del área?

En general, dicha información es indispensable para la generación de instrumentos de política para la gestión del área protegida. Específicamente, el conocimiento de los recursos hídricos es útil para fomentar la generación de instrumentos financieros, la elaboración de normas locales de uso de recursos hídricos y recursos naturales renovables asociados, erradicar la indiferencia social y la carencia de liderazgo, mejorar la eficiencia de los sistemas de abastecimiento, la distribución y el uso de los recursos hidrológicos.

En este sentido se deberá determinar dónde se presentarán y ordenarán las necesidades de información sobre recursos hídricos en la RBSM. Asimismo, se deberá plantear los procedimientos lógicos y técnicos para conocer las limitaciones biofísicas y socioeconómicas de los recursos, además se deberá proponer métodos para obtener los conocimientos necesarios para optimizar el uso de dichos recursos. La agenda deberá comprender tres grandes líneas de investigación.

- Balance hídrico anual, modelación y monitoreo de recursos hidrológicos y recursos naturales asociados.
- Dinámica de la calidad del agua.
- Aplicaciones para la maximización de recarga hídrica y el uso eficiente de los recursos hídricos.

Metodología para la estimación de erosión y sedimentación³

Estimación de erosión potencial, con y sin cobertura forestal

El cálculo de la erosión se efectuó a través de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS)⁴, método desarrollado por Wischmeier y Smith (1978). La figura 31 presenta el arreglo de mapas empleado para estimar la pérdida de suelo de la microcuenca Colorado.

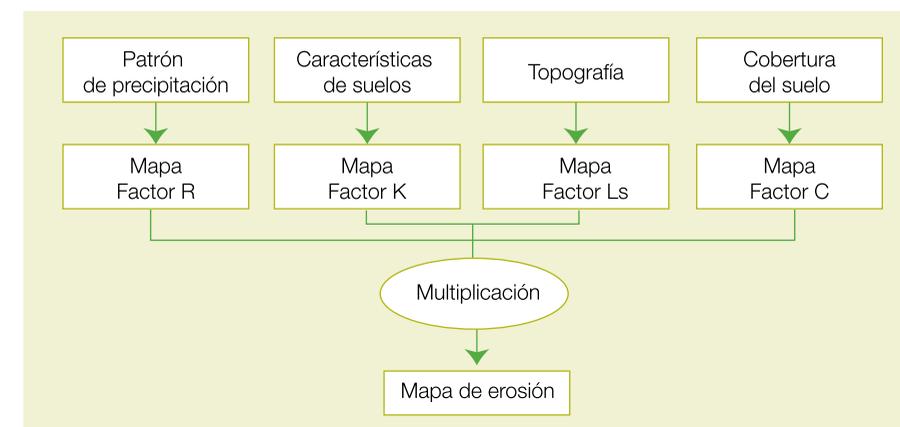


Figura 31. Estimación de erosión, método RUSLE

La tasa de erosión dada para un sitio es determinada por la forma particular en que los niveles de variables físicas y de manejo están combinadas, siendo estas: intensidad de lluvia, características del suelo, inclinación y longitud de pendiente y cobertura vegetal.

Factor R:

El factor de erosión pluvial, que mide la energía cinética de la lluvia sobre la superficie del suelo se obtuvo del Mapa del Factor R, generado por el Proyecto de Asistencia Técnica y Generación de información (CATIE, 2001) para Guatemala, a escala 1:250,000.

³ (Extraído de Hernández. *Valoración Económica del Recurso Hídrico en la Subcuenca de Sierra de las Minas*, Guatemala, 2001.)

⁴ Por sus siglas en inglés USLE, Universal Soil Loss Equation

El proceso de recorte de la microcuenca Colorado consistió en multiplicar el marco por el Mapa de Guatemala en el programa ArcView y luego eliminar todos los valores iguales a 0 con el programa Idrisi. Finalmente se redujo la escala del mapa.

Factor K:

El factor de características del suelo se obtuvo del Mapa del Factor K, generado por el proyecto CATIE/Esprede (2001) para Guatemala, a escala 1:250,000. El proceso de recorte de la microcuenca Colorado consistió en multiplicar el marco por el mapa de Guatemala en el programa ArcView, y luego eliminar todos los valores iguales a 0 con el programa Idrisi. Finalmente se redujo el tamaño de la celda (con fines de reducción de la escala del mapa).

La información se obtuvo a partir del mapa del factor K generado por el Proyecto Asistencia Técnica y Generación de información (CATIE, 2001) para Guatemala, a escala 1:250,000. Los datos se obtuvieron a partir del Mapa de Serie de Suelos, para determinar los parámetros que definen el factor K (textura, contenido de materia orgánica y permeabilidad).

