

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y DETERMINACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL EN LA CUENCA
DEL RÍO MACHUCA, PACÍFICO CENTRAL DE COSTA RICA.**

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado
Centroamericano en Geología para optar al grado y título de Maestría Académica en
Hidrogeología y Manejo de los Recursos Hídricos

JOSÉ PABLO BONILLA VALVERDE

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2014

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a Dios y a la mayor la bendición que me ha dado en la vida: mi familia, sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible. Quiero dedicar este trabajo especialmente a mis sobrinos: Montserrat y Santiago y su alegría; a mis hermanos: Eugenio, Catalina y Adrián por su apoyo incondicional; a mis suegros, Johann y Giselle por su motivación; a mis padres, Gonzalo y Flor, quienes siempre han estado ahí para mí; y a mi esposa Ann, quien ha llevado la mayor parte de este proyecto, y que con su paciencia, humor y comprensión me ha ayudado en los momentos más difíciles.

Este trabajo es dedicado a vos Preciosa, a vos y a los que vendrán.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el aporte del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA), del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) por poner a disponibilidad sus bases de datos de pozos y datos hidrológicos. Se desea agradecer a la UEN Gestión Ambiental del AyA y sus áreas funcionales de Cuencas Hidrográficas, de Hidrogeología y de Estudios Básicos y a la sección del Laboratorio Nacional de Aguas de la Región Pacífico Central y a la jefatura de las misma Región, por su contribución. Especialmente al apoyo ofrecido por Luis Zúñiga y Adrián Rojas y a todo su equipo de trabajo en la campaña realizada en abril del 2013.

Además quisiera agradecer a mis jefaturas directas, Alejandro Fernández y José Luis Arguedas, por todo el apoyo brindado. A los compañeros Luis Diego Calvo, Marlon Castro, Humberto Coto y Hugo Rodríguez quienes de una u otra manera han colaborado en esta investigación. A mis compañeros y profesores de la maestría, por todo el apoyo brindando a lo largo de mis estudios. Quisiera reconocer el aporte de Jairo García, por su paciencia y duras pero acertadas observaciones. Al comité examinador, a la M.Sc. Ingrid Vargas y al Dr. Mauricio Mora y a los asesores: M.Sc. Federico Arellano y M.Sc. Héctor Zúñiga, su guía y discusión de esta investigación han sido fundamentales. Un especial reconocimiento al Dr. Marco Barahona por su activa participación.

Finalmente, quisiera reconocer todo apoyo y motivación brindada por mi familia. A mis padres, Gonzalo Bonilla y Flor Valverde, mis hermanos, Catalina y Adrián, y sobrinos, Montse y Santiago, por brindarme fortaleza y apoyo. A mis suegros, Johann y Giselle, por la presión positiva para sacar este trabajo, y a mi esposa, por su paciencia, comprensión, trasnochadas, apoyo en los momentos de flaqueza y por todo el tiempo que era suyo y no se lo he podido dedicar.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geología de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrogeología y Manejo de los Recursos Hídricos”

M.Sc. Ingrid Vargas Azofeifa
Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado

Dr. Marco Barahona Palomo
Director de Tesis

M.Sc. Federico Arellano Hartig
Asesor

M.Sc. Héctor Zúñiga Mora
Asesor

Dr. Mauricio Mora Fernández
Director
Programa de Posgrado en Geología,

José Pablo Bonilla Valverde
Candidato

Tabla de contenidos

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Tabla de contenidos.....	v
Resumen	viii
Abstract.....	ix
Lista de cuadros	x
Lista de figuras	xii
Capítulo I. INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
1. Justificación.....	- 3 -
2. Objetivos	- 4 -
2.1. Objetivo general	- 4 -
2.1. Objetivos específicos	- 4 -
3. Alcances y limitaciones	- 5 -
3.1. Alcances	- 5 -
3.2. Limitaciones.....	- 5 -
Capítulo II. ANTECEDENTES.....	- 7 -
1. Estudios previos	- 7 -
2. Geología	- 12 -
2.1. Grupo Aguacate.....	- 14 -
2.2. Formación Punta Carballo	- 14 -
2.3. Formación Tivives	- 15 -
2.4. Formación Orotina.....	- 15 -
2.5. Formación Esparta (Nivel 1)	- 16 -
2.6. Terrazas aluviales holocénicas	- 16 -
3. Clima	- 17 -
3.1. Zonas de vida	- 18 -
4. Demografía	- 19 -
4.1. Estimaciones y proyecciones de población en Costa Rica	- 26 -
Capítulo III. MARCO TEÓRICO.....	- 30 -
1. Aspectos fisiográficos de las cuencas	- 30 -
2. Balance hídrico de cuenca	- 31 -

3. Balance hídrico de suelos	- 36 -
4. Variables meteorológicas	- 37 -
4.1. Precipitación	- 37 -
4.2. Evapotranspiración	- 38 -
5. Escorrentía	- 39 -
6. Recarga acuífera	- 40 -
7. Hidrogeoquímica.....	- 41 -
8. Proyecciones de población	- 42 -
Capítulo IV. METODOLOGÍA.....	- 44 -
1. Aspectos fisiográficos	- 44 -
2. Balance hídrico.....	- 45 -
2.1. Precipitación	- 46 -
2.2. Evapotranspiración.....	- 46 -
2.3. Escorrentía.....	- 47 -
3. Hidrogeoquímica.....	- 50 -
4. Proyecciones de población	- 53 -
4.1. Densidad de población	- 55 -
Capítulo V. ANÁLISIS DE RESULTADOS	- 57 -
1. Aspectos fisiográficos	- 57 -
2. Balance hídrico.....	- 59 -
2.1. Escenarios de precipitación.....	- 60 -
2.2. Escenarios de evapotranspiración.....	- 67 -
2.3. Escenarios de escorrentía.....	- 71 -
2.4. Balance hídrico anual	- 79 -
2.5. Balance hídrico mensual.....	- 81 -
2.6. Balance hídrico de suelo.....	- 90 -
3. Hidrogeoquímica.....	- 92 -
4. Proyecciones de población	- 101 -
4.1. Comparación gráfica.....	- 102 -
4.2. Tendencias censales	- 107 -
4.3. Componentes demográficos	- 109 -
4.4. Escenarios densidad de población	- 112 -
4.5. Selección, proyección y estimación de la demanda.....	- 118 -
Capítulo VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	- 121 -
1. Conclusiones	- 121 -

2. Recomendaciones.....	- 121 -
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 123 -
APENDICES	- 129 -
A.1. Aspectos fisiográficos – Curvas hipsométricas	- 129 -
A.2. Aspectos fisiográficos – Perfil de los ríos	- 131 -
A.3. Balance hídrico mensual – Modelos Thornthwaite- Mather modificado.....	- 132 -
A.4. Hidrogeoquímica – Estimación cationes faltantes.....	- 134 -
A.5. Hidrogeoquímica – Diagramas de Piper.	- 135 -

Resumen

Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial en la cuenca del río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica.

Se estima la recarga potencial en la cuenca del río Machuca en el Pacífico Central de Costa Rica en América Central para atender la expectativa de desarrollo urbano por la construcción de la ruta 27 (carretera San José – Caldera). Se espera que el mayor impacto urbanístico se dé en los cantones de San Mateo y Orotina, los cuales engloban casi en su totalidad la cuenca del río Machuca; esta pertenece a la cuenca hidrográfica Jesús María.

Para estimar la recarga potencial se calculan las principales variables del balance hídrico: la precipitación, la evapotranspiración, las pendientes del terreno, el uso y tipo del suelo entre otras. Se realizan los balances hídricos anual y mensual de la cuenca, el último a partir de la metodología planteada por Thornthwaite-Mather Modificado y el balance hídrico del suelo siguiendo la metodología propuesta por Schosinsky (2006). Además, se realiza un análisis hidrogeoquímico de las aguas de la cuenca del río Machuca, a partir de una caracterización físico-química de las aguas superficiales y la base de datos del Laboratorio Nacional de Aguas del AyA. Se realizan además proyecciones de población para estimar la demanda del recurso hídrico para abastecimiento de la población.

Se determinó la recarga potencial en la cuenca del río Machuca a partir de la caracterización hidrológica del orden de los 1000 mm/año. También se determinó la presencia de un sistema acuífero que recarga el cauce principal del río Machuca y el río Surubres. Esto se corroboró a través de los aforos durante la época de estiaje y la caracterización hidrogeoquímica. Se proyectó que la demanda de recurso hídrico en el año 2040 se encontrará entre los 150 l/s y 210 l/s dependiendo de la capacidad de los operadores de los acueductos; se espera que la población en este año alcance los 41 mil habitantes, duplicándose en treinta años. Se cuantificó que el caudal superficial en la parte alta de la cuenca del río Machuca no supera los 75 l/s. Se concluye que el recurso superficial no es suficiente para atender la demanda de agua estimada al 2040.

Palabras claves: balance hídrico, balance hídrico de suelos, modelo Thornthwaite-Mather modificado, Método Schosinsky, Orotina, San Mateo, río Machuca.

Abstract

Hydrological analysis and determination of the potential groundwater recharge in the Machuca River basin, Central Pacific of Costa Rica.

The potential groundwater recharge in the basin of the Machuca River in the Central Pacific of Costa Rica in Central America was estimated to meet the expectation of urban development due to the construction of the Highway 27 (San José – Caldera Highway). It is expected that the biggest urban impact will take place in the cantons of San Mateo and Orotina, which almost encompass the whole basin of the Machuca River, which belongs to the Jesús María hydrographic watershed.

To estimate the potential groundwater recharge the main variables are calculated: precipitation, evapotranspiration, terrain slopes, land use and soil type, among others. The annual and monthly water balance of the basin were calculated, the last one based on the methodology proposed by the Modified Thornthwaite-Mather model and the soil water balance following the methodology proposed by Schosinsky (2006). In addition, a hydrogeological analysis of the basin of the Machuca River was performed, considering the physical-chemical characterization of the surface waters and the database of the *AyA's Laboratorio Nacional de Aguas*. Projections of the population were also carried out to estimate the demand for water supply.

The potential groundwater recharge in the basin of the Machuca River was determined, being in the order of 1000 mm/year. Also, the presence of an aquifer system that recharges the main waterway of the Machuca River and the Surubres River was determined. This was corroborated by flow measurements taken during the dry season and by hydrogeochemical characterization. It is projected that the demand of water resources in the year 2040 will be between 150 l/s and 210 l/s depending on the operational efficiency of the water supply systems. It is expected that the population in this year reaches 41 thousand inhabitants, doubling in thirty years. The surface flow in the upper Machuca river basin is not expected to exceed 75 L/s. It concludes that the superficial water resource is not enough to meet water demand estimated in 2040.

Keywords: water budget, water balance in soils, Modified Thornthwaite-Mather model, Schosinsky Method, Orotina, San Mateo, Machuca River.

Lista de cuadros

Cuadro 1. Datos climáticos de la Subregión climática Pacífico Norte 4 (PN4).....	- 17 -
Cuadro 2. Características de las zonas de vida en la cuenca del río Machuca.....	- 19 -
Cuadro 3. Información censal para los distritos en cuenca del río Machuca.	- 23 -
Cuadro 4. Características de las viviendas para los distritos en cuenca del Machuca basado en el censo del INEC 2011	- 25 -
Cuadro 5. Estimaciones y proyecciones para los distritos en cuenca del río Machuca según el CCP (2008).	- 28 -
Cuadro 6. Puntos de aforo históricos del AyA y puntos de la campaña del 2013.	- 48 -
Cuadro 7. Principales aspectos fisiográficos para las cuencas generadas a partir de los puntos de aforos de la cuenca hidrográfica Jesús María.....	- 58 -
Cuadro 8. Datos de precipitación de unas estaciones del Pacífico Central para los períodos 1977-1995 y 2001-2010.....	- 66 -
Cuadro 9. Datos de precipitación utilizados para todos los escenarios.....	- 67 -
Cuadro 10. Variación mensual porcentual evapotranspiración potencial en mm/mes.	- 69 -
Cuadro 11. Puntos de aforo históricos del AyA en la cuenca del río Jesús María.....	- 72 -
Cuadro 12. Caudal aforado en la Campaña 2013.....	- 76 -
Cuadro 13. Caudal que aporta o recarga el acuífero para la Campaña 2013	- 78 -
Cuadro 14. Balance hídrico anual por punto de aforo, en mm/año.	- 79 -
Cuadro 15. Porcentaje que representan los rangos de pendiente para cada cuenca.	- 82 -
Cuadro 16. Resultados anuales del balance hídrico mensual, en mm/año.	- 89 -
Cuadro 17. Resultados del balance hídrico de suelos, en mm/año.	- 90 -
Cuadro 18. Comparación de los resultados del balance hídrico (Thornthwaite-Mather) y del balance hídrico de suelos (Schosinsky), en mm/año.	- 91 -
Cuadro 19. Conductividad eléctrica e iones en los puntos de la campaña 2013 sobre las cuencas de los ríos Machuca y Jesús María.....	- 93 -
Cuadro 20. Conductividad y potencial de hidrogeno promedio para los pozos y nacientes en la cuenca del río Machuca operados por el AyA.	- 94 -

Cuadro 21. Proyecciones de población a partir del método de Comparación Gráfica. - 106 -	
Cuadro 22. Tasas de crecimiento para los distritos de San Mateo y Orotina. - 108 -	
Cuadro 23. Proyecciones de la población a partir del método de tendencia censal.... - 108 -	
Cuadro 24. Nacimientos, defunciones y tasas netas de crecimiento para los distritos de San Mateo y Orotina para el año 2013. - 110 -	
Cuadro 25. Resumen TMN utilizadas en los escenarios componentes demográficos.. - 111 -	
Cuadro 26. Proyecciones de población para los cantones de San Mateo y Orotina con el método de componentes demográficos..... - 112 -	
Cuadro 27. Disponibilidad de hectáreas para urbanizar con una pendiente >30%..... - 115 -	
Cuadro 28. Disponibilidad de hectáreas para urbanizar con una pendiente >40%..... - 116 -	
Cuadro 29. Disponibilidad de hectáreas para urbanizar con una pendiente >75%..... - 116 -	
Cuadro 30. Distribución de áreas para en los posibles escenarios, en Ha. - 117 -	
Cuadro 31. Máxima población que puede albergar la cuenca del río Machuca..... - 117 -	

Lista de figuras

- Figura 1. Ubicación general de la cuenca del río Machuca hasta su confluencia con el río Jesús María en el Pacífico Central de Costa Rica. - 8 -
- Figura 2. Geología en la cuenca del río Machuca tomado de Denyer et al. (2003). ... - 13 -
- Figura 3. Zonas de vida y estaciones meteorológicas en el área de la cuenca del río Machuca..... - 20 -
- Figura 4. División política a nivel de distritos dentro y fuera de la cuenca del río Machuca..... - 21 -
- Figura 5. Distribución porcentual de la población total de los distritos que abarcan parte de la cuenca del río Machuca basado en los censos 1950, 1963, 1973 y 1984 de la DGEC y en los censos 2000 y 2011 del INEC. - 24 -
- Figura 6. Crecimiento de la población en los distritos de la cuenca del río Machuca basado en los censos 1950, 1963, 1973 y 1984 de la DGEC y en los censos 2000 y 2011 del INEC. - 24 -
- Figura 7. Detalle viviendas desocupadas en los distritos de la cuenca del Machuca basado en el censo del INEC 2011. - 26 -
- Figura 8. Distribución porcentual de las estimaciones y proyecciones de la población del CCP en los distritos de la cuenca del río Machuca según el CCP (2008). - 28 -
- Figura 9. Estimaciones y proyecciones de la población en los distritos de la cuenca del río Machuca por el CCP (2008). - 29 -
- Figura 10. Diagrama de flujo simplificado para el método Thornthwaite-Mather modificado. - 35 -
- Figura 11. Diagrama de flujo para las cuencas formadas a partir de los puntos de aforo históricos del AyA y de la campaña 2013 en la cuenca de los ríos Paires, Jesús María, Surubres y Machuca. - 48 -
- Figura 12. Cuencas formadas a partir de los puntos de aforo históricos del AyA y de la campaña 2013 en la cuenca de los ríos Machuca, Jesús María y Paires. - 49 -

Figura 13. Meses del año con registro mensual de precipitación para las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca del río Machuca a partir de la información de las estaciones del ICE y del IMN.....	- 62 -
Figura 14. Polígonos de Thiessen para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires generados para los periodos 1977-1995 y 2001-2010.	- 63 -
Figura 15. Polígonos de Thiessen combinados con zonas de vida para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.	- 64 -
Figura 16. Isoyetas con la precipitación anual calculada para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.	- 65 -
Figura 17. Evapotranspiración real anual para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.....	- 70 -
Figura 18. Registro histórico de los aforos en la cuenca hidrográfica Jesús María.	- 73 -
Figura 19. Distribución mensual del registro histórico de los aforos del AyA en la cuenca hidrográfica Jesús María para cada cuenca.	- 74 -
Figura 20. Lámina de escorrentía promedio en los puntos de aforos históricos de la base de datos del AyA en la cuenca hidrográfica Jesús María.....	- 75 -
Figura 21. Aporte de los acuíferos aforados en la Campaña 2013 para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.	- 77 -
Figura 22. Imagen LANDSAT del USGS para determinar el uso del suelo en las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.	- 83 -
Figura 23. Mapa de pendientes (%) para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.....	- 84 -
Figura 24. Mapa tipo de suelos y resultados de las pruebas de infiltración para la cuenca del río Machuca.	- 85 -
Figura 25. Calibración de las láminas de escorrentía modeladas y aforadas en M10...	- 87 -
Figura 26. Calibración de las láminas de escorrentía modeladas y aforadas en M20...	- 88 -
Figura 27. Calibración de las láminas de escorrentía modeladas y aforadas en S10. ...	- 88 -
Figura 28. Conductividad eléctrica en las fuentes operadas por el AyA y los medidos en la Campaña de aforos del 2013.	- 96 -

Figura 29. Diagrama de barras para la caracterización química del agua superficial de la cuenca hidrográfica Jesús María, en miliequivalentes por litro	- 97 -
Figura 30. Diagrama con la concentración para los iones determinados en la Campaña 2013 para el cauce principal del río Machuca	- 98 -
Figura 31. Diagrama con la concentración para los iones determinados en la Campaña 2013 para el cauce del río Surubres (S10 y S20) y el río Machuca.	- 99 -
Figura 32. Diagrama con la concentración para los iones determinados en la Campaña 2013 para el cauce principal del río Jesús María.	- 99 -
Figura 33. Población entre 1950 y 2011 para los cuatro cantones seleccionados para la comparación gráfica de Costa Rica según los censos nacionales.	- 104 -
Figura 34. Tasa de Crecimiento Intercensal (TCI) en los cantones seleccionados para la comparación gráfica así como los del área de estudio.	- 105 -
Figura 35. Proyección de la población en los cantones de San Mateo y Orotina a partir del método de Comparación Gráfica a partir de los censos de 1953 a 2011... -	106 -
Figura 36. Proyección de la población en los cantones de San Mateo y de Orotina a partir del método de tendencia censal.	- 109 -
Figura 37. Proyección población para los cantones de San Mateo y Orotina a partir del método de componentes demográficos.	- 112 -
Figura 38. Área disponible para crecimiento poblacional en los cantones de San Mateo y Orotina.	- 114 -
Figura 39. Proyección de la población en los cantones de San Mateo y Orotina a partir de varios métodos demográficos.	- 118 -
Figura 40. Proyecciones de la población seleccionadas.	- 119 -

“en la abundancia del agua el tonto tiene sed”

Robert Nesta Marley, 1974

Capítulo I. INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es un motor de desarrollo para una región, el cual puede utilizarse para actividades tan distintas como la producción industrial o la agropecuaria, el transporte, el abastecimiento de las poblaciones, entre muchas otras. Este proyecto busca caracterizar el recurso hídrico en una cuenca del Pacífico Central de Costa Rica en América Central, específicamente busca cuantificar la recarga potencial en la cuenca del río Machuca que pertenece a la cuenca hidrográfica Jesús María.

El documento se compone de seis capítulos, los cuales son: introducción, antecedentes, marco teórico, metodología, análisis de resultados y conclusiones y recomendaciones así como de bibliografía. En la introducción (capítulo I) se bosquejan los contenidos de cada capítulo así como la justificación y los objetivos que guían esta investigación. Los antecedentes (capítulo II) se componen de cuatro apartados en los que se presentan: i) los principales resultados obtenidos en ciertos estudios previos respecto al tema de investigación; ii) la geología regional basada en el mapa geológico de la hoja Barranca escala 1:50 000 (Denyer et al., 2003); iii) una breve descripción del clima de la Zona Pacífico Norte que es donde se engloba la cuenca a investigar, basado en las regiones y subregiones climáticas de Costa Rica (Solano, 2001); y iv) los principales datos demográficos de los cantones que abarcan la cuenca del río Machuca – San Ramón, San Mateo y Orotina; todos de la provincia de Alajuela.

Los conceptos del balance hídrico de cuenca, las variables meteorológicas, la recarga, la hidrogeoquímica, el balance hídrico de suelos y las estimaciones de población se discuten en el Marco Teórico (capítulo III), los métodos y los procedimientos que se siguen para obtener los resultados de los conceptos desarrollados en el Marco Teórico se detallan que en la Metodología (capítulo IV). Con el objeto de contar con más puntos de aforo para calibrar y validar el balance hídrico de la cuenca del río Machuca se extiende el

área de estudio a regiones vecinas de los ríos Jesús María y Paires, todos pertenecientes a la cuenca hidrográfica Jesús María.

Los resultados, así como su análisis y discusión, se presentan en el Análisis de resultados (capítulo V), estos se dividen en tres apartados: el balance hídrico, la hidrogeología y las proyecciones de población. En el apartado del balance hídrico se determinan los escenarios de precipitación, evapotranspiración y uso de suelos para elaborar el balance hídrico anual, el balance hídrico mensual y el balance hídrico de suelo; donde se determinó que el mejor escenario de precipitación se obtiene a partir de las isoyetas. El modelo del balance hídrico mensual demuestra la menor recarga potencial que el balance hídrico de suelo; esto se debe al alto valor del coeficiente de infiltración, del orden de una unidad en todas las cuencas en el balance hídrico de suelo, lo cual implica que toda el agua que alcanza el suelo en la cuenca se infiltra.

A partir de la campaña de aforos y de la hidrogeología se demuestra la presencia de un sistema acuífero aportando recurso hídrico como flujo base en toda la cuenca del río Machuca. Con la hidrogeoquímica se demostró que las aguas de la parte alta de la cuenca presentes en el río Machuca no presenta las mismas características que las aguas de los pozos y nacientes en la misma zona, mientras que la conductividad eléctrica de las aguas en la parte media en el río es ligeramente menor que las de los pozos alrededor del mismo cauce.

Para las proyecciones de población y la estimación de la demanda se aplican tres métodos – el de la comparación gráfica, el de las tendencias censales y el de los componentes demográficos- y se comparan sus resultados, seleccionando el modelo de los componentes demográficos como el más probable; se determinó la máxima capacidad de ocupación del espacio físico que se puede dar en la cuenca. A partir de esta selección se estima la demanda de la población que se espera en el futuro.

Finalmente las conclusiones y las recomendaciones que derivan de la investigación se presentan en el capítulo VI (Conclusiones y recomendaciones). Donde se determina con la información disponible que a partir del recurso superficial de la cuenca del río Machuca no se está en capacidad de abastecer a la población que se estima ocupe el territorio, siendo esta la conclusión más importante.

1. *Justificación*

La cuenca hidrográfica del río Jesús María se dedica, principalmente, a la agricultura y a la ganadería; entre los principales productos agrícolas que se cultivan están el melón, el mango, la caña, la caña india para la exportación y el café (Rojas, 2011). La cuenca hidrográfica del Jesús María se compone de las subcuencas de los ríos Machuca, Paires, Cuarros y Jesús María, así como de otras pequeñas cuencas costeras. El objetivo de esta investigación es el estudio de la cuenca del río Machuca.

En el año 2010 se abrió el tránsito sobre la ruta 27 – recientemente denominada José María Castro Madriz – y también conocida como la carretera San José – Caldera que reduce significativamente el tiempo de viaje entre la ciudad capital de San José, las comunidades por las que pasa y el puerto de Caldera. Esta ruta atraviesa las cuencas de los ríos Tárcoles, Jesús María y Barranca y los cantones de San José, Escazú, Santa Ana, Mora y Turrubares – de la provincia de San José – Orotina de la provincia de Alajuela y Esparza de la provincia de Puntarenas. De esos cantones, es probable que el mayor impacto de desarrollo urbano se dé en los cantones de Esparza, San Mateo y Orotina. Se espera un desarrollo inmobiliario de gran magnitud en la zona aledaña a la carretera. Para el futuro se esperan otras inversiones en esta zona, como por ejemplo, el proyecto de construcción de un aeropuerto internacional.

Es de esperar que el impacto sobre el recurso hídrico sea considerable. Actualmente, los sistemas de abastecimiento de agua potable existentes en la zona no brindan un servicio que cumpla con los estándares del país en cuanto a calidad, cantidad y continuidad (AyA, 2010). Este estudio busca definir las posibles fuentes de abastecimiento para los polos de desarrollos habilitados por la ruta 27 en la parte baja de la cuenca del río Machuca, así como definir las pautas para una gestión integral del recurso hídrico con el objetivo de optimizar su disponibilidad.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Caracterizar hidrológicamente la cuenca del río Machuca para determinar la recarga potencial en la misma.

2.1. Objetivos específicos

- Desarrollar el balance hídrico de la cuenca hidrográfica del río Jesús María para cuantificar el recurso hídrico superficial.
- Caracterizar física y químicamente el agua superficial en el río Machuca para determinar posibles cambios en el cauce debidos a la interrelación con el acuífero.
- Realizar proyecciones según unos diferentes escenarios de crecimiento dentro del área de la cuenca del río Machuca para estimar la demanda futura de agua potable.

3. Alcances y limitaciones

3.1. Alcances

- Se pretendió cuantificar el potencial hídrico superficial de la cuenca del río Machuca para abastecer de agua potable a la población actual y futura.
- Se desarrolló el balance hídrico superficial anual para la cuenca hidrográfica Jesús María, y para las subcuencas de los ríos Paires, Jesús María, Surubres y Machuca.
- El modelo del balance hídrico superficial mensual para las cuencas Surubres y Machuca se calibró a escala mensual a partir del registro histórico de aforos y será válido únicamente para las condiciones de las mismas.
- Se proyectó la población futura dentro de la cuenca del río Machuca a partir de la información actual y para distintos escenarios de desarrollo.
- Se creó una herramienta para la gestión y ordenamiento territorial de la cuenca del río Machuca, especialmente para las municipalidades de los cantones de San Mateo y Orotina.

3.2. Limitaciones

- Ni el río Jesús María, ni el río Machuca, habían sido estudiado desde el punto de vista hidrológico como las cuencas vecinas – ríos Barranca y Tárcoles—, por lo tanto, no se cuenta con la misma información base que estas cuencas.

- La información meteorológica es limitada, solo se cuenta con nueve estaciones meteorológicas alrededor de la cuenca del río Machuca – solo una a menos de un kilómetro –, y de estas sólo una está dentro del área de estudio pero operó irregularmente desde 1947 hasta 1990, con solo 21 años completos de información.
- El registro histórico de aforos no es continuo, y solo se cuenta con un dato por mes en el mejor de los casos. El dato mensual es puntual, y este representa la esorrentía de todo el mes.
- El registro histórico cuenta en general con menos datos en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, y es más robusto en los meses de febrero y marzo.
- Todas las pruebas de laboratorio para la caracterización química del agua y suelo fueron realizadas por el AyA, y por lo tanto, la disponibilidad de las pruebas para determinar distintos parámetros estuvo en función de la capacidad del Instituto.
- Las proyecciones de población parte de supuestos que estiman como se va a desarrollar la población, que depende de muchas variables que no se pueden prever fácilmente.
- Conforme las proyecciones se alejan del último censo se tiene mayor incertidumbre de sus resultados

Capítulo II. ANTECEDENTES

Costa Rica cuenta con 34 cuencas hidrográficas principales (UNESCO, 2007); el río Machuca pertenece a la cuenca hidrográfica Jesús María, según está clasificación. La cuenca hidrográfica Jesús María se compone de las subcuencas de los ríos Paires, Jesús María, Machuca y Cuarros, así como de otras pequeñas cuencas costeras. La cuenca del río Machuca tiene un área cercana a los 150 km² (Figura 1), que representa el 39% de la cuenca hidrográfica Jesús María. A su vez esta se divide en varias áreas de drenaje, entre las que se encuentran los ríos Surubres, Centeno y las quebradas Ceiba, Grande, Zúñiga y Guayabal.

La cuenca del río Machuca, se encuentra al sur de los 10° latitud norte y al oeste de los 84° longitud oeste. Esta cuenca se ubica en el Pacífico Central de Costa Rica entre las cuencas de los ríos Jesús María y Tárcoles e incluye parte de los cantones de San Ramón, San Mateo y Orotina, todos de la provincia de Alajuela. La cuenca se encuentra entre las coordenadas 425 000 y 450 000 metros este y 1 095 000 y 1 110 000 metros norte de la proyección CRTM 05.

1. Estudios previos

Tanto la cuenca del río Machuca como la cuenca hidrográfica Jesús María en el Pacífico Central de Costa Rica cuentan con poca o nula información con respecto a estudios geológicos, hidrológicos o hidrogeológicos y uso de suelo, así como es escasa en datos de caudales, precipitación, temperatura, entre muchos otros. Específicamente en el río Machuca solo se cuenta con un Proyecto Final de Graduación (PFG) en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica que data del año 1993, en el cual se estudiaron los caudales máximos en el río Machuca (Camacho, 1993).

Camacho (1993) realizó un estudio de avenidas máximas en el sitio de presa de la toma sobre el río Machuca, la cual se utiliza para el abastecimiento de una parte de la ciudad de San Mateo. Al no contar con suficiente información en la cuenca del río Machuca, se recurre a un análisis hidrológico mediante la comparación con cuencas vecinas, en este caso la del río Barranca y la del río Grande. En este estudio se compararon regímenes climáticos, características morfológicas e hidrometeorológicas y escorrentías para calibrar el modelo de la cuenca del río Machuca y estimar las avenidas máximas.

El Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS) de la Universidad de Costa Rica (UCR) realizó el diagnóstico del Plan Regulador de Orotina (ProDUS, 2007) y la propuesta del Plan Regulador de Orotina (ProDUS, 2009). Tanto el Diagnóstico como la Propuesta son estudios técnicos que fundamentan el Plan Regulador – el cual es un instrumento técnico para administrar un territorio y dirigir el desarrollo sostenible del mismo (ProDUS, 2007). Según ProDUS (2007) el Plan Regulador tiene tres dimensiones fundamentales: la económica, la social y la ambiental.

El diagnóstico se compone de diez capítulos que abarcan temas desde aspectos físicos como la realidad económica del cantón de Orotina; se rescata particularmente el capítulo Aspectos Físicos (Capítulo 1) donde se desarrollan los temas de topografía y pendientes, hidrología y cuencas, geología y geomorfología, uso de suelo macro e hidrogeología. La propuesta presenta escenarios de proyección de población así como de densidades de poblaciones.

En el apartado Hidrogeología (1-5.1) del Diagnóstico se evalúa el recurso subterráneo y superficial en el cantón de Orotina (ProDUS, 2007). ProDUS (2007) establece la precipitación promedio anual para el cantón de Orotina en 2166 mm/año, y la

recarga potencial oscila entre los 454 – 673 mm/año; siendo prácticamente la totalidad del cantón de Orotina considerada zona de recarga acuífera.

La geología del cantón es descrita como *“una serie de depósitos de origen volcánico, dentro de los cuales se encuentran depósitos aluviales aislados y de forma lenticular. Estos materiales sobreyacen el basamento sedimentario (Formación Punta Carballo)”* (ProDUS, 2007). Además se señala que: *“...no se puede afirmar que en el área de estudio—cantón de Orotina— exista un único nivel productor por el contrario... el medio en el que fluye el agua subterránea es bastante complejo; al punto que se vuelve una tarea casi imposible el definir con claridad la ubicación de los niveles productores.”* (ibíd.)

A pesar de ser un documento técnico, la municipalidad de Orotina aún no ha aprobado la Propuesta del Plan Regulador realizada por ProDUS y por lo tanto, no tiene carácter de ley; sin embargo se rescatan los criterios planteados para el ordenamiento territorial, tanto para el cantón de Orotina como para San Mateo, ya que este no cuenta con diagnóstico ni propuesta de Plan Regulador. Se pretende que se dé un desarrollo urbanístico en las áreas libres, las cuales deben carecer de restricciones ambientales: pendientes menores al 30%, fuera de zonas de protección de ríos, entre otras.

El Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) publicó el Balance hídrico superficial de Costa Rica, Período 1970-2002 (UNESCO, 2007) donde el país se divide en las 34 cuencas hidrográficas principales entre las que se encuentra la cuenca del río Jesús María. Estas cuencas abarcan todo el territorio de Costa Rica, por lo que en algunos casos se agrupan cuencas aledañas a la principal, especialmente en las costas. El balance hídrico superficial permite conocer el volumen de entrada de agua en la cuenca en forma de lluvia, el volumen que escurre superficialmente y las pérdidas de volumen por causa de la evaporación de los cuerpos de agua y la transpiración de la vegetación (UNESCO, 2007).

Este balance hídrico considera que la precipitación media temporal y espacial (P) más el error de medición (η) es igual a la esorrentía media temporal y espacial (Q) más la evapotranspiración real media temporal y espacial (ETR); esta simplificación es válida para áreas relativamente extensas y para períodos en los que los almacenamientos se minimizan (UNESCO, 2007). En el balance anual para la cuenca hidrográfica Jesús María del PHI-LAC se considera una precipitación de 2490 mm/año, una esorrentía de 1717 mm/año, lo que equivale a 54,3 l/s/km² y una evapotranspiración real de 975 mm/año con una discrepancia de 202 mm/año, lo que equivale a un 8,1%. El modelo utilizado por el PHI-LAC para este trabajo es el siguiente:

$$P - Q - ETR + \eta = 0$$

En contraste, esta cuenca se excluyó del estudio *Balances Hídricos por cuencas hidrográficas y Propuesta de Modernización de las Redes de Medición en Costa Rica* (IMTA, 2008) para el Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAIE) realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Este estudio comprende el cálculo del balance hídrico y la disponibilidad de agua en 15 cuencas hidrográficas de Costa Rica de las 34 definidas por UNESCO (2007). Las quince cuencas estudiadas abarcan una superficie de alrededor de 33 000 kilómetros cuadrados, lo que representa un 64% de la superficie del país (IMTA, 2008).

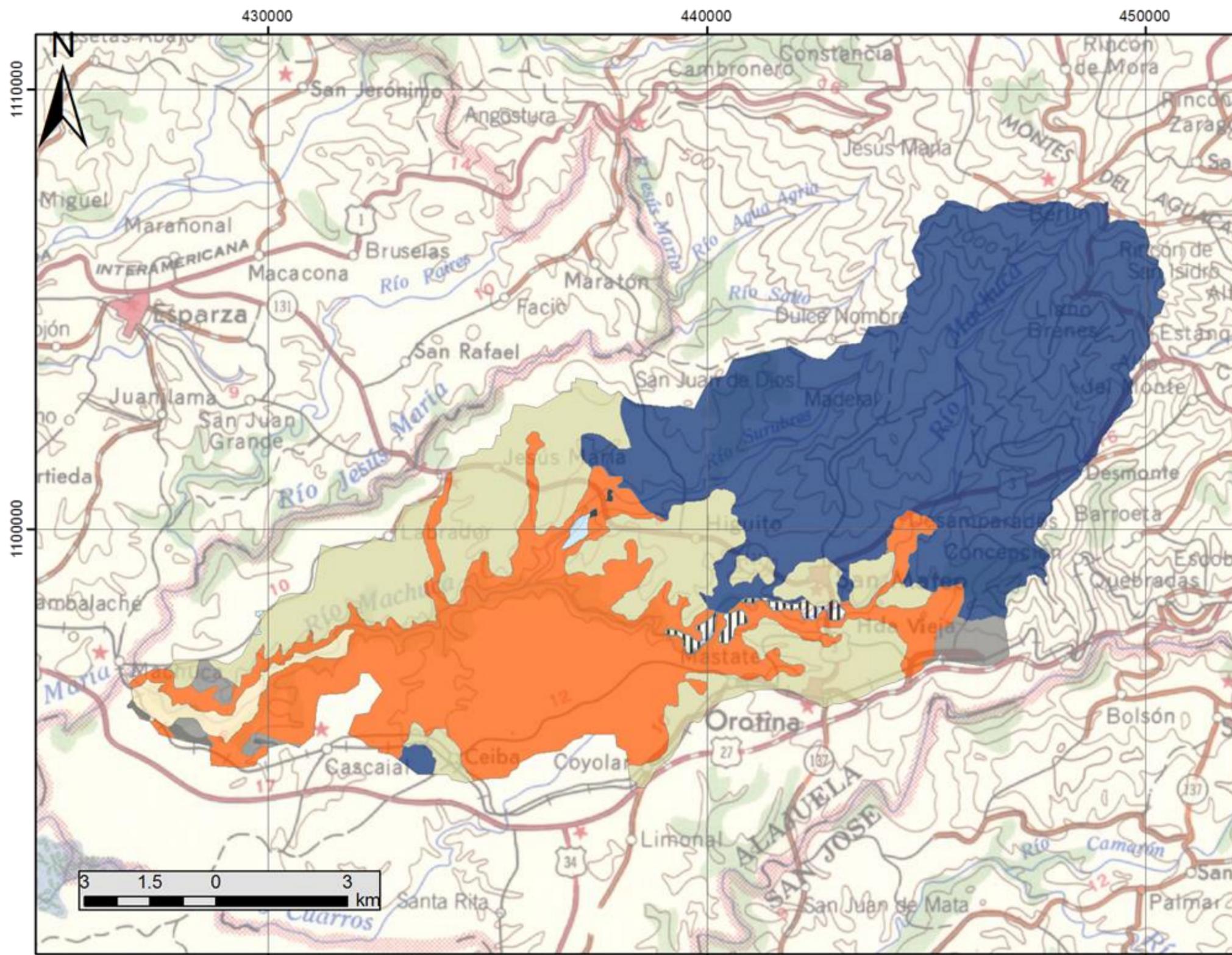
En este documento no se indican cuáles fueron los criterios de selección de las quince cuencas estudiadas, más allá de ser consideradas como cuencas prioritarias por el MINAIE (IMTA, 2008). Aunque en este estudio no se incluyó la cuenca hidrográfica Jesús María, si compendió las dos cuencas aledañas a ésta: las cuencas hidrográficas Barranca y Tárcoles, que tienen áreas de 479 km² y 2166 km² respectivamente; estas cuencas son 1,3 veces y 5,7 veces mayores que la cuenca hidrográfica Jesús María respectivamente.

El Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) desarrolló el *Atlas de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica* (IMN, 2011) dentro del que se incluye la cuenca hidrográfica Jesús María. Ese informe contiene la ubicación espacial, aspectos socioeconómicos, biofísicos, climatológicos y de oferta y demanda de la cuenca. Según Rojas (2011) ante un escenario climático normal la cuenca hidrográfica Jesús María tiene una oferta hídrica de 627 hm³/año (1663 mm/año) y se tiene otorgado (o concesionado) un caudal de 481,3 l/s (15,2 hm³/año o 40 mm/año), lo cual es menos de un 2,4% de la oferta hídrica. Este escenario es ligeramente menor al presentado por el PHI-LAC en el 2007 de 1717 mm/año con una precipitación de 2490 mm/año (UNESCO, 2007).

Las concesiones de agua en Costa Rica son gestionadas por la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía, la base de datos de las concesiones de Costa Rica registra para la cuenca hidrográfica Jesús María un total de 147 l/s de recurso superficial otorgados; de estos 132,5 l/s están en el distrito de Ceiba y 4,0 l/s en el distrito Coyolar ambos del cantón de Orotina y 10,5 l/s del distrito de San Mateo del mismo cantón. De estos 124 l/s están fuera del área de estudio (84%), 10 l/s se encuentran concesionados para riego sobre el cauce principal del río Machuca a menos de 500 metros de la confluencia con el río Jesús María (7%) y otros 10 l/s se toman del río Salto en la cuenca del río Jesús María; los restantes 3 l/s están otorgados sobre el río Machuca.

2. Geología

La mayor parte de la cuenca del río Machuca se encuentra en la hoja cartográfica 3245-I, escala 1:5000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) conocida como Hoja Barranca. La geología de la hoja Barranca es descrita por Denyer et al. (2003) en el mapa geológico de la hoja Barranca. En la Figura 2 se muestra el mapa geológico de la Hoja Barranca (Denyer et al., 2003) y el área de estudio; a continuación se hace una breve descripción de las principales estructuras que se observan en dicha figura.



Cuenca del Río Machuca
Mapa geológico hoja
Barranca

Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial en la cuenca del río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica

Fuentes:
 Mapa geológico Hoja Barranca - Denyer et al.
 Mozaico hojas cartográficas 1:200 000 - IGN

Simbología

Geología

- Aluviones y manglares
- Avalancha Ardiente
- Fm. Esparta
- Fm. Orotina
- Fm. Tivives
- Grupo Aguacate
- Ignimbrita Surubres
- Mb. Roca Carballo
- Terrazas aluviales holocenas

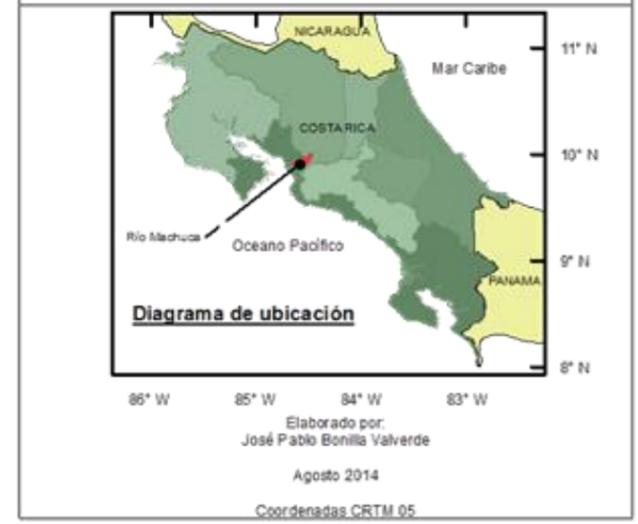


Figura 2. Geología en la cuenca del río Machuca tomado de Denyer et al. (2003).

Según Denyer *et al.* (2003) en el área de estudio se presentan rocas volcánicas en la parte alta de la cuenca que pertenecen al Grupo Aguacate, rocas sedimentarias volcanoclásticas [sic] en la parte media de la Formación Tivives y en la parte baja de la cuenca, mientras que en la desembocadura del río Machuca en el río Jesús María se hallan depósitos aluviales y coluviales recientes. Además del Grupo Aguacate dentro del área de estudio se encuentran principalmente las formaciones Tivives y Esparta, las que yacen las formaciones Punta Carballo y Orotina (ibíd.).

2.1. Grupo Aguacate

El Grupo Aguacate se extiende a lo largo de un antiguo arco volcánico de unos 110 kilómetros de ancho, compuesto en su mayor parte por lavas basálticas y andesíticas, depósitos de flujos piroclásticos, brechas, tobas y sedimentos vulcanoclásticos [sic], cortado por pequeños cuerpos intrusivos y extrusivos y diques basálticos (Denyer y Kussmaul, 2000).

Según Denyer *et al.* (2003) en el Grupo Aguacate se diferencian dos lavas y una brecha volcánica, su formación se ubica desde el Mioceno terminal hasta el Plioceno. El espesor de esta formación es de por lo menos 800 metros y sus contactos son discordantes con las otras formaciones (Anónimo, 1969). Este grupo se encuentra dividido en varias formaciones, con edades, litologías y composición química diferentes (Denyer y Kussmaul, 2000).

2.2. Formación Punta Carballo

Se compone de areniscas calcáreas y areniscas oscuras (Attwood, 1882, en Denyer *et al.*, 2003) del Mioceno Medios basados en asociaciones de moluscos (Hass, 1942, en

Denyer et al., 2003). MacDonald (1920, en Denyer et al., 2003) indica que la serie de arenisca caliza de Punta Carballo está constituida por areniscas, cascajos conglomerados y calizas. ProDUS (2007) define esta formación como el basamento sedimentario sobre el cual sobreyacen una serie de depósitos de origen volcánico, con depósitos aluviales aislados de forma lenticular.

2.3. Formación Tivives

Está constituida por una mesobrecha volcánica de clastos especialmente andesíticos y, menos frecuentemente, ignimbríticos; la matriz está compuesta en su mayoría por detrito volcánico de tamaño de ceniza; la edad geológica fue determinada por datación Ar/Ar [*sic*] ubicándose entre los 1,7 millones de años (Ma) y los 1,12 Ma, a inicios del Pleistoceno, (Denyer et al., 2003). El espesor alcanza los cien metros (Madrigal, 1970, por Denyer et al., 2003). El contacto inferior y superior de esta Formación es la Formación Punta Carballo y la Formación Orotina respectivamente (ProDUS, 2007).

2.4. Formación Orotina

Corresponde a un ambiente de formación de flujo piroclástico del Pleistoceno; descritas por Pérez (2000, por Denyer et al., 2003) como: ignimbritas de color gris celeste, con fiammes de obsidiana, bombas de escoriáceas negras de tamaño centimétrico, pómez amarillentas alargadas con una matriz tobácea fina, que contiene plagioclasas y piroxenos. Estratigráficamente sobreyace a la Formación Punta Carballo y al Grupo Aguacate (Denyer et al., 2003) Según ProDUS (2007) la Formación Orotina es la penúltima en depositarse en el área, sobre la Formación Tivives – encontrándose cubierta únicamente por fragmentos de la Formación Esparta.

2.5. Formación Esparta (Nivel 1)

Corresponde a una brecha o “lavina” según Madrigal (en: Denyer et al., 2003) con dominancia de fragmentos de basalto; el ámbito de edad (Marshall, 2000, por Denyer et al., 2003) es entre 100 000 y 200 000 años. Esta formación alcanza espesores entre 50 metros hasta uno o dos metros (Denyer et al., 2003).

Se interpreta que esta formación coincide con el término “lavina” que es introducido por Dóndoli (en: Anónimo, 1969) y se utiliza para describir la unidad estratigráfica denominada lahares, la cual se describe como “masas detríticas bastantes grandes que saturadas de agua se desprendieron en forma de alud hacia las partes bajas”; según Dóndoli (en: Anónimo, 1969). Son masas caóticas, un conjunto de suelos bastante meteorizados y de piedras de todos los tamaños esparcidas desordenadamente; los lahares se extienden desde San Mateo hacia el Pacífico, donde hacen contacto con el cuaternario aluvial entre el estero de Tivives y el estero de Guacalillos (Anónimo, 1969).

2.6. Terrazas aluviales holocénicas

En la zona se presentan varios niveles de terrazas con depósitos fluviales en las márgenes del río Machuca, con clastos desde centimétricos hasta métricos, cuya constitución es predominantemente de las lavas del Grupo Aguacate (Denyer et al., 2003). Para Denyer et al. (2003) la presencia de estos depósitos ochenta metros por encima del nivel actual del río demuestra un rejuvenecimiento reciente de la red fluvial.

3. *Clima*

La cuenca del río Machuca se encuentra en la región climática Pacífico Norte de Costa Rica, subregión cuenca baja de los ríos Barranca y Grande de Tárcoles definida como PN4 por Solano (2001), la cual pertenece al régimen de precipitación del Pacífico, caracterizado por la presencia de un periodo seco y otro lluvioso bien definidos (Solano, 2001). Se destaca la presencia de áreas de clima templado (mesotermal) y de áreas de clima tropical con estación seca (MEH, 1953, por Solano, 2001). El tipo de clima para el PN4 es lluvioso con influencia monzónica [*sic*] y presenta una vegetación forestal del tipo bosque seco tropical (Solano, 2001). Otra información relevante del clima se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Datos climáticos de la Subregión climática Pacífico Norte 4 (PN4)

Parámetro	Valor
Precipitación total anual (mm)	2637
Temperatura máxima promedio mensual (°C)	27 a 30
Temperatura mínima promedio mensual (°C)	20 a 23
Temperatura media mensual (°C)	25 a 28
Número de días con lluvia > 1 mm	111
Periodo seco (meses)	4

Según Rojas (2011), el periodo seco para la cuenca hidrográfica Jesús María se registra que empieza a mediados de noviembre y termina hasta el mes de abril inclusive, mientras que la estación lluviosa se inicia en mayo y concluye a mediados del mes de noviembre; con un descenso en la precipitación en los meses de julio y agosto. La precipitación media anual para el registro de lluvias presenta un ámbito de 1500 mm en las partes baja de la cuenca y 4000 mm en la parte alta (Rojas, 2011).

El IMN elaboró la segunda edición del Atlas Climatológico de Costa Rica (ACCR) con la información actualizada al año 2004 (IMN, 2009). El Atlas Climático se define como una

recopilación ilustrada del clima del país compuesto de mapas, gráficos, cuadros y descripciones de los elementos y variables del clima; en el ACCR se incluyen 40 mapas y 6 gráficas de las variables climáticas más significativas, precipitación y temperatura mensual (IMN, 2009). Los mapas que incluye el ACCR son precipitación total, número de días con lluvia, temperatura media anual, temperatura máxima y mínima media anual, brillo solar anual y durante la época seca y lluviosa y evapotranspiración. El ACCR también incluye una descripción por cada mapa (IMN, 2009).

3.1. Zonas de vida

Las zonas de vida son una herramienta propuesta por L.R. Holdridge para clasificar un territorio en unidades ecológicas, las cuales están en función de la biotemperatura, la precipitación anual total y la evapotranspiración potencial (Holdridge, 1959). La biotemperatura es una expresión en función de la temperatura del aire comprendida entre los 0°C y 30°C que determina el ritmo e intensidad de los procesos fisiológicos de las plantas (Holdridge, 1959). El área de estudio cuenta con un total de cinco unidades ecológicas o zonas de vida: el bosque húmedo (bh), el bosque muy húmedo (bmh), el bosque seco (bs), el bosque muy seco (bms) y el bosque pluvial (bp). Estas zonas se subdividen a su vez en montano, montano bajo, premontano, subtropical y tropical.

Se identifican dos zonas de vida sobre la cuenca del río Machuca con distintos rangos de precipitación; la zona bosque húmedo tropical (bh-T), con más presencia sobre las partes media y baja de la cuenca, con un ámbito de precipitación entre los 2000 y los 4000 milímetros al año; y el bosque muy húmedo premontano (bmh-P) con un rango de precipitación mayor, de 4000 a 8000 milímetros por año en la parte alta de la cuenca. En ambas zonas de vida la temperatura media anual es superior a los 24°C. El Cuadro 2 presenta las zonas de vida en el área de estudio, así como su sigla, los ámbitos de temperatura media anual y la precipitación media anual en cada zona de vida. La Figura 3

presenta la distribución espacial de las zonas de vida en la cuenca del río Machuca y las estaciones meteorológicas.