Factor Ls:

Con base en el método diseñado para determinar el factor Ls en ArcView, para el cálculo del factor L, se tomó una longitud de pendiente igual a 120 m, que corresponde al tamaño de la cuadrícula (píxel) utilizada en el archivo *grid*. A partir del modelo de elevación digital fue derivada la pendiente. Ambos datos se cruzaron para el obtener el Mapa de Ls, siguiendo los pasos que se mencionan a continuación:

- Se tomó como base el modelo de elevación digital.
- Se convirtió a *grid*, empleando como tamaño de celda 20 metros.
- Se activo la extensión Hydro, empleando el menú con el mismo nombre. Se aplicaron los comandos: *fill*, *flow direction* y *accumulation flow*.
- Se derivó la pendiente (menú Surface); el resultado que originalmente estaba dado en grados se cambió a radianes a través de la opción *calculate* ($P * \pi / 180$).
- Se selecciona en el mapa de *flow accumulation* $> \text{ó} = 8$ y se crea el mapa negativo respectivo.
- Se genera el positivo del paso anterior y se reclasifica en 9 valores, denominándolo Nueva Aum Flujo.

- Se aplica la fórmula para el cálculo del factor Ls:

$$(((\text{Nueva Aum Flujo} * 20 / 22.13) . \text{Pow}(0.4)) * (((\text{Pendiente en grados} / 180 \text{ sen}) / (0.0896)) . \text{Pow}(1.3)))$$

Factor C:

El factor de cobertura, se basa en valores generados por distintos autores (Wischmeier, Roose, Callsite, entre otros). Los valores oscilan entre 0 y 1. El principio de selección de los valores respondió al objetivo del análisis: simular un cambio de uso del suelo, de cobertura forestal hacia pasto con árboles distribuidos al azar. Por ende, los valores empleados tienen tendencia a resaltar dicha variación.

Cuadro 40.

Valores del factor C para diferentes usos del suelo, microcuenca Colorado

Tipo de uso de la tierra	Factor C	Razón
Bosque latifoliado	0.001	El rango oscila entre 0.0001 y 0.001, con una cobertura mayor del 75% del dosel. El bosque no ha sido disturbado, la infiltración y contenido de materia orgánica es alta y la mayor parte del suelo está cubierta por una capa de hojas caídas y mulch.
Bosque coníferas	0.006	Es el punto medio del rango de 0.003 a 0.009 que tiene entre 40 y 20% de área cubierta por el dosel del bosque. El área ha sido empleada para pastoreo o quemada.
Hortalizas	0.49	Índice generalmente aceptado para hortalizas.
Pasto natural	0.09	Cobertura de alrededor del 25% de árboles y con 40% como mínimo de suelo con cobertura (pasto).
Escenario 1: situación sin bosque	0.08	Se estima que los suelos son afectados gravemente por la tala del bosque.

Factor P:

En el estudio no fue considerada la variable “prácticas de cultivo utilizadas” debido a que i) el bosque no está siendo manejado en la situación actual, con cobertura forestal, ii) en el caso del escenario que simula la pérdida de cobertura forestal la alternativa principal consiste en la introducción de ganado como se realiza actualmente (sin prácticas de manejo del pasto).

Con todos los requerimientos necesarios (mapas: R, K, Ls y variable C) se integró la información a través de multiplicación binaria, empleando la herramienta del menú Análisis, Map calculator; finalmente se grabaron los datos con la opción del menú *Theme: save data set*. Una vez generado

el mapa de erosión por unidad de área, se realizó una sumatoria sobre la cantidad total de pérdida de suelo, expresada en toneladas / año.

Determinación de la erosión:

Con los mapas anteriores se procedió a aplicar la ecuación universal de pérdida de suelo, la cual consiste en la multiplicación de los factores (Ls, K, R y C).

Determinación del factor de ajuste:

Para la determinación del factor se aplicó la siguiente ecuación, que establece el método de ajuste:

$$\frac{S_r}{E_a} = \frac{S_e}{E_p}$$

Donde,

S_r = Sedimentación real medida por la trampa ubicada en el vertedero

E_a = Erosión actual de la microcuenca (método RUSLE)

S_e = Sedimentación esperada en el embalse

E_p = Erosión potencial de la microcuenca (método RUSLE)

En la igualdad anterior para determinar la sedimentación esperada (S_e), obtenemos la formula aplicada en el cálculo de la sedimentación del embalse:

$$S_e = \frac{S_r * E_a}{E_p}$$

La aplicación de este método indirecto permite eliminar el sesgo ocasionado por la determinación de la tasa de transporte de sedimentos y la capacidad de transporte, así como también la acumulación de sólidos sedimentables con base en las características del embalse.

Las bases para el cálculo del factor de ajuste fueron: la estimación de la pérdida de suelo de la microcuenca (acápite anterior) y el cálculo de la tasa de sedimentación “real” del embalse hipotético (a partir de la medición en el vertedero).

El factor de ajuste se lee como: “la proporción de la erosión de la microcuenca que se sedimenta en el embalse”.