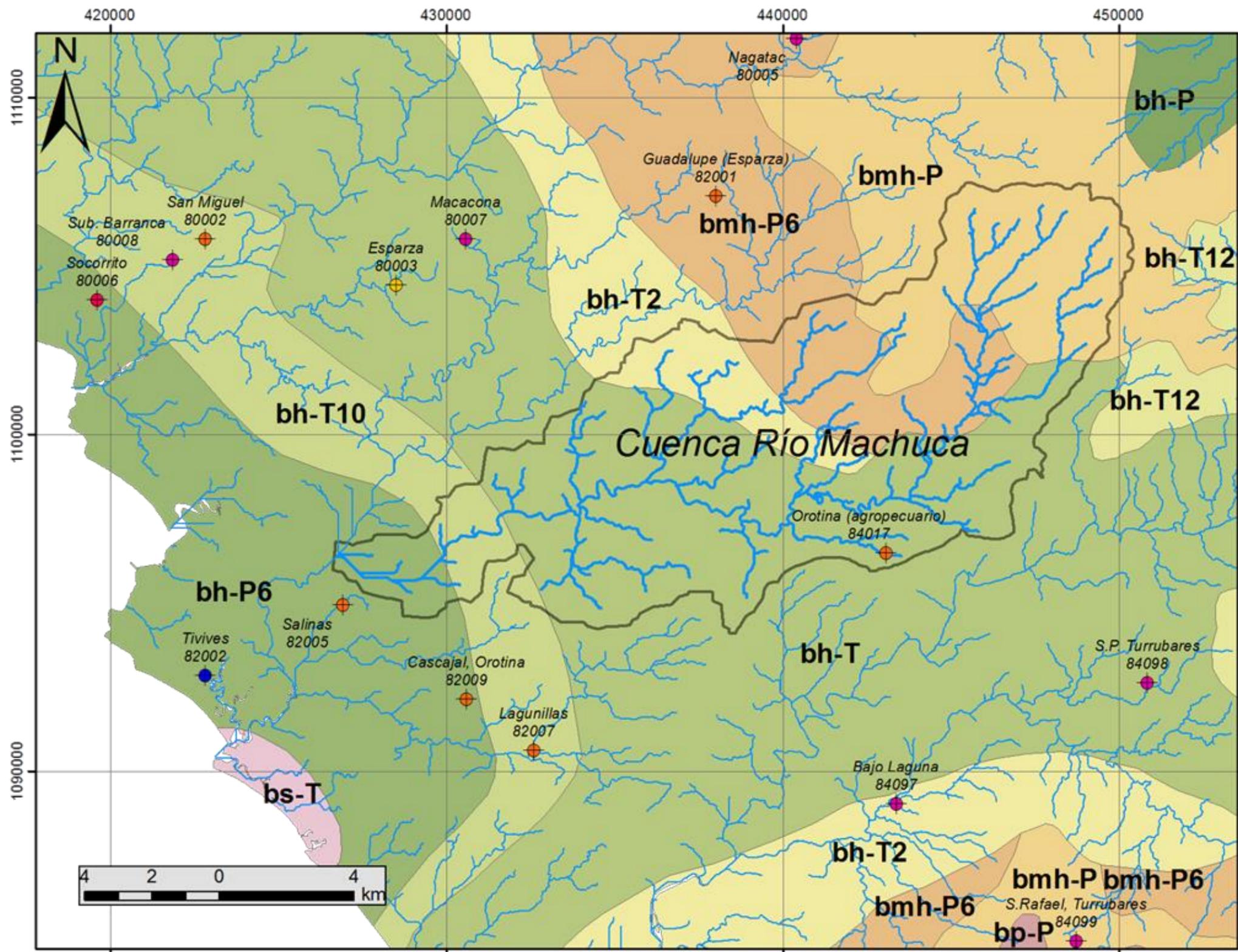
Cuadro 2. Características de las zonas de vida en la cuenca del río Machuca.

Zona de vida		Siglas	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm)
Bosque húmedo	premontano	bh-P	18 - 24	1100 - 1200
	tropical	bh-T	> 24	2000 - 4000
Bosque muy húmedo	premontano	bmh-P	18 - 24	2000 - 4000

4. *Demografía*

Según la división política de Costa Rica, la cuenca del río Machuca está ubicada en los cantones de San Mateo al norte y Orotina al sur, este río es el límite entre ambos cantones. Una pequeña parte de la cuenca, precisamente donde nace el río Machuca, está ubicada en el cantón de San Ramón, entre los poblados de Berlín y Llano Brenes. La Figura 4 muestra la cuenca del río Machuca en el contexto de la división política.

El cantón de San Mateo está constituido por cuatro distritos, los cuales son: San Mateo, Desmonte, Jesús María y Labrador, siendo este último segregado del distrito de Jesús María según el decreto N°37-2112-MGP del 6 de agosto de 2012. El cantón de San Mateo limita al oeste y al norte con los cantones de Esparza y San Ramón, y su límite lo establecen los ríos Jesús María y Agua Agria respectivamente. El cantón de Orotina se compone de cinco distritos, los cuales son Orotina, Mastate, Hacienda Vieja, Coyolar y Ceiba; este cantón limita al sur con los cantones de Turubares y Garabito, siendo respectivamente los ríos Grande de Tárcoles y Cuarros sus límites.



Cuenca del Río Machuca Zonas de vida y estaciones meteorológicas en el área

Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial en la cuenca del río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica

Fuentes:
Estaciones meteorológicas - ICE & IMN
Atlas CR 2008 - TEC

Simbología

● ICE	~ otros
● IMN	~ Machuca
● MOPT	⊕ C. río Machuca
● SENARA	
● UCR	

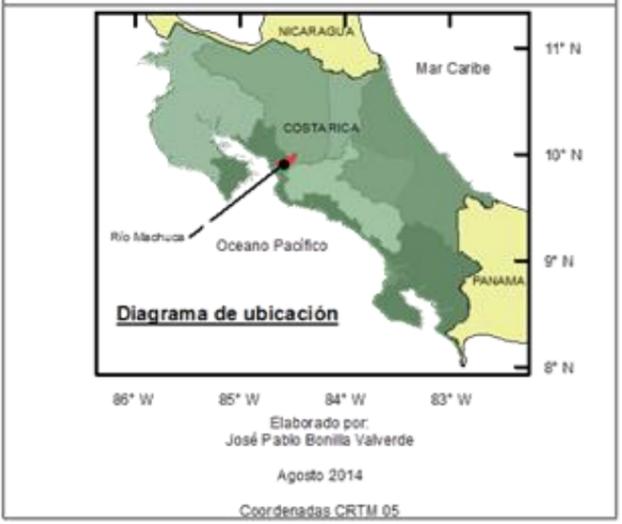
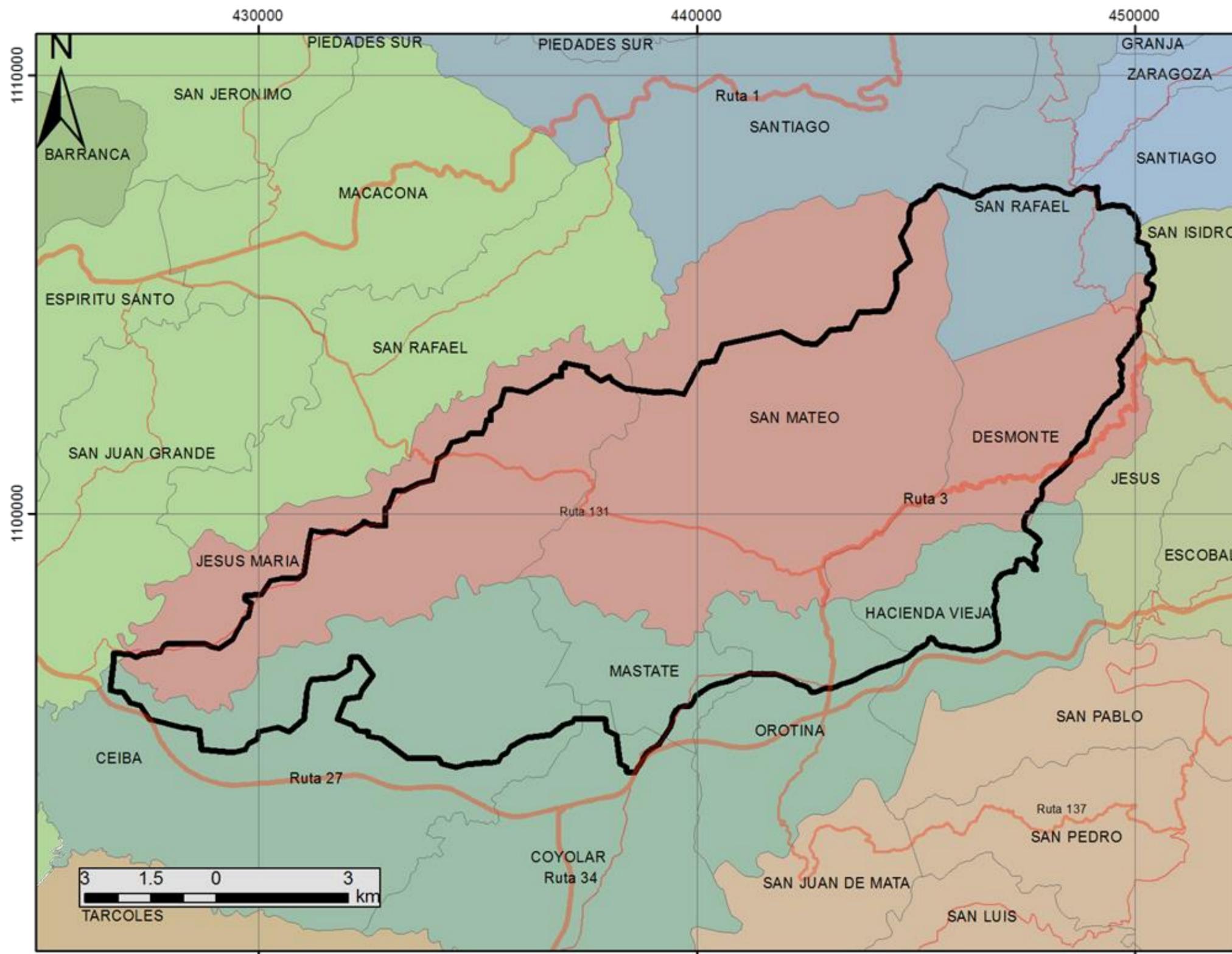


Figura 3. Zonas de vida y estaciones meteorológicas en el área de la cuenca del río Machuca.



Cuenca del Río Machuca

División política en distritos y cantones

Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial en la cuenca del río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica

Fuentes:
Atlas CR - 2008

Simbología

Nivel jerárquico rutas	GARABITO
Primaria	OROTINA
Secundaria	PALMARES
Terciaria	PUNTARENAS
C. río Machuca	SAN MATEO
ATENAS	SAN RAMON
ESPARZA	TURRUBARES

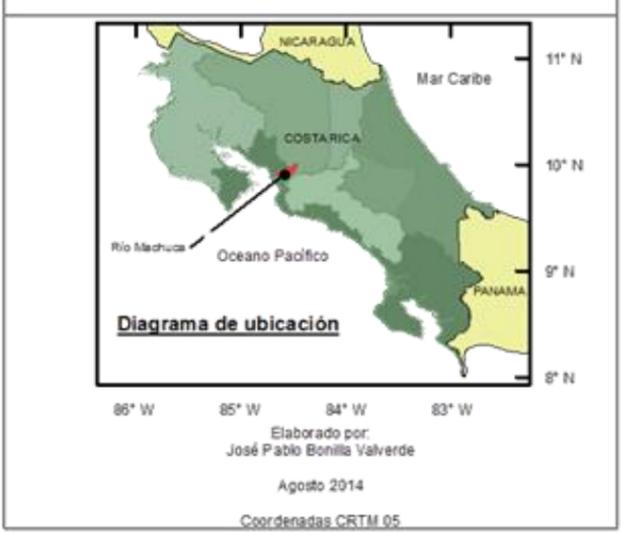


Figura 4. División política a nivel de distritos dentro y fuera de la cuenca del río Machuca.

Los nueve distritos de los cantones de San Mateo y de Orotina engloban un 91% de la cuenca del río Machuca dentro de sus territorios; el restante 9% pertenece al distrito de San Rafael del cantón de San Ramón – el cual se compone de un total de 13 distritos. Casi dos terceras partes de la cuenca está englobada en el cantón de San Mateo (61%), mientras el de Orotina tiene 30% de la cuenca. Los tres cantones en mención pertenecen a la provincia de Alajuela. Los cantones de Atenas y Palmares de la provincia de Alajuela y el cantón de Esparza de la provincia de Puntarenas también cubren parte de la cuenca, pero estos representan menos del 0,1% de la cuenca, unas 16,7 hectáreas en total.

Costa Rica cuenta con información censal desde épocas coloniales, en el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) se reconocen nueve censos anteriores al X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda del 2011 pero es a partir del censo de 1950 que se inicia a utilizar la cartografía censal (Paniagua, 2013). De los diez distritos que abarcan parte de la cuenca del río Machuca en sus territorios, dos no se encuentran en al menos uno de los censos del INEC. El distrito de Labrador fue creado en el 2012 y por lo tanto no aparecerá hasta un próximo censo; al segregarse del distrito de Jesús María, existe coherencia con la información censal utilizada. De los restantes nueve, el único distrito que no existía en el censo de 1950 y 1966 es el distrito de Jesús María, el cual se segregó del distrito de San Mateo en 1966.

El Cuadro 3 muestra los datos de los censos de los últimos seis censos de Costa Rica, cuatro realizados por la Dirección General de Estadística y Censos (DGEC) que en 1998 se convierte en el INEC: estos corresponden a los censos de los años de 1950 (DGEC, 1950), 1963 (DGEC, 1963), 1973 (DGEC, 1973), 1984 (DGEC, 1984), 2000 (INEC, 2000) y 2011 (INEC, 2011) para el distrito de San Rafael de San Ramón, los tres distritos de San Mateo, y los cinco distritos de Orotina. La Figura 5 presenta la distribución de la población porcentual para cada censo de los distritos en cuestión y la Figura 6 muestra la evolución

de la población en los distritos a través de los cinco censos. Para comparar gráficamente la evolución de población, se normalizan con respecto al valor del primer censo.

Cuadro 3. Información censal para los distritos en cuenca del río Machuca.

Cantón	Distrito	1950	1963	1973	1984	2000	2011
San Ramón	San Rafael	2308	2921	3467	4716	8384	9321
San Mateo	San Mateo	3058	2876	1553	1988	2529	2692
	Desmonte	553	512	455	651	871	1047
	Jesús María			961	1144	1943	2397
Orotina	Orotina	3018	3925	5038	6539	8045	9664
	El Mastate	441	680	917	1019	1624	1821
	Hacienda Vieja	742	774	766	728	890	1022
	Coyolar	1081	971	946	1161	3636	5912
	La Ceiba	669	743	812	1047	1510	1922
Total		11 870	13 402	14 915	18 993	29 432	35 798

Tanto en el Cuadro 3 como en la Figura 5 y la Figura 6 se evidencia que el distrito de Coyolar es el que mayor crecimiento ha presentado en los últimos censos, especialmente entre los censos de 1984 y de 2000 que creció el triple en 16 años. Este crecimiento relativo solo fue superado por San Rafael y Mataste en un período de cincuenta años mientras que Orotina necesitó más de sesenta años para lograrlo. A pesar que los distritos de Orotina y San Rafael han bajado el porcentaje que representan respecto a los demás distritos, no se evidencia una disminución en su tendencia al crecimiento.

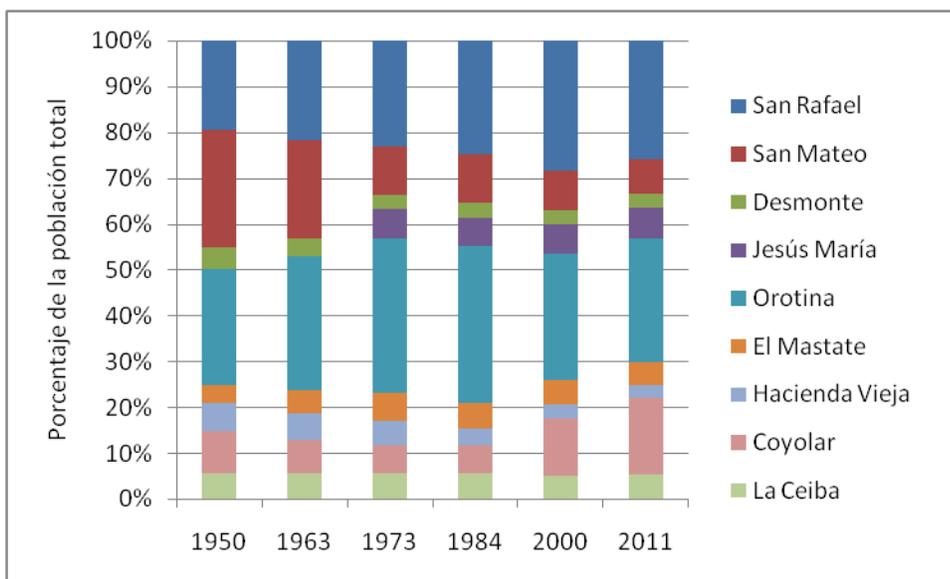


Figura 5. Distribución porcentual de la población total de los distritos que abarcan parte de la cuenca del río Machuca basado en los censos 1950, 1963, 1973 y 1984 de la DGEC y en los censos 2000 y 2011 del INEC.

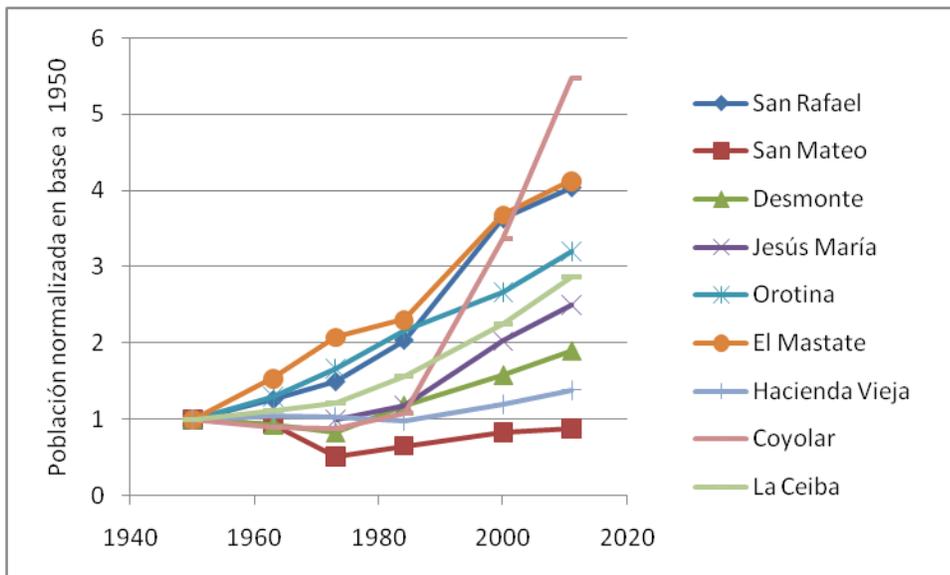


Figura 6. Crecimiento de la población en los distritos de la cuenca del río Machuca basado en los censos 1950, 1963, 1973 y 1984 de la DGEC y en los censos 2000 y 2011 del INEC.

Además de la población total por distrito, los censos provén más información acerca de la composición y estructura de la población, indicadores demográficos, económicos, de servicios básicos, entre otros. En el Cuadro 4 se presentan los principales indicadores de vivienda para los nueve distritos en el censo 2011 en entre los que se encuentran el total de viviendas, la cantidad de viviendas individuales desocupadas, de viviendas colectivas, así como el promedio de los ocupantes por vivienda, o factor de ocupación, el porcentaje de viviendas ocupadas y el porcentaje de la población urbana.

Cuadro 4. Características de las viviendas para los distritos en cuenca del Machuca basado en el censo del INEC 2011

Distrito	Total de viviendas	Viviendas individuales desocupadas	Viviendas colectivas	Promedio ocupantes vivienda	Porcentaje viviendas ocupadas	Porcentaje población urbana
San Rafael	2991	294	1	3,3	90,2%	45,2%
San Mateo	1166	330	0	3,2	71,7%	37,8%
Desmonte	318	32	0	3,7	89,9%	0,0%
Jesús María	978	265	1	3,4	72,9%	24,8%
Orotina	3374	443	5	3,3	86,9%	76,9%
El Mastate	654	127	0	3,5	80,6%	25,4%
Hacienda Vieja	419	110	0	3,3	73,7%	85,0%
Coyolar	2135	437	0	3,5	79,5%	29,6%
La Ceiba	786	221	1	3,4	71,9%	0,0%
Total	12821	2259	8		82,4%	45,6

En el Cuadro 4 se destaca que los dos distritos en la parte alta de la cuenca, San Rafael y Desmonte, presentan un porcentaje de ocupación similar, alrededor del 90%, mientras que los distritos más accesibles a la carretera y al ferrocarril en el pasado presentan un porcentaje de viviendas ocupadas entre el 80% y el 86% siendo estos Orotina, Mastate y Coyolar; los otros cuatro distritos presentan porcentajes de ocupación cercanos al 70%. Esta información se completa con la Figura 7 en la que se presenta los porcentajes de viviendas desocupadas, las cuales se componen en viviendas para alquilar o vender, en construcción o reparación, temporal para vacacionar, de trabajadores o

estudiantes y con otro tipo de desocupación para los nueve distritos que engloban la cuenca del río Machuca basado en los censos del INEC 2011.

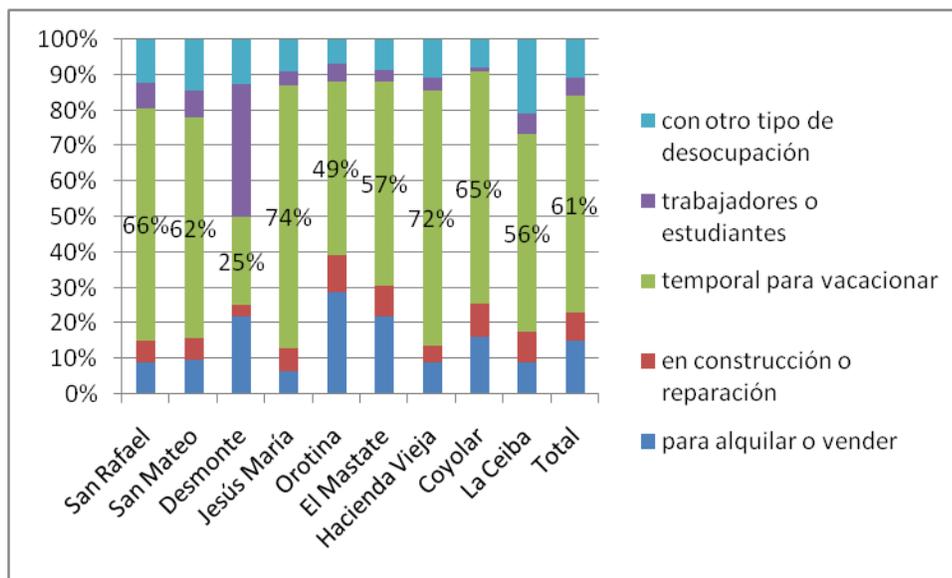


Figura 7. Detalle viviendas desocupadas en los distritos de la cuenca del Machuca basado en el censo del INEC 2011.

Respecto a la composición de las viviendas desocupadas se evidencia que en casi todos los distritos las viviendas desocupadas para vacacionar temporalmente superan el 50%, excepto en el distrito de Desmonte. Esto indica que la zona, en general, se destina para vacacionar. Cabe destacar que en los distritos de Orotina y Hacienda Vieja más de las tres cuartas partes de la población vive en zonas urbanas. Por el contrario, los distritos de Desmonte y La Ceiba no presentan áreas urbanas, son completamente rurales.

4.1. Estimaciones y proyecciones de población en Costa Rica

Desde el año 2002 el Centro Centroamericano de Población (CCP) de la UCR efectúa la evaluación demográfica de la cobertura del Censo de Población así como el desarrollo de las estimaciones y proyecciones de población en conjunto con el INEC (CCP

et al., 2013). A partir de la evaluación del censo 2011 se actualizaron las estimaciones de población para el período 1950-2011 y las proyecciones de población para el período 2011-2050 para el país. Las estimaciones y las proyecciones de población para Costa Rica se calcularon con el método de los componentes del cambio demográfico o método de los componentes de cohorte según Preston, Heuveline & Guillot en 2001 (CCP *et al.*, 2013).

Según el CCP *et al.* (2013), de manera generalizada, en Costa Rica actualmente se presenta un aumento en la esperanza de vida al nacer y en la esperanza de vida a la edad de 60 años; se estima que esta continuará en aumento de hasta 4 años por encima de la esperanza de vida actual en el 2050. Además, la tasa de fecundidad ha descendido de 7 hijos por mujer en la década de 1950 a 4 hijos por mujer en la década de 1960 hasta alcanzar una tasa de 1,9 hijos por mujer en el 2010, la cual es menor a la tasa de remplazo de 2,1 hijos por mujer (CCP *et al.*, 2013).

Estos dos fenómenos – que las personas vivan más tiempo en Costa Rica y que nazcan menos niños que sustituyan a la población – ocasionan que la tendencia sea a una estabilización de la población local, la cual se puede compensar con la migración de población extranjera. Según el CCP *et al.* (2013) en la proyección del 2011-2050 en el país el número de migrantes por año descenderá desde casi a la mitad al final del periodo de proyección. Pasará de 4300 hombres y 4400 mujeres por año en 2010 para todo el país a aproximadamente a 2300 hombres y 2200 mujeres por año cerca del 2050, presentándose la mayor migración en el rango de edades de 20 años.

Además de las estimaciones y proyecciones del 2011 el CCP realizó en el 2002 las proyecciones de población por distrito hasta el año 2015 basados en el censo 2000, y actualizó la proyección hasta el 2030 en el año 2008 (CCP, 2008). En Cuadro 5 se presentan las estimaciones y proyecciones para los nueve distritos descritos anteriormente. De manera general las estimaciones del CCP del año 2008 estiman tres

tendencias: una estabilización o disminución en la población de todos los distritos, un aumento de la población lineal y un crecimiento exponencial.

Cuadro 5. Estimaciones y proyecciones para los distritos en cuenca del río Machuca según el CCP (2008).

Distrito	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030
San Rafael	3221	4420	6141	8649	10 474	11 217	12 157
San Mateo	1457	1945	2373	2602	2477	2335	2341
Desmonte	433	610	820	899	840	788	805
Jesús María	941	1134	1437	2000	2484	2698	2863
Orotina	4652	6437	7665	8286	7567	7024	7131
El Mastate	918	1002	1232	1675	1969	2081	2229
Hacienda Vieja	814	753	784	917	907	866	906
Coyolar	989	1041	1730	3750	6829	8966	10 114
La Ceiba	769	1014	1293	1559	1551	1473	1540
Total	14 194	18 356	23 475	30 337	35 098	37 448	40 086

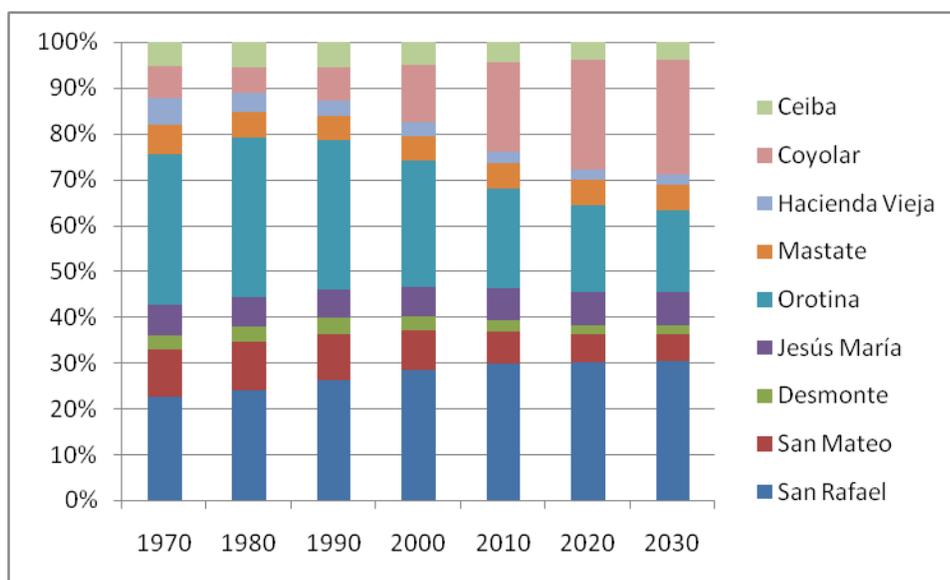


Figura 8. Distribución porcentual de las estimaciones y proyecciones de la población del CCP en los distritos de la cuenca del río Machuca según el CCP (2008).

En la Figura 8 y en la Figura 9 se evidencia gráficamente lo que se ha revelado en los censos, el distrito de Coyolar pasará a representar una mayor parte de la población total de todos los distritos en detrimento de la representación porcentual del distrito de

Orotina, todos los demás distritos representarán porcentualmente casi lo mismo que en la actualidad. El CCP proyectó en el 2000 que los distritos de San Mateo, Desmonte, Orotina, Hacienda Vieja y Ceiba tenderán a estabilizarse, mientras que los distritos de San Rafael, Jesús María y Mastate crecerán aproximadamente en un 50% en los próximos 30 años (CCP, 2008). El CCP proyecta que la población para el distrito de Coyolar aumentará casi dos veces su población actual.

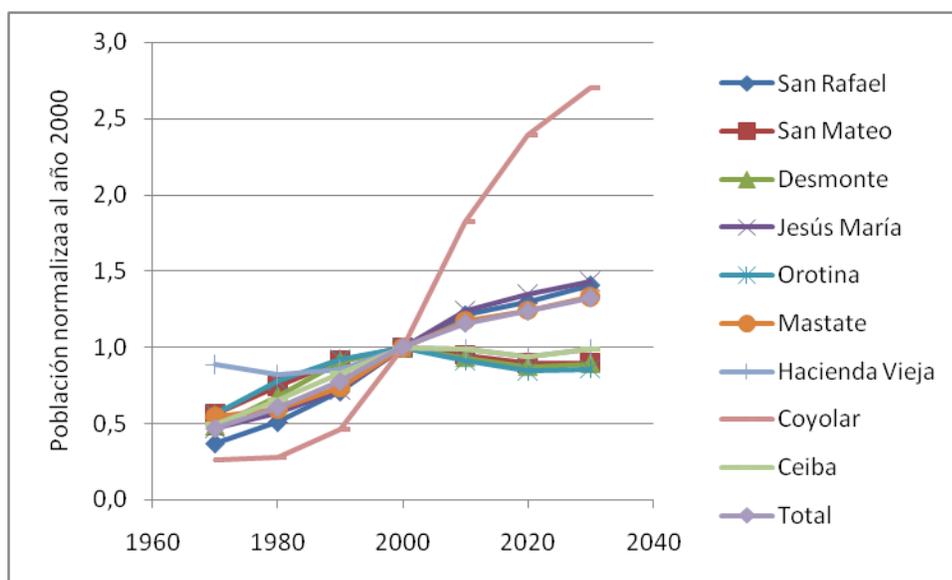


Figura 9. Estimaciones y proyecciones de la población en los distritos de la cuenca del río Machuca por el CCP (2008).

Capítulo III. MARCO TEÓRICO

Este capítulo contiene la base teórica con la cual se fundamenta la investigación; en él se desarrollan los conceptos del ciclo hidrológico, con enfoque en las características fisiográficas de las cuencas, en las variables meteorológicas, en la recarga, en la capacidad y el uso de los suelos, en la hidrogeoquímica y en el balance hídrico de la cuenca y de los suelos.

1. Aspectos fisiográficos de las cuencas

Los aspectos fisiográficos se refieren a las principales características de la geografía física de las cuencas definidas principalmente por la topografía y el área de la cuenca; y por el curso de agua que drena la misma. Según Monsalve (1999) el objetivo de definir las características físicas es conocer algunos índices que sirvan de comparación entre regiones hidrológicas. Además de los parámetros como el área y el perímetro, hay otros parámetros como la forma de la cuenca, el sistema de drenaje y las características del relieve de la cuenca (Monsalve, 1999).

Entre los factores de forma de la cuenca se tienen el índice propuesto por Gravelius conocido como el coeficiente de compacidad (K_c) y el factor o índice de forma (K_f). El índice de compacidad representa la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo con la misma área que la cuenca; este trata de expresar la influencia del perímetro y el área de una cuenca en la escorrentía, particularmente en las características del hidrograma (Villón, 2004). Un valor de K_c igual a la unidad representa una cuenca circular, por lo general se espera que para cuencas alargadas K_c sea mayor a la unidad.

El índice de forma (K_f) es la relación entre el ancho medio de la cuenca y la longitud axial de la cuenca – la cual se mide siguiendo el curso de agua más largo; el ancho medio se obtiene de dividir el área de la cuenca por la longitud axial de la cuenca (Monsalve, 1999). Según Monsalve (1999) una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño pero con mayor factor de forma.

Respecto a las características de relieve de la cuenca se cuenta con parámetros como la elevación y pendiente media de la cuenca, la curva hipsométrica, la pendiente de la corriente principal y el rectángulo equivalente por mencionar algunos. La curva hipsométrica es la curva que representa la relación entre la elevación y el área acumulada de la cuenca sobre o debajo de esa elevación (Villón, 2004). El rectángulo equivalente tiene como característica más importante que tiene la misma distribución de alturas que la curva hipsométrica (Monsalve, 1999); e igual área y perímetro – e índice de compacidad – que la cuenca (Villón, 2004). Según Monsalve (1999), este índice introducido por hidrólogos franceses es un intento de comparar la influencia de las características de la cuenca sobre la escorrentía.

2. Balance hídrico de cuenca

El balance hídrico es una herramienta utilizada para solucionar algunos importantes problemas en hidrología, a partir de este es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos del agua y sus modificaciones por la influencia de las actividades del hombre (IHE, 1981). El balance hídrico de cuenca se basa en la aplicación del principio de conservación de masa, o la ecuación de continuidad, el cual establece que para cualquier volumen arbitrario, la diferencia entre los valores de las variables de entrada y de salida, de un sistema particular, estará condicionada por la variación en el volumen del agua almacenada (IHE, 1981). Según Chow (1994), el objetivo del análisis del

sistema hidrológico es, con base en las variables de entrada, estudiar la operación del sistema y predecir las variables de salida.

Los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes categorías: modelos físicos y modelos abstractos (Chow, 1994). En este estudio, se trabaja con modelos abstractos que representan el sistema en forma matemática, describen la operación del sistema por medio de un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida, las cuales pueden estar en función del tiempo y del espacio. La ecuación básica para realizar un balance hídrico es la siguiente (UNESCO, 2008):

$$\frac{dV}{dt} = E - S$$

Esta ecuación es la expresión más sencilla del balance hídrico, donde el cambio en el almacenamiento en el tiempo (dV/dt) es igual a la diferencia entre las entradas (E) y las salidas (S). Muchos modelos parten de esta ecuación, variando en el desglose o detalle de las entradas o las salidas. Uno de estos modelos es la ecuación propuesta por el Instituto de Hidrología de España (IHE, 1981), la cual se aplica para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo en su forma más general.

$$P + Q_{SI} + Q_{UI} - E - Q_{SO} - Q_{UO} - \Delta S - v = 0$$

En la que P es la precipitación; Q_{SI} y Q_{UI} son los caudales superficiales y subterráneos recibidos dentro de la cuenca (o el sistema), respectivamente; E corresponde a la evaporación y Q_{SO} y Q_{UO} corresponden a las salidas de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada. Finalmente, ΔS es el agua almacenada y v es un término residual, debido a que todos los componentes están sujetos a errores de medida o estimación (IHE, 1981).

La metodología propuesta por la PHI-LAC en su Informe Técnico 14 (UNESCO, 2008) separa el balance de agua superficial del balance de agua subterránea de la cuenca, partiendo de la ley de la conservación de masa, en la que el cambio en el volumen en un tiempo determinado es la diferencia entre las entradas y las salidas. La ecuación propuesta en esta metodología para el balance de agua superficial incluye el uso del agua, así como la importación desde otras cuencas y el agua retornada (ibíd.). Esta metodología puede ser utilizada a cualquier escala de tiempo. En este estudio, se propone cerrar el ciclo hidrológico anual, a partir de una escala mensual, según la ecuación:

$$\Delta V = (Cp + Ar + Re + Im) - (Ab + U + Ev + Ex)$$

En la que la variación de volumen (ΔV) es igual a la diferencia entre los valores de salida y los de entrada. Los valores de entrada se componen por la suma del escurrimiento natural por cuenca propia (Cp), el escurrimiento aguas arriba (Ar), los retornos de agua (Re) y las importaciones desde las cuencas vecinas (Im). Los valores de salida son la sumatoria del escurrimiento a la salida de la cuenca aguas abajo (Ab), los usos del agua (U), la evaporación en cuerpos de agua (Ev) y las exportaciones hacia otras cuencas vecinas (Ex) (UNESCO, 2008).

El volumen por escurrimiento natural de la cuenca propia es el parámetro que caracteriza el potencial de los recursos hídricos superficiales de una cuenca hidrológica (UNESCO, 2008). Este parámetro puede estimarse de dos maneras según el PHI-LAC, la primera es despejando el valor de la ecuación anterior en el caso de contar con toda la información hidrométrica. En el caso de no contar con toda la información hidrométrica se puede utilizar el siguiente modelo, en el que el escurrimiento por cuenca propia (Cp) es igual al volumen de lluvia (Vll) menos la interceptación ($Inter$) la cual está en función de la cobertura vegetal, la evapotranspiración (ET) y la Infiltración (In). Este modelo se presenta en la siguiente ecuación (UNESCO, 2008):

$$Cp = Vll - Inter - ET - In$$

Para el balance subterráneo de la cuenca también se tiene como fundamento la ecuación de continuidad en la que se establece que la diferencia entre los valores de salida y los de entrada de masa en un tiempo determinado son iguales al cambio de almacenamiento del volumen de control (UNESCO, 2008). El modelo del balance de agua subterráneo de la cuenca se expresa en la siguiente ecuación:

$$I + Ri + Es - ETz - Sm - B = \Delta V$$

En este caso, los valores de entrada son la infiltración o recarga de agua de lluvia (I), la recarga inducida (Ri) y las entradas de agua al sistema por el flujo lateral subterráneo (Es) proveniente de las fronteras de la zona de balance y por otros acuíferos. Las salidas del sistema son la evapotranspiración de la zona saturada (ETz), la salida de agua por manantiales (Sm) y la extracción de agua subterránea por bombeo (B). La diferencia entre las entradas y las salidas es el cambio en el volumen (ΔV) almacenado en el área y en el tiempo estipulado de balance (UNESCO, 2008). La recarga inducida está compuesta por los retornos de riego y por las fugas en los sistemas de abastecimiento de agua de las zonas urbanas, entre otras.

Existen muchos modelos para estimar el balance hídrico para distintas escalas de tiempo, variando desde modelos horarios hasta anuales y también en función de los parámetros que se requieren para utilizarlos; los detalles de los supuestos y las limitaciones, así como un breve resumen de cada uno de ellos, es presentado por Xu y Singh (1998). Muchos de estos modelos son variaciones de uno de los primeros modelos conocidos, como el de Thornthwaite de 1948 y su variante Thornthwaite y Mather de 1955 (Xu *et al.*, 1998). La Figura 10 muestra el diagrama de flujo simplificado para el método Thornthwaite-Mather modificado.

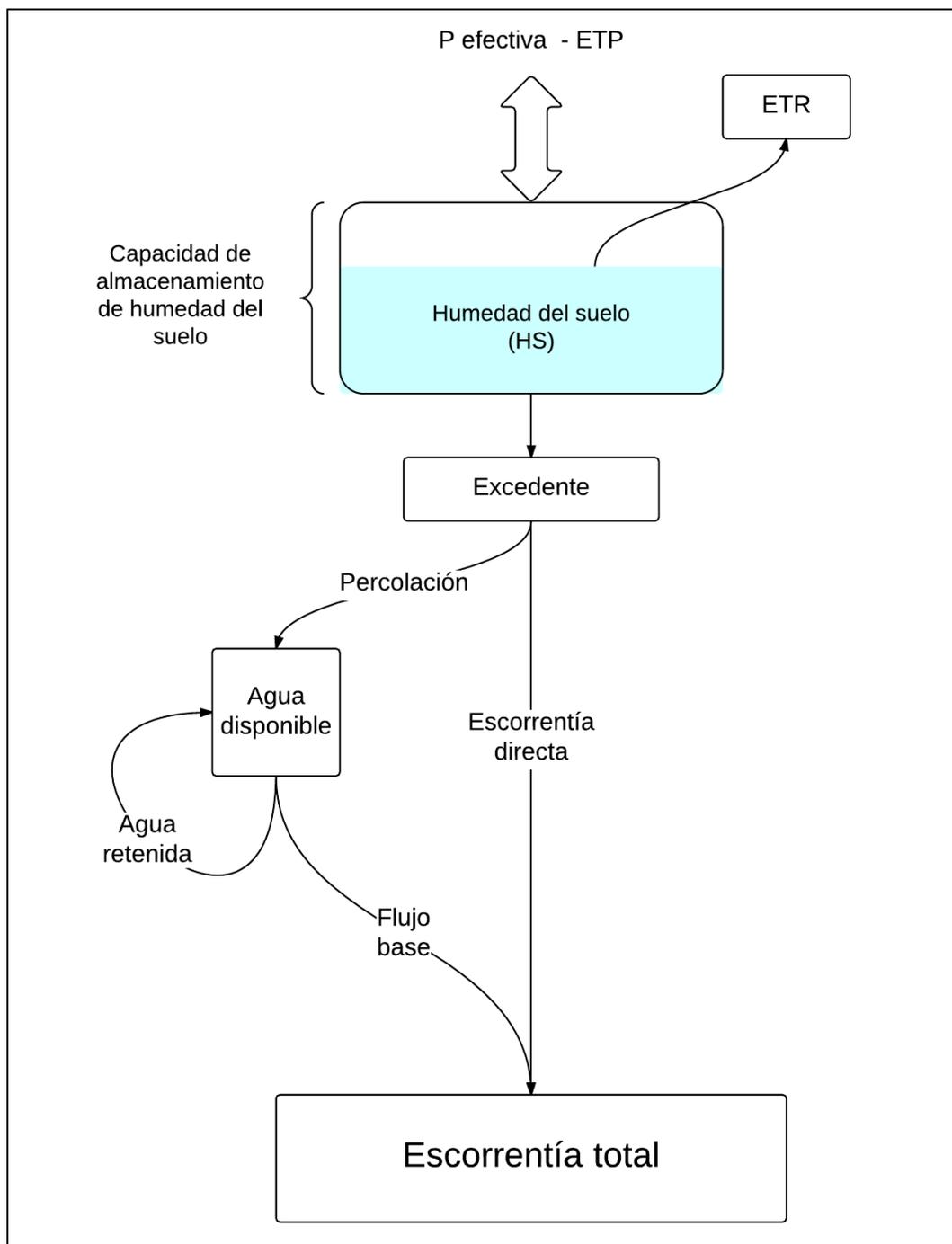


Figura 10. Diagrama de flujo simplificado para el método Thornthwaite-Mather modificado.

Para una descripción del procedimiento, se recomienda consultar Dunne *et al.* (1978) que consideran que lo mejor es desarrollarlo con un ejemplo. Básicamente el

método busca primero satisfacer las necesidad de humedad del suelo, la cual está en función del tipo de suelo, la lluvia y la evapotranspiración; si quedase un excedente después de este paso, el agua percola o escurre; el agua que percola es la que está disponible para escurrir el siguiente mes o para continuar almacenada o retenida.

3. Balance hídrico de suelos

El balance hídrico de suelos se basa en el principio de la conservación de la masa, donde el agua que entra en el suelo es igual al agua que se almacena en el suelo más el agua que sale de él. La entrada al sistema es la infiltración hacia el suelo y las salidas son la evapotranspiración de las plantas más la descarga de los acuíferos (Schosinsky, 2006). A diferencia del balance hídrico de la cuenca, en el que se determina el volumen de agua superficial, el balance hídrico de suelos permite determinar el potencial de las aguas subterráneas de un acuífero mediante la recarga, el cual representa la máxima cantidad de agua a substraer del acuífero a fin de no ser sobreexplotado (Schosinsky, 2006).

En general, es a partir de la infiltración de la precipitación que se determina la recarga del acuífero. Según Schosinsky (2006) para evaluar la infiltración que penetra al suelo de una zona, se debe determinar la precipitación sobre la zona, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal del suelo y su pendiente.

Para determinar la infiltración se utiliza en este estudio la metodología propuesta por Schosinsky y Losilla (2000) la cual simplifica el cálculo de la precipitación que infiltra a partir de la infiltración básica de los suelos y la precipitación. Esta metodología trabaja en una escala mensual. Con la infiltración, se puede realizar un balance de agua en los suelos para estimar el agua que queda libre para recargar el acuífero que se encuentra debajo del suelo analizado (Schosinsky, 2006).

4. Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas son los principales componentes del balance hídrico, tanto para el análisis por balance hídrico de cuenca como para el balance hídrico de suelos. La principal variable es la precipitación. La evapotranspiración, se determina a partir de otras variables, tales como la temperatura, la radiación solar y las horas de brillo solar, entre otras.

4.1. Precipitación

La precipitación se define como toda el agua que cae de la atmosfera a la superficie de la tierra (Linsley, 1975). Según Chow (1994), la precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos como el granizo y la nevisca [*sic*]. La precipitación se mide y se registra en términos de la altura de la columna de una lámina de agua, (Villón, 2004). Las unidades para expresar la precipitación se obtienen de una relación entre el grosor de la lámina de agua, usualmente en milímetros por metro cuadrado (abreviado como “milímetros” y que equivalen a un litro de agua por cada metro cuadrado, es decir, un litro de agua que se distribuye sobre una superficie plana de un metro cuadrado para dar una altura de un milímetro), entre unidades de tiempo, las cuales dependen de la frecuencia de la medición y el fenómeno a estudiar, desde milímetros por minuto u hora para una tormenta hasta milímetros por día, mes o año en estudios regionales.

Para calcular la precipitación media sobre un área se pueden seguir varios métodos, entre los que se encuentran el promedio aritmético, los polígonos de Thiessen y las isoyetas. Estos métodos buscan distribuir la información puntual de las estaciones meteorológicas en un área. El método del promedio aritmético consiste en obtener el promedio aritmético de las estaciones meteorológicas dentro de la zona (Villón, 2004). Según Villón (2004), la precisión del método depende de la cantidad de estaciones

disponibles y sólo da buenos resultados cuando se tiene un gran número de estaciones; Chow (1994) agrega que el método es satisfactorio si las estaciones se distribuyen uniformemente sobre el área y sus mediciones individuales no varían de manera considerable de la media entre las estaciones.

El método de Thiessen establece que la precipitación en cualquier punto es igual a la que se registra en la estación más cercana (Chow, 1994). Para este método es necesario crear un mapa con los polígonos de Thiessen los cuales se definen por las bisectrices de las líneas que unen las estaciones meteorológicas. Según Chow (1994) el método de Thiessen no toma en cuenta en forma directa las influencias de la orografía en la lluvia.

La precipitación presenta tanto variaciones en el espacio como en el tiempo, la cuales pueden representarse por un mapa de isoyetas, el cual representa contornos o curvas de lluvia constante (Chow, 1994). Estas se construyen interpolando la precipitación que se registra en las estaciones meteorológicas. El método de las isoyetas interpola los valores entre las estaciones, creando líneas o curvas de igual precipitación. Según Villón (2004) este es el método que proporciona la mejor descripción del sistema natural pero es muy dependiente del criterio del analista para trazar el plano de isoyetas. Por otra parte, si la precipitación es del tipo orográfico las isoyetas tendrán que seguir una configuración parecida a la de las curvas de nivel topográfico (Villón, 2004).

4.2. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un concepto que involucra dos procesos; la evaporación y la transpiración. La evaporación directa se puede originar desde la superficie del suelo, del agua y de la vegetación; mientras que la transpiración es la evaporación del agua a través de los tejidos de todos los seres vivos (Chow, 1994). Según Chow (1994) los

factores que influyen en la evaporación son el suministro de energía y la capacidad para transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación.

Entre los factores meteorológicos que afectan la evaporación están: la radiación solar, la temperatura del aire, la presión de vapor, el viento y la presión atmosférica; la radiación solar es el factor más importante de la evaporación, y esta varía con la latitud, la época del año, la hora del día y la condición de nubosidad (Villón, 2004). La evapotranspiración está constituida por las pérdidas totales de la evaporación y la transpiración, pero también está en función de la humedad disponible para que el fenómeno ocurra. Debido a esto, para describir el sistema hay que tomar en cuenta dos conceptos: Evapotranspiración Potencial (ETP) y Evapotranspiración Real (ETR).

La ETP es la evapotranspiración que puede ocurrir desde una superficie bien cubierta por vegetación cuando el suministro de humedad es ilimitado; la ETR es la que se da a medida que se pierde humedad (Chow, 1994). Según Villón (1994) el término ETP es introducido por Thornthwaite el cual es definido como la pérdida total del agua que ocurriría si en ningún momento existiera deficiencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación. Para estimar la ETP existen muchas metodologías, varias de estas parten de unos modelos teórico-empíricos para explicar el fenómeno de la manera más cercana a la realidad (Monsalve, 1999). Entre las metodologías se encuentran las propuestas por Penman, Thornthwaite, Blaney y Criddle y Turc, todos descritos en Monsalve (1999).

5. Escorrentía

Una parte de la precipitación que alcanza el suelo es retenida y el excedente que no es retenida puede infiltrarse en suelo o escurrir superficialmente, el agua infiltrada puede eventualmente aflorar en la superficie y alimentar la escorrentía superficial (Monsalve, 1999). Aparicio (1989) define la escorrentía, o el escurrimiento, como el agua

proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

Para Villón (2004) la escorrentía se clasifica en escorrentía directa, cuando su efecto es inmediato, y en escorrentía base, si su efecto es retardado. La escorrentía base, o flujo base, es el que alimenta las corrientes cuando no hay precipitación (Aparicio, 1989). La escorrentía puede verse afectada por algunos factores climáticos, por la geografía física de la cuenca y por las actividades antrópicas (Monsalve, 1999).

La determinación de la cantidad de agua que escurre por un curso se conoce como aforo. Los aforos o la hidrometría es la rama de la hidrología que estudia la medición del escurrimiento (Villón, 2004). Según Villón (2004) los métodos más utilizados para determinar el caudal son aforos con flotadores, volumétricos, químicos, con vertederos, con correntómetros o molinete y con medidas topográficas (de sección y de la pendiente).

6. Recarga acuífera

La recarga del agua subterránea es un componente más del ciclo hidrológico; y depende principalmente de las características geológicas y climáticas de la zona de estudio. Custodio & Llamas (1976) definen la recarga natural como el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un período de tiempo; debido a la infiltración de la precipitación o de un curso de agua. La recarga acuífera se define como el agua que alcanza el acuífero desde cualquier dirección (por arriba, abajo o lateralmente) (Lerner, 1997, por Scanlon, 2002). Para Schosinsky (2006) la recarga del acuífero se da cuando la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas.

7. Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica es una herramienta de la hidrogeología que utiliza la física, la química, la geología y la hidrología como base. La geoquímica del agua subterránea es la ciencia que estudia los procesos que controlan la composición química del agua subterránea (Appelo, 2010). Según Poehls (2009) la hidrogeoquímica es la química del agua subterránea y superficial y su relación con la geología regional y el análisis de la composición del agua provee pistas del flujo y de la historia geológica.

Según Appelo & Postma (2010) un análisis químico estándar de agua subterránea debe tener al menos los valores de la temperatura, de la conductividad eléctrica, del potencial de hidrógeno (pH) y de los iones mayores. Los cationes mayores son sodio (Na^+), potasio (K^+), magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+}) y los aniones mayores son cloruro (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}), hay aguas con otros aniones mayores, el caso más común es el del nitrato (NO_3^-).

Debido a la dificultad de presentar los resultados numéricos, especialmente cuando se cuenta con muchos muestreos y datos, se recurre a la representación gráfica de los resultados. Para representar la caracterización química del agua se usan los diagramas de barras, los de círculos, los de Stiff y los de Piper por mencionar algunos muy usados y que tienen en común el uso de las concentraciones en miliequivalentes por litro y que facilitan la estimación de la electroneutralidad, debido a que la suma de las cargas positivas debe ser igual a las cargas negativas (Appelo & Postma, 2010).

Este último principio, el del balance eléctrico o equilibrio en las cargas, permite estimar la precisión del análisis, expresándolo como la razón porcentual entre la diferencia de los cationes y los aniones dividida entre la suma de ellos. Según Appelo (2010) un 2% es inevitable en casi todos los laboratorios, pero las desviaciones superiores al 5% deberían considerarse como avisos para revisar los procedimientos de muestreo y de

análisis; además, advierte el mismo autor, que en el caso de aguas ácidas o aguas reducidas pueden intervenir otros cationes como el hierro (Fe^{3+} o Fe^{2+}), el amonio (NH_4^+), el hidrógeno (H^+) o el aluminio (Al^{3+}) que pueden contribuir significativamente a la carga. La siguiente ecuación presenta el balance eléctrico, y el signo viene dado en el numerador por el mayor valor absoluto entre los cationes o los aniones:

$$\text{Balance eléctrico} = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} \times 100$$

8. Proyecciones de población

Los escenarios de crecimiento y de distribución de la población permiten estimar la población futura de un área determinada. Para poder estimar la población futura es necesario estudiar las características sociales, culturales y económicas de las poblaciones en el pasado y presente para realizar predicciones sobre su futuro desarrollo, especialmente en lo concerniente al desarrollo del turismo, de la industria y del comercio (López, 2000). Además de los escenarios de desarrollo de la población, es importante plasmar los escenarios de población planteados en el espacio físico disponible, con el objetivo de determinar si son posibles otras actividades humanas que compiten por el mismo espacio físico.

Para estimar la población futura se pueden aplicar métodos de comparación gráfica, métodos numéricos y el método de los componentes del cambio demográfico o método de los componentes de cohorte entre otros. Los métodos numéricos estiman el crecimiento en caso de seguir la tendencia de la población del pasado; entre los métodos numéricos se encuentran el método aritmético, el logarítmico, el geométrico y el de Wappus (López, 2000), solo por mencionar algunos.

El método de los componentes del cambio demográfico, o método de los componentes de cohorte, es utilizado por el Centro Centroamericano de Población (CCP) de la Universidad de Costa Rica (UCR) en conjunto con el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), para realizar las estimaciones y las proyecciones de población para Costa Rica. En este método, el cambio demográfico está dado por la variación en sus componentes, los cuales son fecundidad, mortalidad y migración (CCP et al., 2013). Es importante rescatar varios puntos de las proyecciones que señala el CCP (2008), específicamente, para las proyecciones del 2002 pero que son válidas para todas las proyecciones, las del 2013 (CCP et al., 2013) y las que se realizan en este trabajo:

- Las estimaciones de la población por distrito tienen límites de confianza que deben tomarse en cuenta para hacer interpretaciones. Esto es particularmente crucial a medida que las proyecciones se alejan del último censo pues sus resultados tienen mayor incertidumbre.
- Las estimaciones de la población comparadas con los censos de 1973, 1984 y 2000, no reproducen las cifras de los censos respectivos por dos razones: están referidas al 30 de junio, en tanto que los censos corresponden a otras fechas y están corregidas por las omisiones censales.
- En las proyecciones está implícito el supuesto de que las tendencias en el periodo 2000-2030 se encuentran determinadas por dos fuerzas: las tendencias observadas en el distrito antes del 2000 y la convergencia de los distritos hacia los promedios proyectados para todo el país al 2030.

Capítulo IV. METODOLOGÍA

En este trabajo se busca caracterizar hidrológicamente la cuenca del río Machuca con el objetivo de determinar la recarga potencial de esta cuenca; para alcanzar este objetivo es necesario desarrollar el balance hídrico de las subcuencas de los ríos Machuca, Surubres, Jesús María y Paires, las cuales componen la cuenca hidrográfica Jesús María en el Pacífico Central de Costa Rica.

Se realizan dos tipos de modelos hidrológicos temporales y se refuerzan con una caracterización hidrogeoquímica de las aguas superficiales para describir el comportamiento de la recarga y finalmente se determina la demanda del recurso hídrico en la cuenca para consumo humano de agua potable a partir de las estimaciones de la población en el área del proyecto.

1. Aspectos fisiográficos

Los aspectos fisiográficos buscan caracterizar las cuencas a partir de su morfología, como la forma, relieve, red de drenaje y otras (Monsalve, 1999). Entre los aspectos más importantes se tienen el área, el perímetro, elevación y pendiente media de la cuenca; la forma de la cuenca, representado a partir del índice de compacidad (K_c) y del índice de forma (K_f); el sistema de drenaje caracterizado principalmente por la densidad de drenaje.

El índice de compacidad (K_c) es definido como la relación del perímetro de la cuenca (p) y el perímetro de un círculo con la misma área superficial que la de la cuenca en estudio (Villón, 2004). El índice de compacidad se determina al multiplicar el producto de dividir el perímetro de la cuenca (p) entre la raíz cuadrada del área de la cuenca (A) y multiplicar el resultado por un factor de 0,28:

$$K_c = 0,28 \frac{p}{\sqrt{A}}$$

El índice de forma (K_f) es la relación entre el ancho medio (B) y la longitud axial de la cuenca (L_a); siendo este último el curso de agua más largo de la cuenca (Monsalve, 1999). El índice de forma se estima por dividir el área de la cuenca (A) entre el cuadrado de la longitud axial de la cuenca (L_a); como se muestra en la siguiente expresión:

$$K_f = \frac{A}{L_a^2}$$

La densidad del drenaje es la relación entre la longitud total de los cursos de agua (L_t) y el área de la cuenca (A). La elevación promedio de la cuenca se determina a partir del modelo de elevación digital (MED) generado a partir de la cartografía de la Programa de Regularización de Catastro y Registro de Costa Rica (PRCR, 2010).

2. Balance hídrico

Para cuantificar el recurso hídrico superficial en la cuenca hidrográfica Jesús María se usan dos tipos de modelos hidrológicos, el primero es un modelo del tipo anual y el segundo es uno a escala mensual. Con el modelo anual se busca determinar el mejor escenario de precipitación y evapotranspiración para caracterizar la escorrentía; el escenario de precipitación que mejor represente la escorrentía será utilizado en el modelo a escala mensual. El modelo de precipitación anual es el utilizado en el documento *Balance hídrico superficial de Costa Rica, Período 1970-2002* (UNESCO., 2007) del PHI-LAC. Para el modelo mensual se utiliza el método Thornthwaite-Mather modificado (Dunne et al., 1970) con el cual buscar determinar el comportamiento de la cuenca ante los fenómenos atmosféricos.

Los balances hídricos anuales de la cuenca se calibran con los aforos mensuales en la cada una de las subcuencas de los ríos Machuca, Surubres, Jesús María y Paires que el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) registra desde la década de 1970. Los balances hídricos mensuales también se calibran con el registro histórico de aforos del AyA y se validan para la campaña de aforos realizada durante los días 9 y 10 de abril del 2013 en el marco de esta investigación.

2.1. Precipitación

Para estimar la precipitación sobre la cuenca o sobre un área específica se utilizan tres métodos: los polígonos de Thiessen; el método de las isoyetas; y una modificación del primero, el cual consiste en mezclar los Polígonos de Thiessen con las zonas de vida. Este último busca corregir la deficiencia señalada en el Capítulo II (Marco Teórico) por Chow (1994) según la cual el método de Thiessen no toma en cuenta en forma directa las influencias orográficas en la distribución de la lluvia. Debido a que las zonas de vida representan áreas, pisos o unidades ecológicas, que comparten rangos de biotemperatura, precipitación anual total y evapotranspiración potencial, si una estación representa mejor una zona de vida que el polígono que le corresponde, se corta el polígono y el área se le asigna a la estación que mejor representa el territorio.

2.2. Evapotranspiración

Para estimar la evapotranspiración real (ETR) primero se determina la evapotranspiración potencial (ETP) a partir de los métodos generados con fórmulas teórico-empíricas. Se ha escogido realizar los cálculos por el método de Thornthwaite, por depender únicamente de la temperatura. El método Thornthwaite está ampliamente descrito en varios textos como los de Chow (1994) y Villón (2004). Esta decisión se justifica al no contar con estaciones meteorológicas con la información que necesitan

otros métodos (Penman, Thornthwaite, Blaney y Criddle y Turc) tal como la radiación solar, el brillo solar u otras.

2.3. Escorrentía

Con el modelo hidrológico se busca representar matemáticamente el sistema hidrológico, resolviendo la ecuación de continuidad con la información que se introduzca, por lo tanto, la precisión de los datos de entrada determinaran la precisión de los resultados del modelo (Haestad, 2003). La precisión del modelo también depende de que tan bien calibrado esté, para que sea representativo de la realidad de los fenómenos. Según Haestad (2003) el proceso de calibración consiste en la comparación de los resultados del modelo con las observaciones de campo del fenómeno en estudio, ajustando los datos de entrada hasta que el modelo represente de una manera aceptable la realidad.

Para calibrar el modelo hidrológico se recurre a la escorrentía. En esta investigación se cuenta con datos históricos mensuales de escorrentía en varios puntos de la cuenca de los ríos Machuca, Surubres, Jesús María y Paires. Los puntos de aforo históricos se reforzaron con aforos al final de la época de estiaje, donde se espera encontrar los caudales mínimos en los ríos el cual corresponde al flujo base. Se propone calibrar la precipitación y la evapotranspiración anual, de esa manera se busca que los escenarios de precipitación reproduzcan con fidelidad la escorrentía medida anual.

Para simplificar la interpretación y la presentación de los datos de las cuencas se utiliza la letra M para el río Machuca, S para el río Surubres, J para el río Jesús María y P para el río Paires para identificar los puntos de aforos y las cuencas que estos forman, y el número que acompaña la letra representa el orden de las cuencas, el cual aumenta conforme desciende el flujo del agua hacia el mar. En el Cuadro 6 se detalla si los puntos

de aforo cuentan con: datos históricos o datos medidos durante la campaña del 2013. En la Figura 11 se presenta el diagrama de flujo de las cuencas formadas a partir tanto de los puntos de aforo históricos, como los de la campaña del 2013. La distribución geográfica de las cuencas y el nivel del terreno se presentan en la Figura 12.

Cuadro 6. Puntos de aforo históricos del AyA y puntos de la campaña del 2013.

Aforos	P10	P20	J10	J20	J30	J40	M10	M20	M30	S10	S20	M40
Históricos (H)	--	H	H	--	H	--	H	H	--	H	--	
Campaña (C)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C

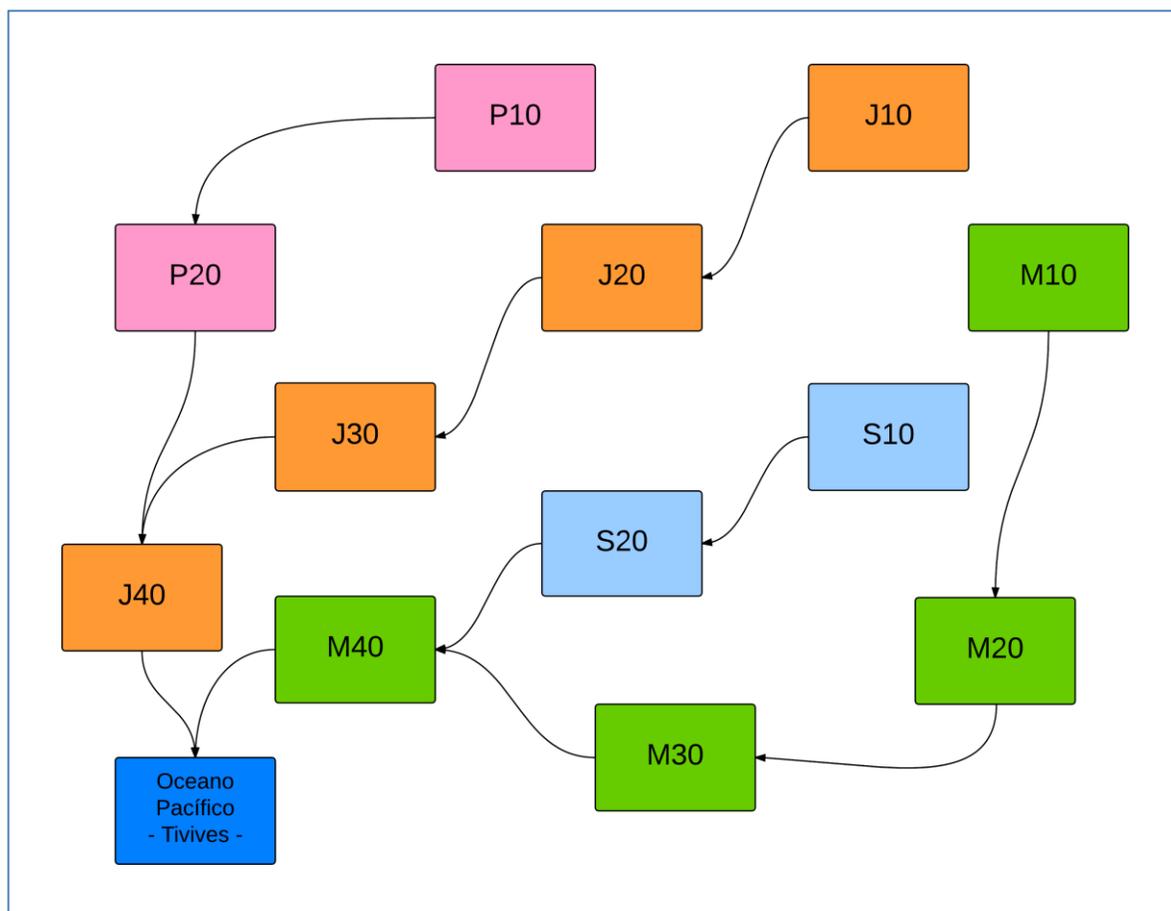


Figura 11. Diagrama de flujo para las cuencas formadas a partir de los puntos de aforo históricos del AyA y de la campaña 2013 en la cuenca de los ríos Paires, Jesús María, Surubres y Machuca.

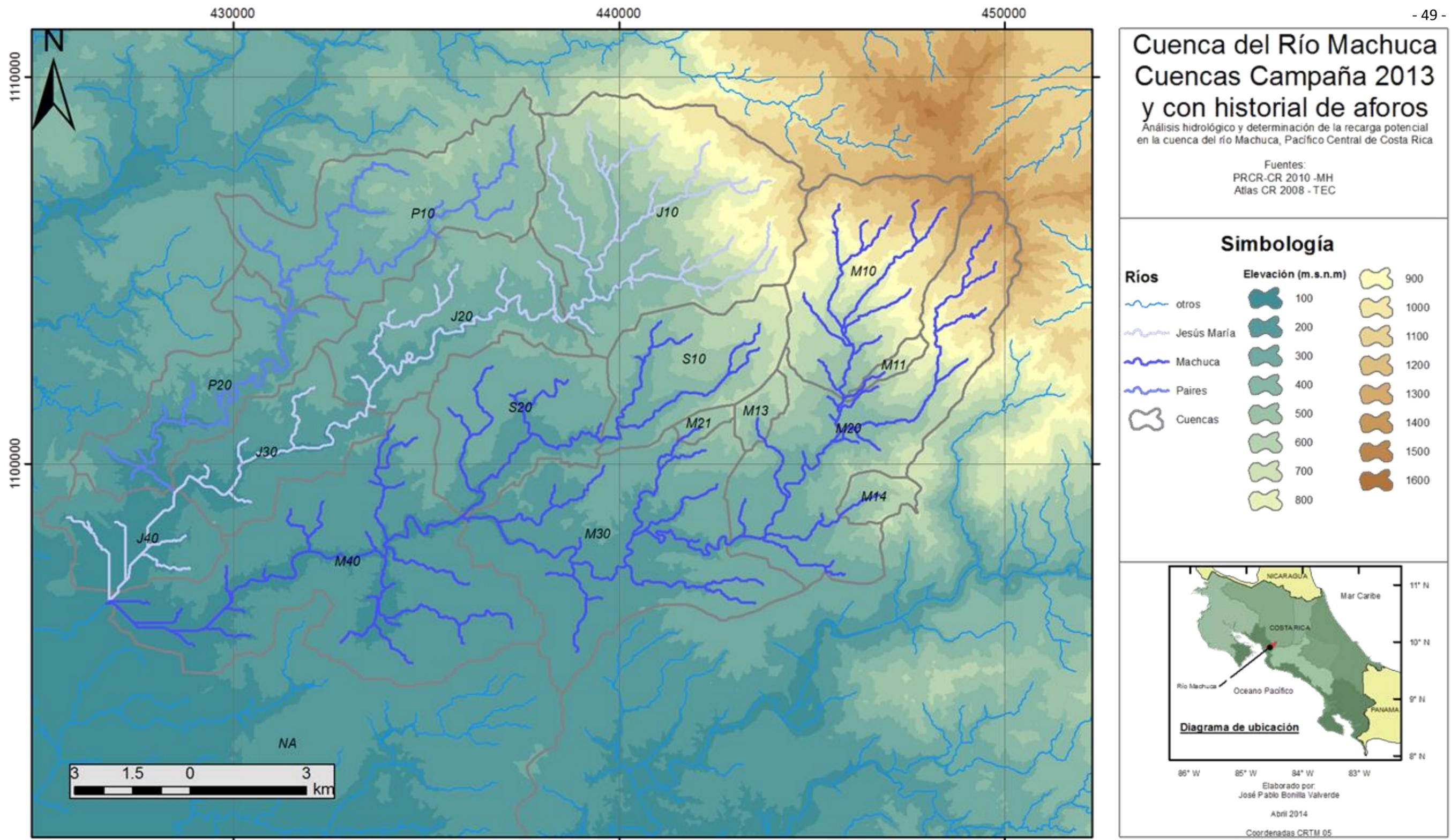


Figura 12. Cuencas formadas a partir de los puntos de aforo históricos del AyA y de la campaña 2013 en la cuenca de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.

Una primera limitante del registro histórico de aforos con que se cuenta es el objetivo con que han sido levantados: identificar los caudales mínimos para ser captados para el abastecimiento de agua potable. Por lo tanto, en algunos casos no se cuenta con los caudales de la época cuando se presentan los máximos caudales, pues no se requieren para definir si existe suficiente recurso hídrico.

Otra limitante de los aforos históricos es su resolución, la cual corresponde a medidas puntuales o instantáneas de una hora en un día del mes que busca caracterizar todo el mes. Este caudal es representativo mientras no se presenten precipitaciones, lo cual no es cierto más de nueve meses al año. En la campaña de aforo del 2013 se aforaron 10 puntos en la cuenca hidrográfica del río Jesús María durante los días 9 y 10 de abril de 2013 con cuatro grupos de trabajo. Se contó con el apoyo de la Unidad Estudios Básicos de la UEN Gestión Ambiental del AyA; durante esta campaña se midió el caudal en el mismo punto de aforo cada hora durante seis horas consecutivas con el objetivo de establecer la variación en cortos períodos, a diferencia de los registros históricos que solo toman un valor.

La campaña se realizó en dos días que fueron los únicos en los que se contó con el personal suficiente para medir los puntos simultáneamente. Por ejemplo, se midió el caudal en los dos puntos más bajos de los ríos Jesús María y Machuca de forma sincrónica, ambos días, para disminuir la variabilidad temporal de manera que los datos fueran comparables entre sí.

3. Hidrogeoquímica

Para caracterizar física y químicamente las aguas superficiales del río Machuca debido a la interrelación con el sistema acuífero presente en las cuencas del río Machuca se recurre a la hidrogeoquímica; específicamente a la caracterización realizada en la

Campaña 2013 y la base de datos del Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) del AyA de la Región Pacífico Central.

Durante la campaña de aforos del 2013 se tomaron muestras de agua en diferentes puntos de las cuencas de los ríos Jesús María, Machucha y Surubres, con el objetivo de realizar una caracterización química del agua de la cuenca y determinar la interrelación de los ríos con el acuífero. El análisis de las muestras se realizó en la sede Pacífico Central del Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) del AyA donde se midió la conductividad eléctrica y se determinó de la concentración de algunos iones.

Las muestras se tomaron en botellas de polietileno y se conservaron en frío para su transporte al laboratorio donde se almacenaron a 4°C hasta el momento del análisis. La conductividad eléctrica de la muestra se midió con un conductivímetro OAKTON® CON110 con una sonda de conductividad que fue calibrada previamente con una disolución estándar de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C. Las medidas de conductividad se hicieron a temperatura ambiente, que fue muy cercana a los 25°C.

La determinación de la concentración de los iones calcio y magnesio se determinó por medio de una volumetría, una valoración complejométrica, usando ácido etiléndiaminotetraacético (AEDT) y como indicadores se usaron la murexida para el calcio $\text{pH} = 12$ con NaOH 4M y el eriocromo negro T para el acumulado de calcio y magnesio con $\text{pH} = 10$ con un amortiguador de $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{OH}$. La determinación de la concentración del ión cloruro se determina por medio de una valoración argentométrica, con nitrato de plata y dicromato de potasio al 1% como indicador del punto final.

La determinación de la concentración de los iones bicarbonato y carbonato se realiza con una valoración volumétrica ácido – base usando una disolución de ácido clorhídrico valorada previamente con una disolución de hidróxido de sodio, que a su vez fue valorado con ftalato ácido de potasio como reactivo primario. Se utiliza fenolftaleína

para indicar el punto final de la valoración del hidróxido y del carbonato y anaranjado de metilo como indicador del punto final del bicarbonato. La determinación de la concentración del ion sulfato no fue indicada cómo por el LNA y la determinación de la concentración de los iones sodio, potasio y nitrato no fue realizada por el LNA al no estar disponible la prueba al momento del muestreo.

Entre los cationes determinados no se incluyeron metales alcalinos: el ión sodio (Na^+) y el ión potasio (K^+), pero se estima su valor acumulado total ($\text{Na}+\text{K}$) a partir del balance de electroneutralidad. Para ello se supone que la suma de las cargas de los cationes sodio Na^+ , potasio K^+ , calcio Ca^{2+} y magnesio Mg^{2+} igualan a la suma de las cargas de los aniones bicarbonato HCO_3^- , sulfato SO_4^{2-} , cloruro Cl^- y nitrato NO_3^- . Como se presume que no hay otros iones presentes, excepto los mencionados, a partir de la fórmula del balance eléctrico se obtiene una ecuación lineal con una única incógnita que se puede despejar para obtener los miliequivalentes por litro acumulados de sodio y de potasio.

Normalmente, el balance de electroneutralidad se utiliza para estimar la calidad de un análisis químico de aguas y en primera instancia se calcula el acumulado de sodio y potasio ($\text{Na}+\text{K}$) suponiendo que el balance tiene un error del 0%. Se puede calcular fácilmente cuánto es el ámbito en el que puede variar el acumulado de sodio y potasio como para que el balance de error sea del 2% – que es bastante realista según las pautas indicadas por Appelo (2010) – o para que la prueba sea descartada si el balance de error fuese superior al 5%.

Finalmente, se recurre a la representación gráfica de los resultados para simplificar su interpretación; se utilizan los diagramas de Piper y Stiff. La metodología para la elaboración de los diagramas de Piper y Stiff se encuentra desarrollada por Appelo (2010).

4. Proyecciones de población

La población de un área determinada es un ente dinámico, el cual crece con las tasas de nacimientos y las de inmigraciones y decrece con las tasas de defunción y las de emigraciones, así como por la anexión de áreas o la concentraciones aledañas (López, 2000), componiéndose un solo espacio o área con aspectos en común. Estos aspectos pueden ser sociales, culturales o, inclusive, de infraestructura tales como carreteras o acueductos. Para la proyección de la población se utilizan el método de comparación gráfica, el método de densidades de población, los métodos matemáticos (lineal, geométrico, logarítmico) y el método de los componentes del cambio demográfico o método de los componentes de cohorte; todos basados en la información censal de los censos de los años 1973, 1984, 2000 y 2011 del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) con un grado de resolución a escala distrital.

El método de comparación gráfica busca estimar el cambio poblacional de la región o la zona de estudio a partir del cambio en la población de otra región, el requisito es que la magnitud de la población actual de la zona de estudio sea comparable a la magnitud de la población en algún momento del pasado y que haya experimentado luego un crecimiento como el que se espera que ocurra en la zona de estudio. Este método supone que la población en cuestión tendrá una tendencia de crecimiento similar al de la que se compara (López, 2000). El método de densidades de población busca “acomodar” en el espacio físico disponible y apto para ser habitado.

Los métodos matemáticos buscan estimar la tendencia del crecimiento de las poblaciones a partir de modelos de ecuaciones diferenciales que suponen ciertas condiciones iniciales en la velocidad del crecimiento. El método aritmético o de crecimiento lineal, supone que la razón de crecimiento es constante e independiente del tamaño de la población (López, 2000). La constante K_a es la tasa de crecimiento anual que se estima a partir de los datos censales del pasado, las variables P se refieren a la

población y la variables T al tiempo, siendo el parámetro P_0 la población en el tiempo T_0 o tiempo inicial y P_f la población al tiempo T_f o tiempo final. La ecuación para el método aritmético se presenta a continuación:

$$P_f = P_0 + K_a \cdot (T_f - T_0)$$

La principal característica del método geométrico o de interés compuesto es que supone que la razón de crecimiento de la población es proporcional a su propio tamaño (López, 2000); señala el mismo autor que en el método logarítmico o exponencial el crecimiento de la población se da de forma exponencial. En ambos modelos la tasa de crecimiento “ r ” o “ K ” se elevan o multiplican por el cambio en el periodo. Las ecuaciones para el método geométrico y el logarítmico se presentan a continuación

$$P_f = P_0 \cdot (1 + r)^{(T_f - T_0)}$$

$$P_f = P_0 \cdot e^{K \cdot (T_f - T_0)}$$

Como se mencionó en la parte metodológica, las estimaciones y las proyecciones de población para Costa Rica por parte del CCP se calcularon con el método de los componentes del cambio demográfico o método de los componentes de cohorte (CCP et al., 2013); según este documento el método consiste en segmentar la población, por edad y sexo, y exponerla a niveles diferenciales de fecundidad, mortalidad y migración, para calcular así los cambios que experimentaría cada grupo a lo largo del tiempo. Igualmente, señalan los autores que se requiere primero estimar y luego proyectar los cambios de estos componentes del cambio demográfico, para poder predecir la población en el futuro.

$$N_{x+k} = N_x + B_{x+k} - D_{x+k} + SM_{x+k}$$

En la que el subíndice x representa el año base y el subíndice $x+k$ el número de años que han pasado desde el año k . N es la población, B es el número de nacimientos ocurridos, D es el número de defunciones y SM es el saldo migratorio, que han ocurrido durante el período de k años.

4.1. Densidad de población

La Propuesta del Plan Regulador de Orotina (ProDUS, 2009) presenta escenarios de oferta de vivienda en Orotina. Estos corresponden a la oferta hipotética que corresponde a un escenario de saturación, el cual busca establecer cuantas personas pueden acomodarse en el terreno; el cual no solo dependen de la capacidad física del territorio sino de la interacción entre la oferta y la demanda del mercado inmobiliario (ProDUS, 2009). Para el cantón de San Mateo se adoptan los mismos criterios establecidos por ProDUS para el cantón de Orotina.

ProDUS (2009) considera que la cantidad de viviendas que se puede construir excederá considerablemente la demanda al haber mucha área disponible. Al reducirse los precios y se reducen las posibilidades de densificación y deconstrucción en altura, ya que el suelo representa un porcentaje menor del costo total de una obra. El análisis de ProDUS para Orotina se fundamenta en las relaciones entre densidad actual – en el 2007 - y área disponible.

El área libre que puede ser desarrollada corresponde: al área no urbana y que carece de restricciones ambientales - pendientes menores al 30%, fuera de zonas de protección de ríos, que corresponde a usos del suelo de pastos o cultivos y no a bosques. El criterio de la pendiente del 30% del terreno se amplía a un 40% en el manual de buenas prácticas ambientales del SETENA y se luego se amplía al 75% según el decreto 33879.

Las otras restricciones corresponden a un área de cincuenta metros en los márgenes de los ríos en zonas rurales y quebradas según la Ley Forestal 7575 y las áreas de inundación según la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), las cuales corresponden a los llanos en las riberas del río Machuca y los acantilados a ambos lados de la ribera.

Capítulo V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización hidrológica y de la determinación de la recarga artificial de la cuenca del río Machuca, así como su análisis. Se determinaron los principales aspectos fisiográficos y el balance hídrico anual para las cuencas de los ríos Machuca, Surubres, Jesús María y Paires y sus subcuencas, definidas por los puntos de aforo históricos con el objetivo de calibrar los escenarios de precipitación y evapotranspiración a partir del balance anual, siendo el mejor escenario de precipitación las isoyetas generadas por el método de Kriging.

Con el mejor escenario de las condiciones climáticas se desarrollan los balances hídricos mensuales por la metodología Thornthwaite-Mather modificado y el balance de suelos por la metodología de Schosinsky para las cuencas de los ríos Machuca y Surubres definidas por los puntos de aforo. En la sección de hidrogeoquímica se presenta la caracterización química de las aguas superficiales en los ríos Machuca Surubres y Jesús María; y la de los pozos y nacientes que opera el AyA en la cuenca del Machuca. Se desarrollaron diferentes escenarios de proyecciones de población para los distritos que engloban la cuenca para determinar la demanda de recursos hídrico para abastecer la población proyectada.

1. Aspectos fisiográficos

Los principales aspectos fisiográficos se presentan en el Cuadro 7 para todas las cuencas definidas a partir de los puntos de aforos que se tiene en la cuenca hidrográfica Jesús María; se presenta el área en kilómetros cuadrados, el perímetro en kilómetros, la elevación media de la cuenca en metros sobre el nivel del mar (msnm), el índice de compacidad (K_c), el índice de forma (K_f) y la densidad de drenaje. Como se muestra en la

Figura 11 las cuencas de los ríos Surubres y Paires drenan sus aguas a las cuencas de los ríos Machuca y Jesús María respectivamente. Específicamente en el río Machuca la cuenca M10 drena a la cuenca M20 y la cuenca S10 a la S20. Las cuencas M20 y S20 drenan a la cuenca M30 y está drena por último a la cuenca M40; respecto al río Jesús María la cuenca J10, drena en cascada a la cuenca J20 y está a la J30 y la cuenca P10 drena a la P20; las cuencas J30 y P20 drenan a la cuenca J40.

Cuadro 7. Principales aspectos fisiográficos para las cuencas generadas a partir de los puntos de aforos de la cuenca hidrográfica Jesús María.

Río	Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Elevación media (msnm)	Índice de compacidad	Índice de forma	Densidad de drenaje (km/km ²)
Surubres	S10	12,9	16,2	421	1,271	0,31	1,01
	S20	28,1	28,1	315	1,493	0,18	1,03
Machuca	M10	18,9	18,7	852	1,215	0,47	1,15
	M20	51,5	34,4	663	1,351	0,31	1,13
	M30	82,4	50,7	492	1,576	0,13	1,15
	M40	150,2	74,1	363	1,705	0,10	1,12
Paires	P10	22,6	28,2	318	1,671	0,16	1,17
	P20	37,6	44,9	261	2,065	0,07	1,21
Jesús María	J10	33,6	25,4	578	1,236	0,41	1,11
	J20	51,3	39,4	467	1,552	0,14	1,12
	J30	63,5	51,2	406	1,815	0,09	1,10
	J40	110,4	64,7	329	1,738	0,13	1,14

El río Machuca es el que presenta la mayor elevación media, tanto a nivel de cuenca completa (M40) con una elevación media de 363 msnm como a nivel de cabecera de cuenca, donde la cuenca M10 presenta una elevación media de 852 msnm. Respecto a las cuencas altas de los cuatro ríos, a la cuenca M10 le siguen la J10 con una elevación media de 578 msnm, la cuenca S10 con una elevación media de 421 msnm y por último la cuenca P10 con una elevación media de 318 msnm. La elevación media de la cuenca M10

es del orden del doble de la cuenca S10 y mayor que 2,5 veces la cuenca P10 y 1,5 veces mayor que J10.

La cuenca con el mayor índice de compacidad es la cuenca P20, la cual es evidentemente más alargada que las demás. Con excepción de la cuenca alta del río Paires, las cuencas altas de los ríos Machuca, Jesús María y Surubres son las que tienen un menor índice de compacidad – del orden de 1,215, 1,236 y 1,271 respectivamente, y por lo tanto su forma se asemeja más a un círculo. El menor índice de forma lo presenta la cuenca completa del río Paires con un valor de 0,07, por lo cual se espera que este menos sujeta a crecientes que una cuenca con la misma área pero con mayor índice de forma (Monsalve, 1999). Los mayores índices de forma se presentan en las cuencas M10 y J10 con valores de 0,47 y 0,41 respectivamente.

El último aspecto fisiográfico que se analizó fue la densidad de drenaje. En este parámetro todas las cuencas presentan valores muy uniformes; desde el punto de vista del rango de valores que se encuentra en la bibliografía, donde se indica que valores del orden de los 0,5 km/km² representa cuencas con pobre drenaje y que cuencas bien drenadas presentan valores del orden de los 3,5 km/km² (Monsalve, 1999). Los valores determinados para toda la cuenca hidrográfica del río Jesús María varían entre 1,01 y 1,21, siendo el primer valor para la cuenca S10 y el último para la cuenca P20.

2. Balance hídrico

Para desarrollar el balance hídrico es necesario determinar todas las variables que intervienen en él. En el balance hídrico anual se debe determinar la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía sobre la cuenca. El Balance anual se desarrolla siguiendo la misma metodología desarrollada por la UNESCO para el balance hídrico superficial de Costa Rica (UNESCO, 2007). Para el balance hídrico mensual y para el

balance de suelos es necesario, además, determinar los usos del suelo y su características, pendientes del terreno, pruebas de infiltración y coeficientes de escorrentía.

2.1. Escenarios de precipitación

En el apartado del balance hídrico anual se presentan los distintos escenarios de precipitación construidos a partir de las estaciones meteorológicas. La precipitación sobre la cuenca se obtiene a partir de la información mensual de las estaciones meteorológicas del IMN y del ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). En total se contó con la información de catorce estaciones meteorológicas:

80002-San Miguel de Barranca	80003-Esparza
80005-NAGATAC	80007-Macacona
80008-Subestación Barranca	82001-Guadalupe de Esparza
82002-Tivives	82005-Salinas
82007-Lagunillas, Orotina	82009 ABOPAC. Cascajal, Orotina
84017-Agropecuario de Orotina	84097-Bajo Laguna
84098-San Pedro de Turrubares	84099-San Rafael de Turrubares

Estas estaciones tienen datos que no se corresponden en el tiempo. Se tienen registros desde 1937 hasta el año 2013, pero hay algunos lapsos de tiempo sin información en ciertas estaciones. Se descartan las décadas de los años 1930 y 1940, al contar con una estación entonces. En la década de los años 1950 hay datos de tres estaciones que aumentaron a cuatro en los años 1960. Estas son las estaciones de San Miguel de Barranca, Esparza, NAGATAC y Agropecuario de Orotina. La información utilizada para la creación de los polígonos de Thiessen y las isoyetas es la que va desde el año 1977 al año 2013.

La Figura 13 presenta el registro de precipitación, con el número de meses en el año en que se tienen datos de precipitación. Se presentan en verde los años que cuentan con el registro completo (doce meses), en amarillo los años incompletos con al menos datos de nueve meses. Los años que cuenten con datos de ocho meses o menos se presentan en rojo y se consideran inapropiados para ser utilizados para estimar la precipitación. La Figura 14, la Figura 15 y la Figura 16 presentan los resultados de los polígonos de Thiessen, los polígonos de Thiessen combinado con las zonas de vida y las isoyetas a partir de las estaciones meteorológicas respectivamente. A partir de los polígonos de Thiessen se obtiene el escenario con mayor precipitación anual, seguido por los polígonos de Thiessen modificados con las zonas vida y las isoyetas representan el escenario de menor precipitación anual sobre la cuenca.

De las catorce estaciones meteorológicas con información de precipitación se seleccionaron solo aquellas estaciones que se consideraron representativas tanto en el tiempo como en el espacio. Los dato de las estaciones sobrantes, también se utilizaron para realizar el análisis de doble masa para validar la información de las estaciones así como para rellenar aquellos meses en los que con que no se cuenta con información. Estos resultados y su análisis no se incluyen en este trabajo para facilitar la presentación de los resultados.

Se seleccionan dos periodos para elaborar los escenarios de precipitación. Del año 1977 al 1995 se cuenta con siete estaciones, la cuales son: San Miguel de Barranca, NAGATAC, Macacona, Guadalupe de Esparza, Bajo Laguna, San Pedro de Turrubares y San Rafael de Turrubares. Con estas estaciones, se tiene una buena representación de la precipitación al sur de la cuenca. El segundo periodo que se selecciona es del año 2001 al 2010 con cinco estaciones: NAGATAC, Macacona, Guadalupe de Esparza, ABOPAC. Cascajal de Orotina y Bajo Laguna. El Cuadro 8 presenta la precipitación anual para ambos periodos de las estaciones utilizadas y la razón de este valor respecto a la mediana de todo el registro.

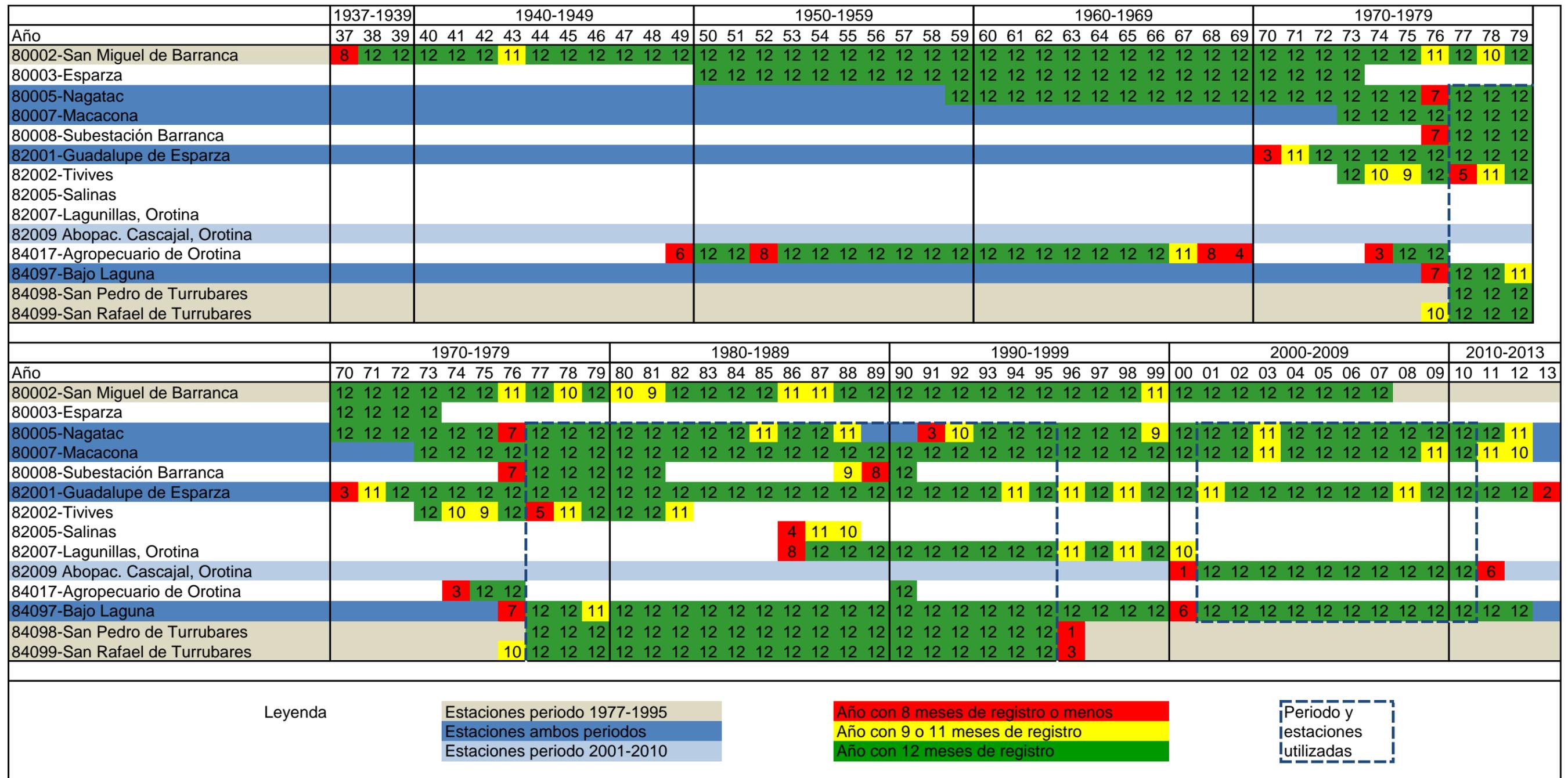


Figura 13. Meses del año con registro mensual de precipitación para las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca del río Machuca a partir de la información de las estaciones del ICE y del IMN.

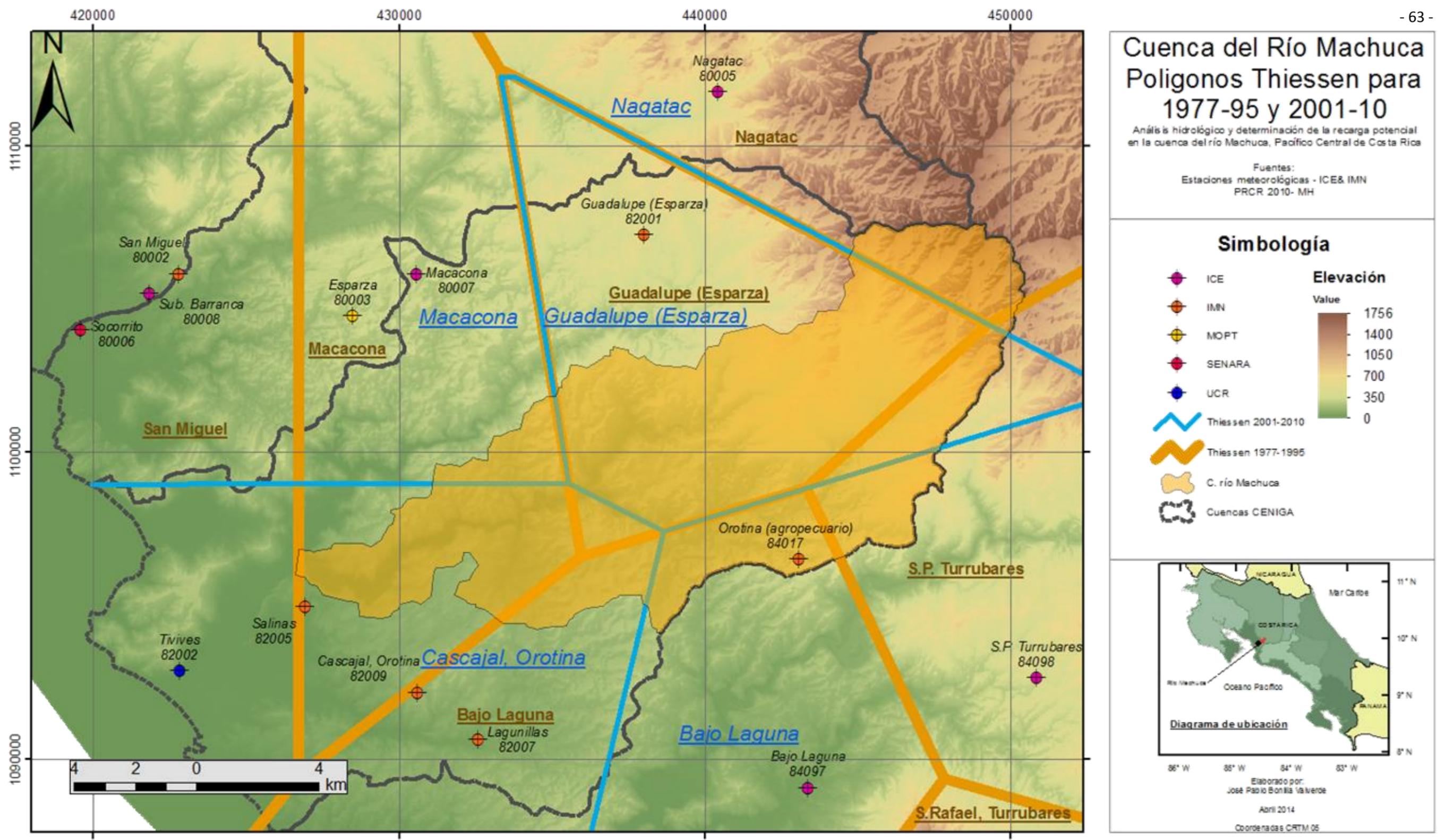


Figura 14. Polígonos de Thiessen para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires generados para los periodos 1977-1995 y 2001-2010.

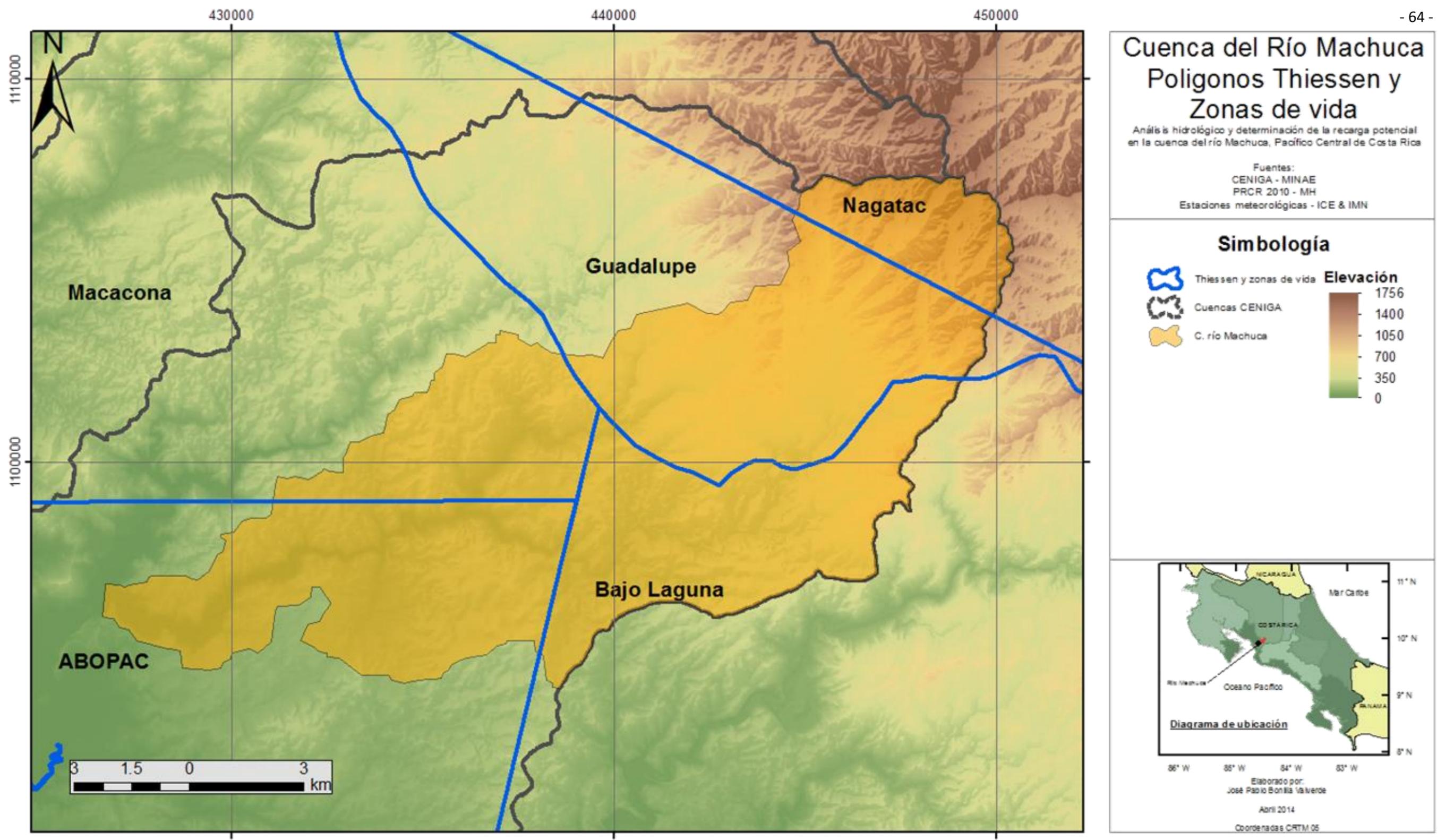
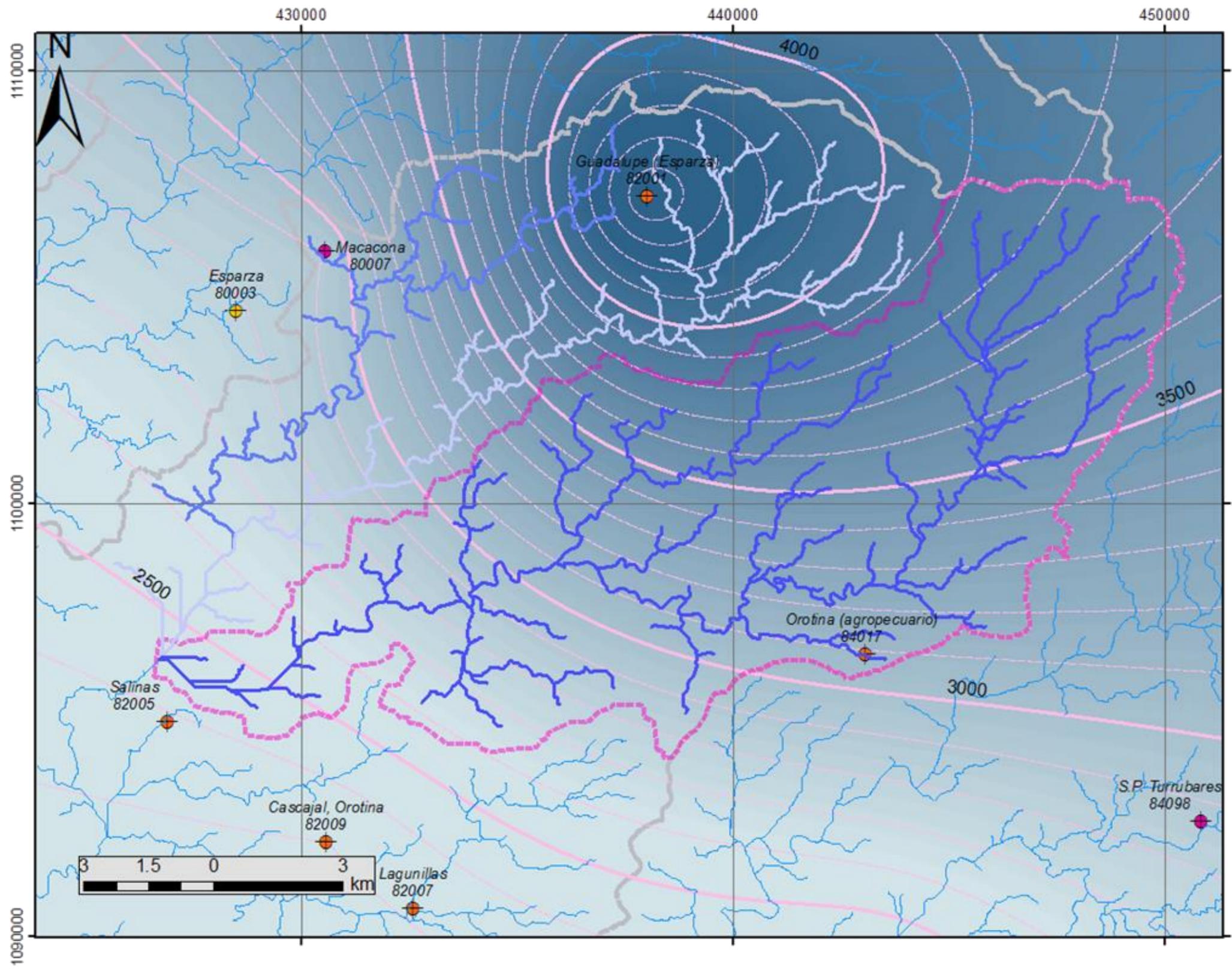


Figura 15. Polígonos de Thiessen combinados con zonas de vida para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.



Cuenca del Río Machuca

Isoyetas anuales periodo 2001-10

Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial en la cuenca del río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica

Fuentes:
Estaciones meteorológicas - ICE & IMN

Simbología

	otros		C. río Machuca
	Jesús María		4219.7
	Machuca		3684.39
	Paires		3149.07
	100		2613.76
	500		

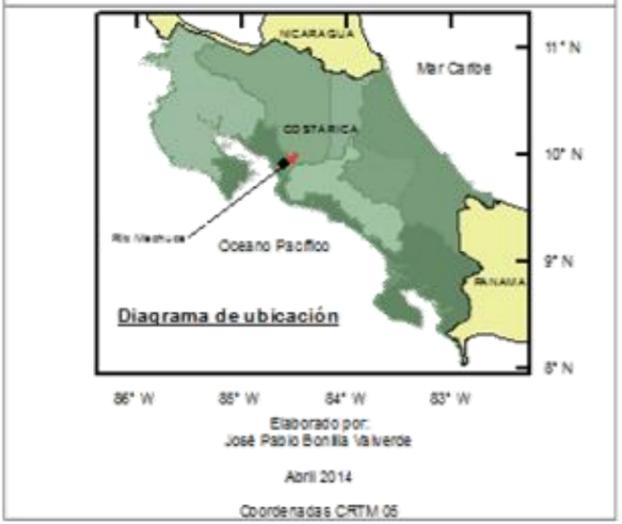


Figura 16. Isoyetas con la precipitación anual calculada para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.

Cuadro 8. Datos de precipitación de unas estaciones del Pacífico Central para los períodos 1977-1995 y 2001-2010.

Código estación	Nombre estación	Período completo (mm/año)	Período 1977-1995 (mm/año)	Período 2001-2010 (mm/año)	Razón 1977/1995	Razón 2001/2010
80002	San Miguel	2058	1685	--	0,819	--
80005	NAGATAC	3499	2933	3856	0,838	1,102
80007	Macacona	2703	2521	2906	0,933	1,075
82001	Guadalupe (Esparza)	4060	3837	4498	0,945	1,108
82009	ABOPAC, Cascajal	2042	--	2299	--	1,126
84097	Bajo Laguna	2240	2211	2364	0,987	1,055
84098	San Pedro de Turrubares	2622	2622	--	1,000	--
84099	San Rafael de Turrubares	3609	3631	--	1,006	--

En el Cuadro 8 se observa que el periodo de diecinueve años 1977-1995 presenta valores de precipitación menores respecto a la mediana de todo el registro de cada estación. En contraste, el periodo de diez años 2001-2010 presenta valores mayores, alrededor de un 10%. A pesar de ser un periodo 2001-2010 más corto y tener menos estaciones, este se considera más representativo en el tiempo y en el espacio. Temporalmente se busca un traslape con el periodo de aforos de la precipitación, debido a que el número de puntos de aforo crece a partir del año 2004. Espacialmente, a pesar de que el segundo periodo cuenta con tres estaciones menos que el primero, se prefiere el segundo pues las estaciones del primero son “opacadas”, o son menos representativas por tener una estación más cercana a la cuenca. Esto se evidencia en la Figura 14 donde en líneas y letras naranjas se presentan los polígonos de Thiessen para el periodo 1977-1996 y en las líneas y letras azules para el periodo 2001-2010.

Ejemplos de unas estaciones “opacadas” o menos representativas son la estación San Rafael de Turrubares la cual está al sureste de la estación Bajo Laguna, que está, a su vez, al sur de la cuenca de interés. Igualmente, la estación San Miguel de Barranca está al

oeste franco de la estación Macacona y sus polígonos de Thiessen no cubren área alguna sobre la cuenca del río Jesús María ni mucho menos del Machuca, como se evidencia por el polígono de la estación San Miguel en la Figura 14. En el Cuadro 9 se presenta la precipitación anual, así como la latitud y longitud en coordenadas geográficas y la elevación en metros sobre el nivel del mar (msnm) de las estaciones utilizadas.

Cuadro 9. Datos de precipitación utilizados para todos los escenarios

Estación	Nombre	Latitud (CRTM05)	Longitud (CRTM05)	Elevación (msnm)	Precipitación (mm/año)
80005	NAGATAC	440 413	1 111 744	450	3856
80007	Macacona	430 567	1 105 811	240	2906
82001	Guadalupe (Esparza)	438 020	1 107 075	400	4498
82009	ABOPAC	430 602	1 092 157	122	2299
84097	Bajo Laguna	443 387	1 089 039	40	2364

A partir de las isoyetas es que se obtiene la menor precipitación sobre las cuencas; la precipitación anual sobre toda las cuencas de los ríos Surubres (S20) y Machuca (M40) es de 3606 mm y 3296 mm respectivamente mientras que para los ríos Paires (P20) y Jesús María (J40) es de 3314 mm y 3495 mm por año, respectivamente. Para toda la cuenca hidrográfica Jesús María se tiene una lámina anual de precipitación de 2735 mm. Este valor está 245 mm por encima del calculado por el PHI-LAC en el 2007 (UNESCO, 2007).

2.2. Escenarios de evapotranspiración

La evapotranspiración se puede determinar por muchas metodologías, las cuales están en función de diferentes números de variables según el método empleado. Entre esas variables están la temperatura, la radiación, las horas de brillo solar, entre otras. La temperatura es una de las variables más importante en todas las metodologías. En el área de estudio solo se cuenta con tres estaciones con datos de temperatura, las cuales están

fuera de las cuencas. No se cuenta con ningún dato de radiación, brillo solar ni otra variable excepto la precipitación, en todas las demás estaciones.

Las tres estaciones con datos de temperatura son: Salinas, Lagunillas -Orotina- y ABOPAC -Cascajal, Orotina-. La estación Salinas, que representa a la zona costera, solo tiene dieciocho datos de temperatura en dos años, por lo tanto se descarta. Las estaciones Lagunillas y ABOPAC. Cascajal representan ambas la zona baja de la cuenca del río Machuca pero para distintos periodos, del año 1986 al 2000 y del 2000 al 2011 respectivamente. Las estaciones se traslapan en los meses de noviembre y diciembre del año 2000.

La evapotranspiración potencial (ETP), calculada por la metodología Thornthwaite para las estaciones Lagunillas, Orotina (82007) y ABOPAC. Cascajal, Orotina (82009) es de 1572 mm/año y 1726 mm/año respectivamente. Para no considerar la ETP como una constante sobre la cuenca, debió a la poca cantidad de estaciones, se recurre al Atlas Climatológico de Costa Rica (ACCR) del Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2009) para estimar la variación espacial de la ETP anual para toda la cuenca. El ACCR presenta el mapa para la evapotranspiración real (ETR), pero se estima que la diferencia entre la ETR y la ETP no es significativa mientras exista suficiente humedad en el medio.

Según el ACCR la ETR en el área donde se encuentran ambas estaciones tiene un valor anual de 1600 mm, el cual es un 1% mayor que el valor calculado para la estación Lagunillas, Orotina (82007) y un 4% menor que el valor anual calculado a partir de los datos de temperatura para la estación ABOPAC. Cascajal, Orotina (82009). Para estimar la variación temporal se estima el porcentaje que representa la ETP mensual respecto a la ETP anual. A pesar de las diferencias entre la ETP para cada estación, el comportamiento mensual es prácticamente el mismo. En la Figura 17 se presenta la ETR según el ACCR y en el Cuadro 10 se muestra el porcentaje que representa la ETP mensual respecto a la ETP anual para ambas estaciones.

Cuadro 10. Variación mensual porcentual evapotranspiración potencial en mm/mes.

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Lagunillas	8,1	9,2	11,4	11,2	9,3	8,1	7,9	7,6	6,8	6,8	6,6	7,0
ABOPAC	8,2	9,1	10,9	10,6	9,3	8,3	8,3	7,8	7,1	7,1	6,3	7,0
Promedio	8,1	9,1	11,1	10,9	9,3	8,2	8,1	7,7	7,0	7,0	6,4	7,0

Debido al faltante de información necesaria para caracterizar la parte alta de la cuenca, se estima que la variación de la ETP obedece al mismo comportamiento que el de la parte baja. En el climograma de la zona central de Costa Rica del ACCR (IMN, 2009) se presenta el comportamiento de la temperatura en la estación Sabana Larga (84004) la cual presenta una temperatura máxima en abril de alrededor de 25°C y una mínima de 22°C en octubre. Este comportamiento es similar al de las estaciones en estudio, que presenta el máximo en marzo y el mínimo en noviembre, con una diferencia de 3,6°C entre estos. Finalmente, se multiplican los valores mensuales de la ETR estimada a partir del mapa del ACCR por el factor de la ETP/ETR anual para la estación ABOPAC. Cascajal, Orotina (82009) para obtener los valores de la ETP para cada cuenca, el cual en este caso es de 1,08.

La evapotranspiración potencial (ETP) anual en la cuenca hidrográfica Jesús María es de 1518 mm/año. Para las cuencas de los ríos Machuca (M40), Surubres (S20), Jesús María (J40) y Paires (P20) es de 1639 mm/año, 1616 mm/año, 1572 mm/año y 1575 mm/año respectivamente. El mayor valor de la ETP se da en la cuenca del río Machuca y el menor se da en la cuenca del río Jesús María definida a partir del punto de aforo J40.

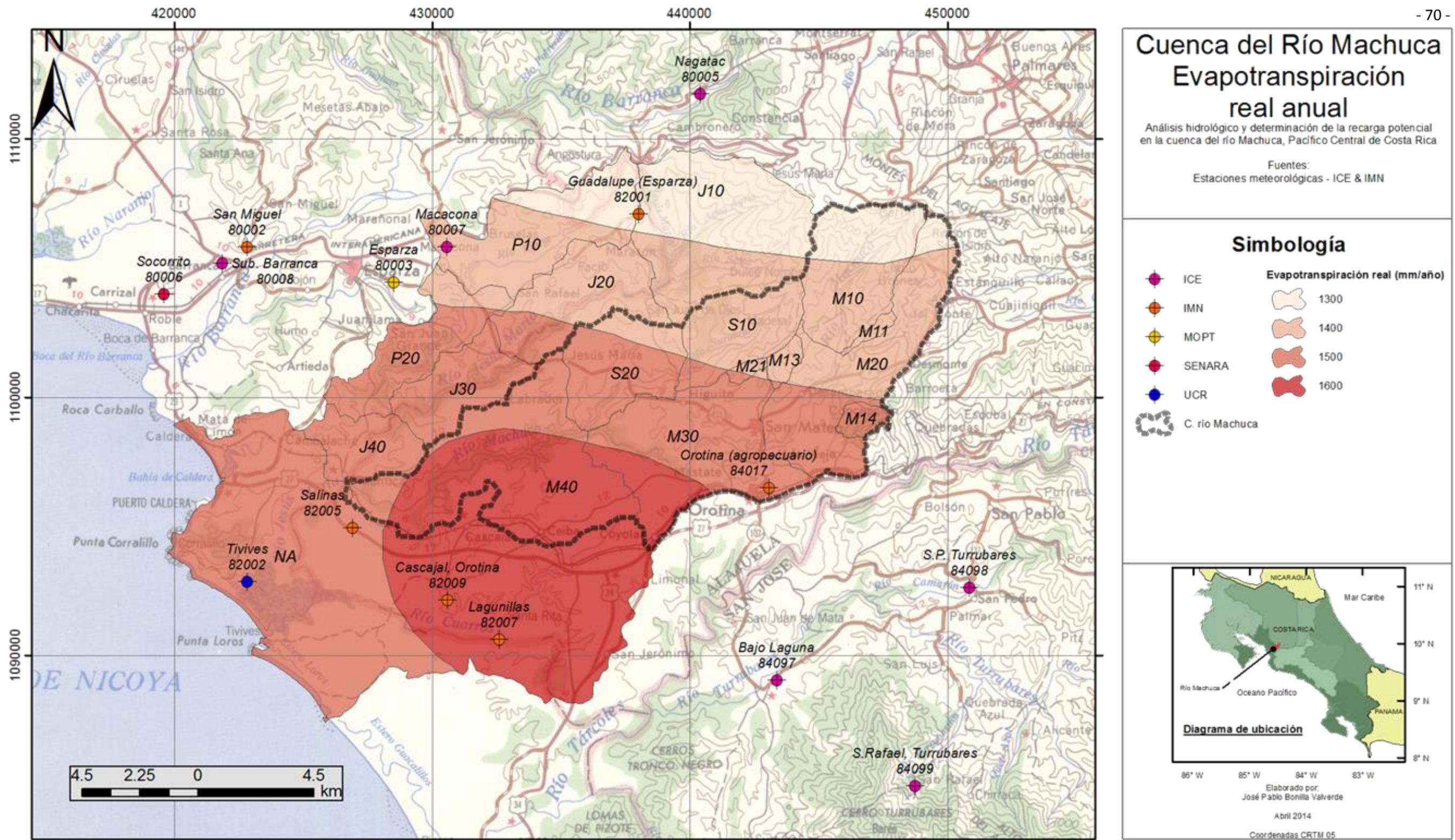


Figura 17. Evapotranspiración real anual para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.

2.3. Escenarios de escorrentía

En el área de estudio hay once puntos con un registro de aforos históricos los cuales se definen en la Metodología (Capítulo IV) y se muestran en la Figura 12. En la cuenca del río Machuca se tienen dos puntos de aforo sobre el cauce principal (M10 y M20); cinco sobre afluentes de ese mismo río (M11, M12, M13, M14 y M21) y un punto sobre el río Surubres (S10), siendo este último tributario del río Machuca también. Además se cuenta con dos puntos de aforo históricos en el río Jesús María (J10 y J30) y uno sobre el río Paires (P20). Los puntos M11, M12, M13 y M14 corresponden a las quebradas Los Mora, San Juan, Vargas y Pital; el punto M21 afora el río Centeno. Los puntos M14 y M21 son sitios de toma para comunidades y los puntos M11 y M12 se aforan pues fueron considerados como un refuerzo a la toma del sistema de San Mateo.

Esos puntos fueron reforzados con un campaña de aforos realizada en abril del 2013 en la que se incluyeron tres puntos de aforo adicionales en el río Machuca (M30, S20 y M40); los puntos M30 y S20 se encuentran en los ríos Machuca y Surubres antes de su confluencia y en el punto M40 se afora el río Machuca antes de la unión con el río Jesús María. Además se incluyeron dos puntos en el río Jesús María (J20 y J40); el primero sobre el puente de las Damas entre las comunidades Jesús María y Esparza y el segundo aguas arriba de la confluencia de los ríos Paires y Jesús María. Se planeó medir el río Paires en dos puntos (P10 y P20) pero el cauce estaba seco durante la campaña del 2013.

El Cuadro 11 presenta un resumen de la información general de los puntos de aforo históricos con el código propio del AyA, el nombre con que es conocido el punto de aforo, la latitud y la longitud en coordenadas Lambert Norte así como la fecha del primer aforo registrado (Primero) y la del último aforo registrado (Último); así como el número de datos existente. El punto M20 se presenta dos veces en el Cuadro 11 debido a que el

punto de aforo se movió aguas abajo alrededor de 8 metros y corresponde a un nuevo punto de aforo *sensu stricto*; para efectos de este estudio, se supondrá que representan el mismo punto. A partir de los puntos de aforos históricos y la campaña de 2013 se genera el área de las cuencas que llevan el mismo nombre del punto de aforo y en la Figura 11 se muestra como drenan las mismas.

Cuadro 11. Puntos de aforo históricos del AyA en la cuenca del río Jesús María

Clave	Punto de aforo	Código	Latitud	Longitud	Primero	Último	Datos
M10	Río Machuca #1 antes sitio toma Desamparados San Mateo	23 0 2	216 088	482 025	Feb-85	Mar-13	193
M11	Quebrada los Mora – antes de la unión con río Machuca	23 0 7	216 090	482 015	Abr-93	Mar-13	141
M12	Quebrada San Juan #1	23 0 6	216 200	482 250	Abr-93	Ago-02	51
M13	Quebrada Vargas	23 0 3	215 200	480 100	Feb-79	Feb-86	4
M14	Quebrada Pital – Hacienda Vieja – Orotina – sitio toma	23 0 4	213 194	482 069	Ene-82	Mar-13	144
M20	Río Machuca #2 – aguas abajo puente San Mateo – Orotina	23 0 13	212 506	479 194	Jun-07	Mar-13	67
M20	Río Machuca nº1	23 0 9	212 500	479 200	Abr-79	Ago-01	10
M21	Río Centeno - en Higuito de San Mateo- sitio toma	23 0 1	215 149	477 947	Ene-82	Mar-13	133
S10	Río Surubres – en Higuito de San Mateo – arriba río Surubritos	23 0 12	215 249	475 994	Jun-07	Mar-13	65
J10	Río Jesús María # 1 – en San Juan de Dios de San Mateo	23 0 8	218 335	474 945	Ene-78	Mar-13	109
J30	Río Jesús María 2 – abajo en la melonera – Esparza	23 0 11	213 791	464 755	Jun-07	Mar-13	59
P20	Río Paires – en la melonera – Esparza	23 0 10	213 914	464 769	Ene-94	Mar-13	60

Año	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Total
M10								4	5	4	6	3	5	5	6	10	7	4	6	6	9	5	2	2	2	4	7	11	12	10	11	11	12	11	11	191
M11																6	7	3	6	8	8	6	2	4	1	4	4	10	12	9	7	11	12	10	9	139
M12																																				51
M13		1						2	1																											4
M14							3	3	2	4	4	5	7	4	4	5	4	9	7	3									8	10	12	11	12	12	12	141
M20			1	3				2																1	3											74
M21							3	3	2	4	5	5	6	3	5	5	3	4	6										8	10	12	11	12	12	12	131
M31																													5	11	11	12	12	12	63	
J10	1	3	4																				1	3	1	2	8	10	11	8	10	10	11	11	12	106
J30																																				57
S20																3																				57
Leyenda	Año con 12 meses de registro Año con 11 o 9 meses de registro												Año con 8 o 6 meses de registro Año con 5 meses de registro o menos																							

Figura 18. Registro histórico de los aforos en la cuenca hidrográfica Jesús María.

El punto con mayor número de aforos es el punto M10 la toma del río Machuca para abastecer a la ciudad de San Mateo. Se tiene un registro de 191 aforos en casi 30 años, desde 1985 hasta la fecha; el punto M13 es el que menos datos tiene con un total de 4 aforos en siete años. La Figura 18 presenta la distribución en el tiempo de estos datos. En esta se observa que durante los años 1980, se dejan de aforar ciertos puntos, los cuales se retoman hasta mediados del año 2000. Con la excepción del punto M12, la Quebrada San Juan #1 la cual se aforó desde 1993 hasta el 2002; y el punto M13, también conocido como Quebrada Vargas, que solo se aforó a principio de los 1980. Ambos puntos son afluentes del río Machuca; igualmente ambas cuencas cuentan un área menor a 2 km² lo cual representa menos del 1,1% de la cuenca del río Machuca y menos del 0,5% de la cuenca hidrográfica Jesús María y tienen menos de tres cuartas partes del año con datos de aforo por lo cual no son utilizados.

La Figura 19 presenta la distribución mensual del registro histórico del AyA; las líneas representan el número de datos mensuales en el eje izquierdo para cada una de las cuencas dentro de la cuenca hidrográfica Jesús María y las barras muestra la distribución mensual de la base de datos completa en el eje derecho. En esta figura se evidencia que el grueso de los datos se encuentran en los meses de febrero y marzo – período que coincide con el final de la época de estiaje - y descende el número de datos disponibles

entre los meses de septiembre a diciembre; siendo el mes de diciembre el que menos datos tiene.

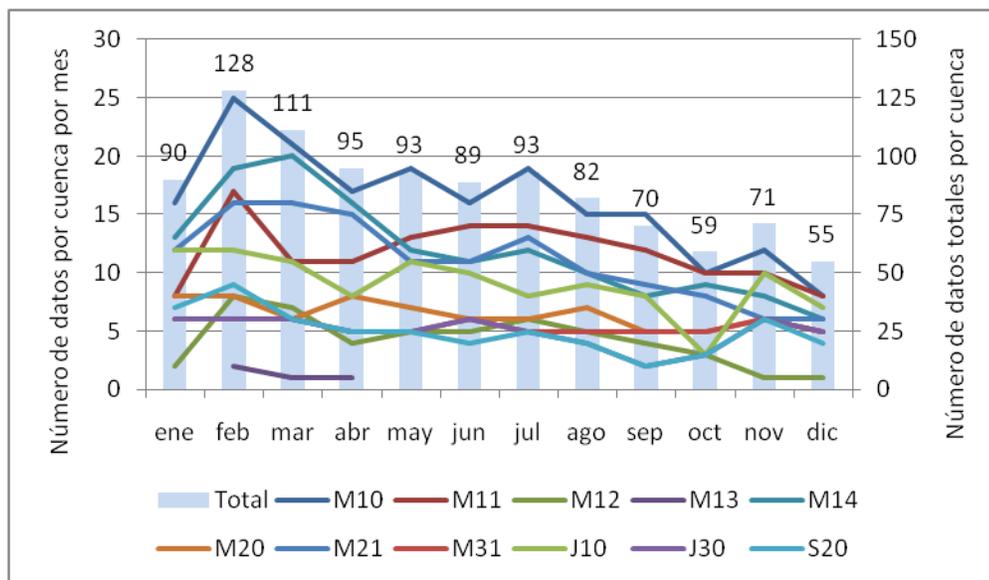


Figura 19. Distribución mensual del registro histórico de los aforos del AyA en la cuenca hidrográfica Jesús María para cada cuenca.

En general todos los puntos sobre afluentes del río Machuca (M11, M12, M13, M14 y M21) presentan cuencas relativamente pequeñas, que son utilizadas para el abastecimiento y, por lo tanto, existe el registro histórico, pero solo del rebalse y no de la suma del rebalse y lo aprovechado; por su tamaño y por contar con información incompleta (por ejemplo, menos de doce meses del año) se eliminan de este análisis.

La Figura 20 presenta el caudal promedio histórico aforado convertido a lámina de escorrentía en milímetros por mes. El eje vertical está en escala logarítmica debido a la marcada diferencia entre los meses de estiaje (marzo y abril), durante los cuales es del orden de los 10 mm/mes y el mes de octubre con valores entre los 200 mm/mes y los 500 mm/mes cuando se presenta la mayor precipitación (Solano, 2001). Se observa que en los puntos ubicados en la parte alta de las cuencas de los ríos Jesús María y Machuca (J10 y M10) hay más escorrentía en el mes de octubre.

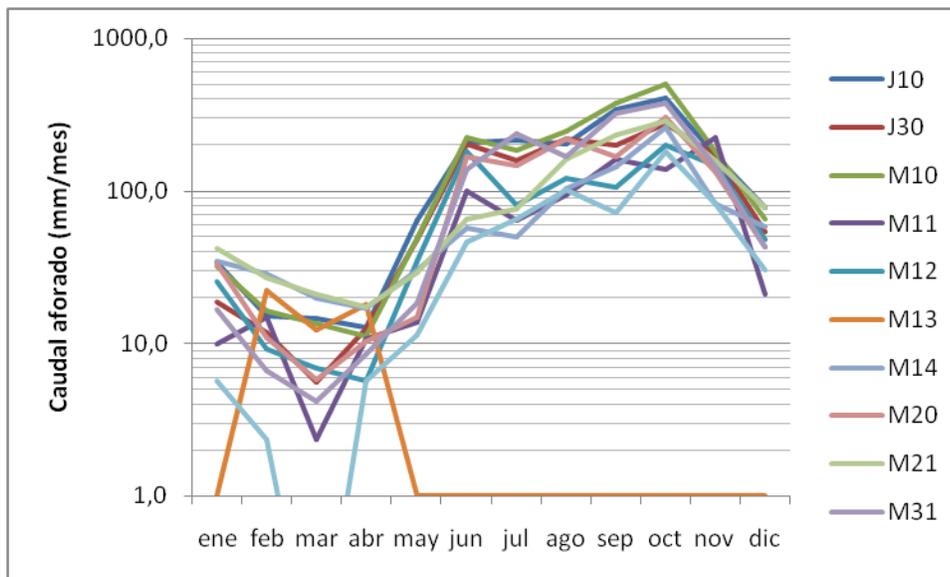


Figura 20. Lámina de escorrentía promedio en los puntos de aforos históricos de la base de datos del AyA en la cuenca hidrográfica Jesús María.

La mediana de los caudales aforados durante la campaña de campo de los días 9 y 10 de abril del 2013 se presenta en el Cuadro 12 tanto en unidades de litros por segundo como en lámina de escorrentía (mm/mes). Para la lámina de escorrentía se utilizan las unidades de milímetros mes para simplificar la corroboración de los resultados del balance hídrico mensual, y se obtiene con el volumen medio aforado y el área total de la cuenca en el punto de aforo.

La cuenca de río Machuca se divide en dos cuencas: el cauce principal del río Machuca y el cauce del río Surubres. Las cuencas formadas a partir de los puntos M10, M20 y M30 del cauce principal del río Machuca vierten en cascada así como las cuencas S10 y S20 del río Surubres. Las cuencas de formadas por los puntos M30 y S20 confluyen hacia la cuenca formada por el punto M40. La cuenca del río Jesús María se dividió de manera que se estudiara también como una cascada, las aguas del punto J10 vierten hacia J20, las de J20 hacia J30 y finalmente J30 hacia J40. La cuenca del río Paires vierte hacia el

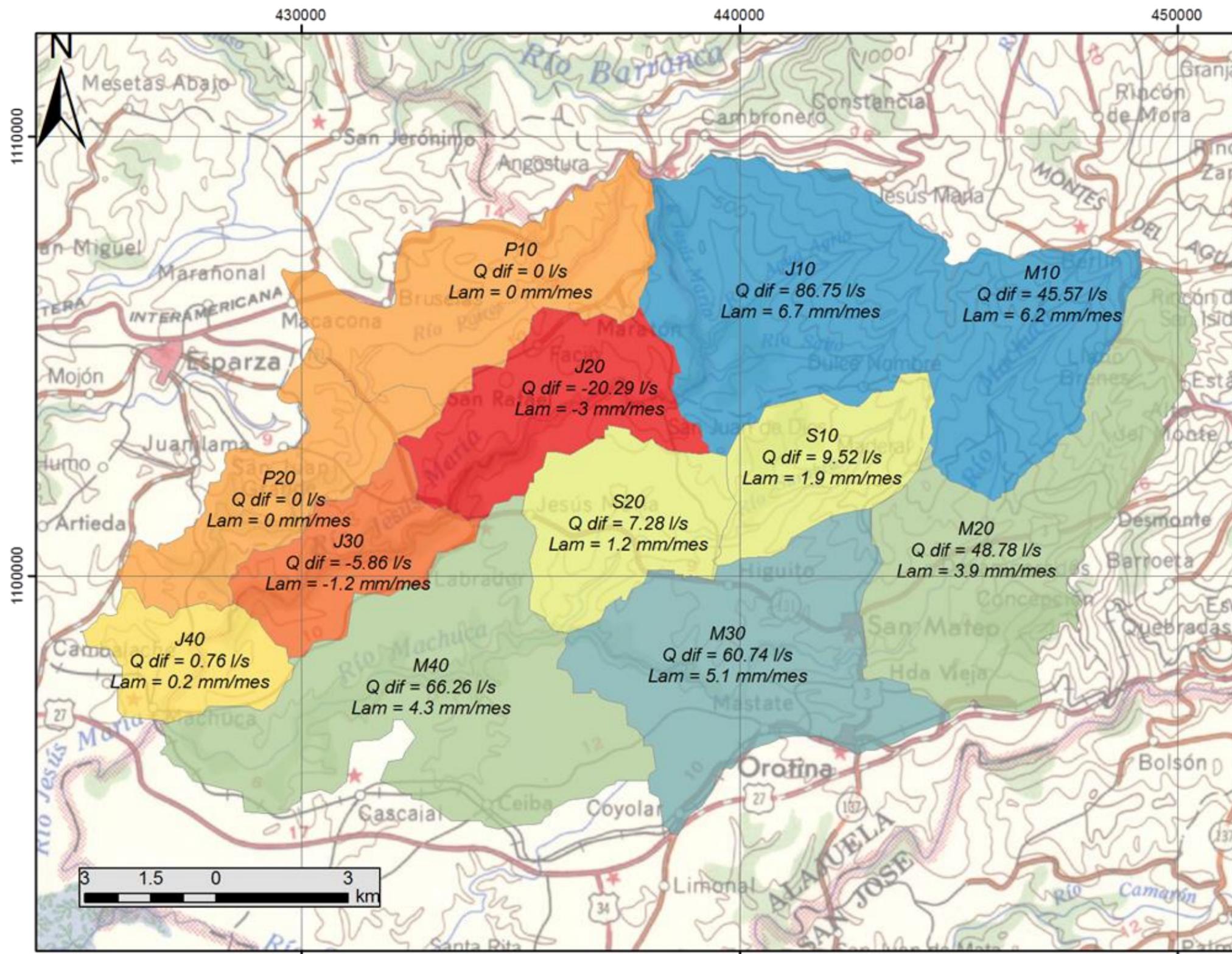
área J40, pero no presenta caudal en toda esta cuenca y su aporte es nulo. Las líneas del Cuadro 12 separan el conjunto de cuencas que se encuentran en cascada.

Cuadro 12. Caudal aforado en la Campaña 2013.

Punto de aforo	Caudal aforado (l/s)	Lámina caudal (mm/mes)
M10	45,6	6,4
M20	74,4	3,9
M30	135,1	4,4
S10	9,5	2,0
S20	16,8	1,6
M40	218,2	3,9
J10	86,8	6,9
J20	66,5	3,5
J30	60,6	2,6
P10	0	0
P20	0	0
J40	61,4	1,5

En el Cuadro 12 se observa como los cauces principales de los ríos Machuca y Surubres “ganan” conforme se desplaza aguas abajo, aunque los caudales del río Surubres son mucho menores. Partiendo del hecho que en abril ya casi son cuatro meses sin precipitación se supone que todo el escurrimiento corresponde a aportes o a recarga de un sistema acuífero presente en la zona de estudio.

Por el contrario, el cauce del río Jesús María “pierde agua” entre los puntos J10, J20 y J30 y se recupera ligeramente en el último tramo. Se interpreta la diferencia entre la salida y la entrada de cada cuenca como el aporte del sistema acuífero presente en el área – un signo positivo significa que existe aporte del sistema acuífero y un signo negativo significa el agua que drena de la cuenca superior se está almacenando o desviando a otro sistema acuífero u área. La Figura 21 muestra el aporte, pérdida o recarga – del sistema acuífero presente en el área. La cuenca M10 tiene una captación de 20 l/s para el abastecimiento de San Mateo, los cuales suman a M20.



Cuenca del Río Machuca
Aporte de acuíferos
Campaña 2013
 Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial en la cuenca del río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica

Fuentes:
 Mozaico 1:200 000 - IGN
 Atlas CR 2008 - TEC

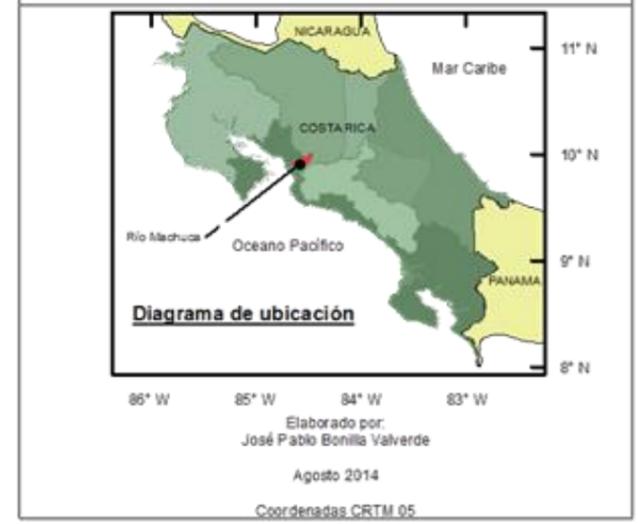
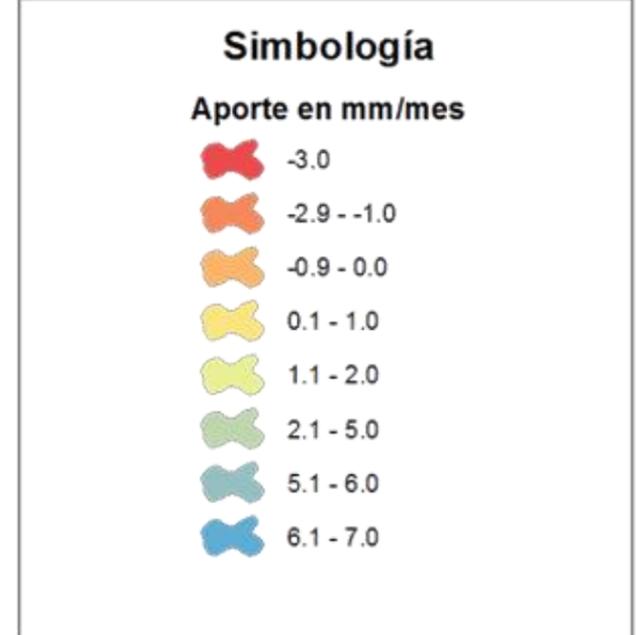


Figura 21. Aporte de los acuíferos aforados en la Campaña 2013 para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.

El Cuadro 13 muestra un resumen de la información de la Figura 21. Las partes altas de las cuencas de los ríos Jesús María y Machuca – en azul - presentan una lámina de agua alrededor de cinco veces mayor que todas las demás láminas, lo que hace presumir que si existe precipitación en la parte alta de la cuenca, o que habría un sistema acuífero que se ubicaría en el Grupo Aguacate el cual es el que más recurso aporta.

Cuadro 13. Caudal que aporta o recarga el acuífero para la Campaña 2013

Punto de aforo	Aporte o recarga (l/s)	Lámina (mm/mes)
De M10	45,6	6,7
De M10 a M20	48,8*	3,9
De M20 a M30	60,7	5,1
De S10	9,5	1,9
De S10 a S20	7,3	1,2
De M30 y S20 a M40	66,3	4,3
De J10	86,8	6,7
De J10 a J20	-20,3	-3,0
De J20 a J30	-5,9	-1,2
De J30 a J40	0,8	0,2

*Nota: se adiciona los 20 l/s que se sustraen para el abastecimiento.

Excluyendo las partes altas de los ríos Machuca y Jesús María (M10 y J10) se evidencia una tendencia de oeste a este respecto al aporte del sistema acuífero. Primero la cuenca del río Paires no tiene flujo, y por lo tanto no hay un acuífero aportando ni siendo recargado desde el cauce principal, las cuencas medias del río Jesús María (J20 y J30) pierden recurso y las cuencas del río Surubres aportan agua al cauce, pero en menor cantidad que las cuencas M20 y M30. Las cuencas M30 y M40 son las que más recurso aportan después de las cuencas de la parte alta de los ríos Machuca y Jesús María. Se calcula el aporte que representa la diferencia del caudal entre puntos de aforos, y este se divide entre el área que conforma la cuenca a partir del punto de aforo, está se presenta en unidades de milímetros al mes. Las cuencas altas de los ríos Machuca (M10) y Jesús María (J10) son las que más aporte por área brindan al cauce, seguido por las cuencas M30, M40 y M20. La cuenca del río Surubres presenta menores aportes por área.

2.4. Balance hídrico anual

Para realizar el balance se estimó la precipitación sobre toda la cuenca a partir de los polígonos de Thiessen, los polígonos de Thiessen combinados con las zonas de vida y las isoyetas. La menor diferencia en el balance hídrico se obtiene con la precipitación calculada a partir de las isoyetas. Los valores de precipitación, evapotranspiración, escorrentía y diferencia del balance se presentan en lámina anual de agua (mm/año). El Cuadro 14 presenta el balance anual para todos los puntos de aforo, los históricos y los de la campaña del 2013.

Cuadro 14. Balance hídrico anual por punto de aforo, en mm/año.

Punto de medición	Precipitación	Evapotranspiración	P-ETP	Escorrentía	Diferencia
M10	3756	1515	2241	1604	637
M20	3579	1571	2008	1038	970
M30	3439	1613	1826		
S10	3748	1577	2171	1174	997
S20	3606	1616	1990		
M40	3296	1639	1657		
J10	4104	1495	2609	1767	842
J20	3952	1528	2424		
J30	3743	1555	2188	1381	807
P10	3643	1526	2117		
P20	3314	1575	1739	603	1136
J40	3495	1572	1924		

Los puntos M30, S20, M40, J20, P10 y J40 corresponden a puntos aforados únicamente durante la campaña del 2013, por lo tanto, no se tiene un dato mensual de escorrentía, y no se puede efectuar el balance anual. Se presentan todos los resultados para efectos de comparación con el modelo mensual. Entre mayor sea el número que identifica el punto de aforo más área tributaria tiene.

Se observa que los valores de precipitación son mayores para la parte alta y disminuyen conforme se desciende en la altura sobre el nivel del mar, mientras que los de la evapotranspiración son menores en la parte alta y disminuyen conforme desciende la elevación sobre el nivel del mar. Se evidencia que el escenario de precipitación es alto para toda la cuenca, siempre superior a 3000 mm/año. Una diferencia positiva se interpreta como un registro menor o incompleto de la escorrentía, mientras que una diferencia negativa se puede deber a un exceso en el registro o a un aporte adicional al de la precipitación, como puede ser la recarga vertical desde un acuífero.

En todos los casos la diferencia es positiva, lo cual se puede deber a dos razones: una sobrestimación de la precipitación o un registro de aforos que no representa las escorrentía real; ambas son posibles, especialmente el registro incompleto, debido a que hay menos datos en la época lluviosa pues es más probable que el río esté crecido y hacer el aforo puede ser riesgoso para los técnicos y por lo tanto no se realiza, además, se utiliza un aforo puntual de un día para representar un mes. Las líneas grises del Cuadro 14 representan los puntos donde se realiza el balance hídrico anual.

La diferencia en el balance hídrico anual para el río Machuca es de 637 mm/año y 970 mm/año, lo que corresponde a un 17% y un 32% respectivamente. La menor diferencia corresponde al sitio en la parte alta de la cuenca, aguas arriba del punto de toma para la ciudad de San Mateo (M10) y la diferencia de 970 mm/año se da a la altura del puente entre San Mateo y Orotina. En el río Surubres, afluente del Machuca, se tiene una diferencia de 997 mm/año que corresponde a un 30%. Para la cuencas de los ríos Paires y Jesús María (parte alta y parte baja de la cuenca del río Jesús María) la diferencia en el balance anual es de 1136 mm, 842 mm y 807 mm respectivamente; esto equivale a un 49%, 19% y 23%.

El punto P20 es el que mayor diferencia porcentual tiene, pues es un 49% signo positivo. Igualmente, esto se puede deber a que solo un año cuenta con el registro

completo de doce datos y cuatro años presentan registros de ocho a once meses, por lo cual es difícil estimar un caudal promedio mensual a partir de cinco registros incompletos. En el otro extremo se tiene el punto M10 con una diferencia porcentual de 17% positiva, lo cual se puede explicar por un registro más continuo de la escorrentía. Para los demás puntos, la diferencia porcentual es del orden del 30%, por lo cual se considera el balance hídrico anual aceptable.

En todos los casos las diferencias son positivas - la resta de la precipitación y la evapotranspiración es mayor al valor de la escorrentía; esto se puede deber tanto a la resolución del modelo (anual) así como a la falta de datos y a la representatividad de los caudales aforados durante la época lluviosa. El escenario de precipitación creado a partir de las isoyetas fue el más representativo en el balance hídrico anual con una precipitación media anual de 3296 milímetros por año para la cuenca del río Machuca.

2.5. Balance hídrico mensual

Con los escenarios de precipitación elaborados a partir de las isoyetas, que son los que presentan la menor diferencia en el balance hídrico anual, se desarrollan los balances hídricos mensuales a partir del método Thornthwaite-Mather modificado como se explicó en el capítulo III Metodología. El modelo se calibra para las subcuencas del río Machuca con el registro histórico de aforos. En el río Machuca se tienen los puntos M10, M20 y S10, siendo el punto M20 el único en una subcuenca que cuenta con aforos históricos y se encuentra en cascada, la cual recibe las aguas del punto M10. Para los puntos M30, S20 y M40 no es posible realizar la calibración debido a que no se cuenta con un registro histórico de aforos, para efectos de tener un resultado se estima caudal del mes de abril, el cual debería coincidir en magnitud con los aforos de la Campaña 2013.

Los principales insumos del balance hídrico mensual son: la precipitación y la evapotranspiración potencial sobre la cuenca, los cuales se establecieron en los apartados anteriores; pero además es necesario determinar los coeficientes de intercepción y de infiltración, la capacidad de campo del suelo; siendo todos estos dependientes del uso que se le da al suelo. Para el uso del suelo se recurre a la imagen satelital LANDSAT del Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica (USGS – *siglas en inglés*) la cual se muestra en la Figura 22 donde se evidencian dos hechos: en la parte alta de la cuenca del río Machuca (M10, M20 y S10) existe tres usos principales: cultivo del café, potreros y bosques; por el contrario, en la parte baja (M30, S20 y M40) donde hay presencia de cultivos extensos (melón, mango y pasto) y bosque de ribera. Esto se corroboró en las giras del campo. De manera general, la cobertura boscosa así como los cultivos de frutales se muestran en color verde en la imagen satelital y los cultivos de pasto y potreros se muestran en colores café y morados.

La Figura 23 presenta el mapa de pendientes sobre la cuenca del río Machuca, donde se evidencia una mayor cantidad de áreas en el rango del amarillo, naranja y rojo, las cuales representan pendientes mayores al 7%. La cuenca M10 presenta pendientes mayores al 30% en la mayor parte de su área, por lo cual solo son aptas para uso forestal: esto también es válido para una parte de la cuenca M20, la cuenca S10- en menor medida - y en las márgenes del río Machuca. El Cuadro 15 presenta el porcentaje de área que representa cada rango de pendiente para las cuencas del río Machuca.

Cuadro 15. Porcentaje que representan los rangos de pendiente para cada cuenca.

Cuenca	< 0,4%	0,4% - 1%	1% - 2%	2% - 7%	7% - 15%	15% - 30%	> 30%
M10	0,5%	0,1%	0,3%	1,8%	5,9%	22,6%	68,8%
M20	1,3%	0,5%	0,9%	6,6%	10,7%	25,8%	54,2%
M30	3,1%	1,9%	4,2%	28,5%	26,1%	22,1%	14,2%
S10	1,7%	0,4%	0,7%	4,6%	16,0%	42,6%	33,9%
S20	2,6%	1,3%	3,3%	19,8%	25,3%	31,0%	16,7%
M40	4,4%	2,4%	4,5%	29,5%	27,7%	17,2%	14,3%

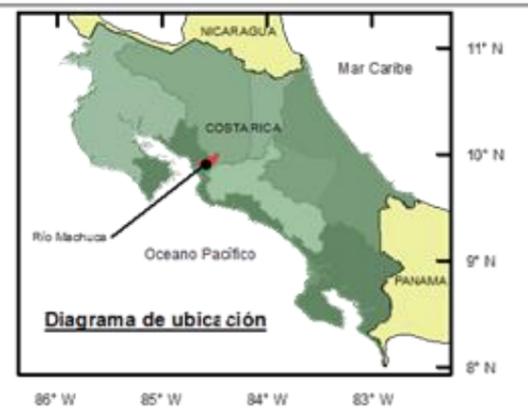
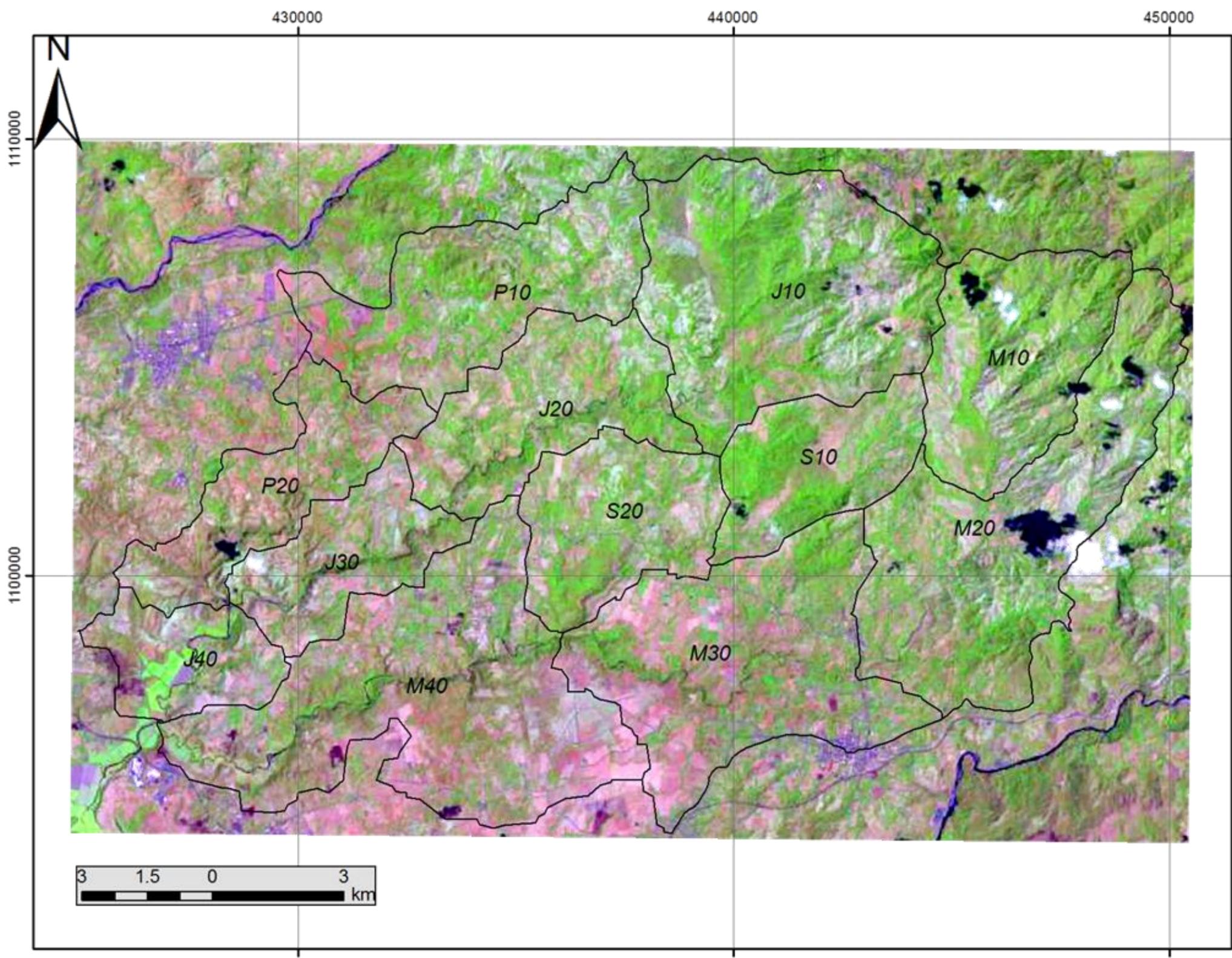
Cuenca del Río Machuca Imagen Landsat del USGS

Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial
en la cuenca del río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica

Fuentes:
Landsat - USGS
PRCR-CR 2010 -MH

Simbología

 Campaña 2013



Elaborado por:
José Pablo Bonilla Valverde
Abril 2014
Coordenadas CRTM 05

Figura 22. Imagen LANDSAT del USGS para determinar el uso del suelo en las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.

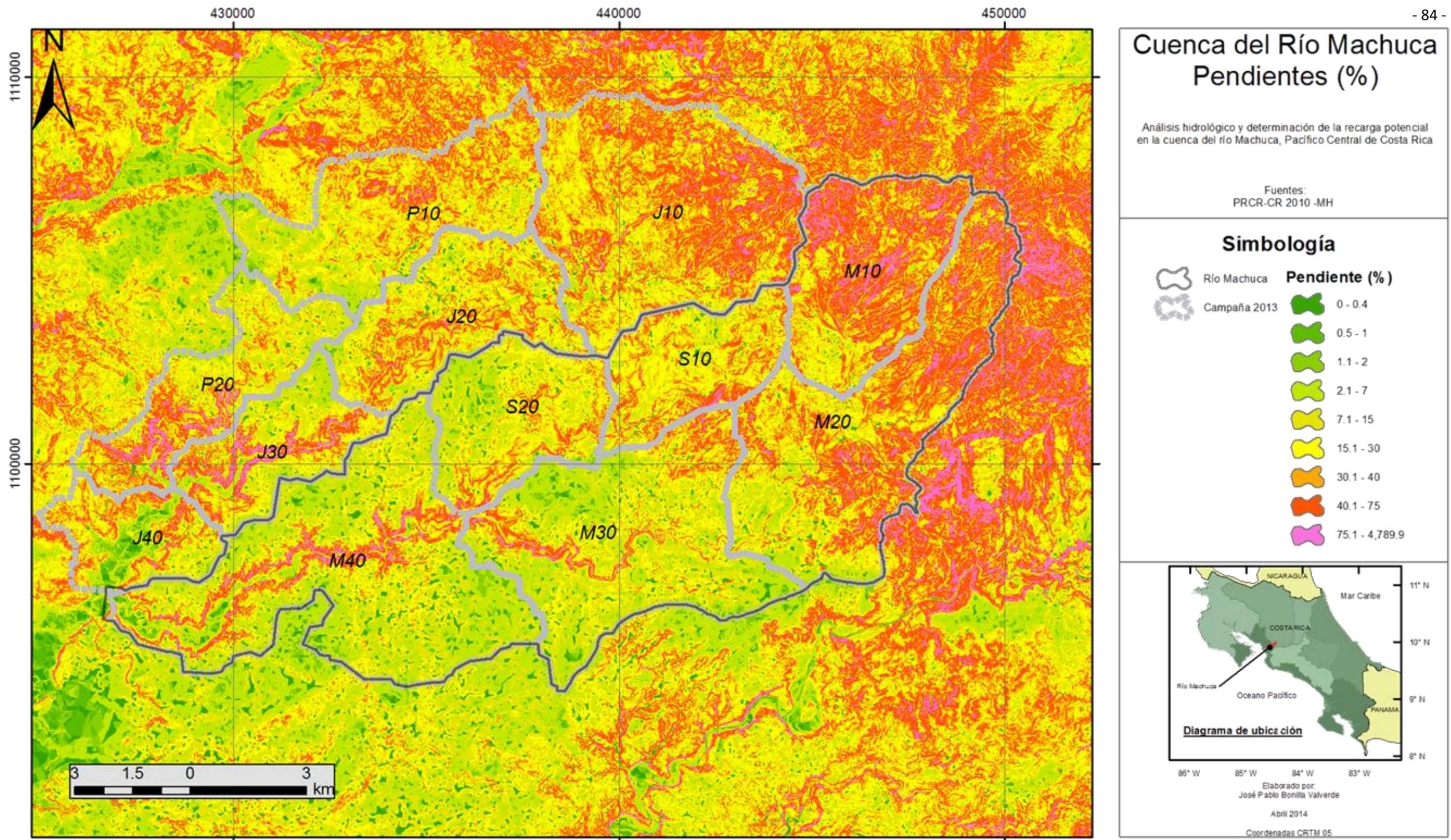


Figura 23. Mapa de pendientes (%) para las cuencas de los ríos Machuca, Jesús María y Paires.

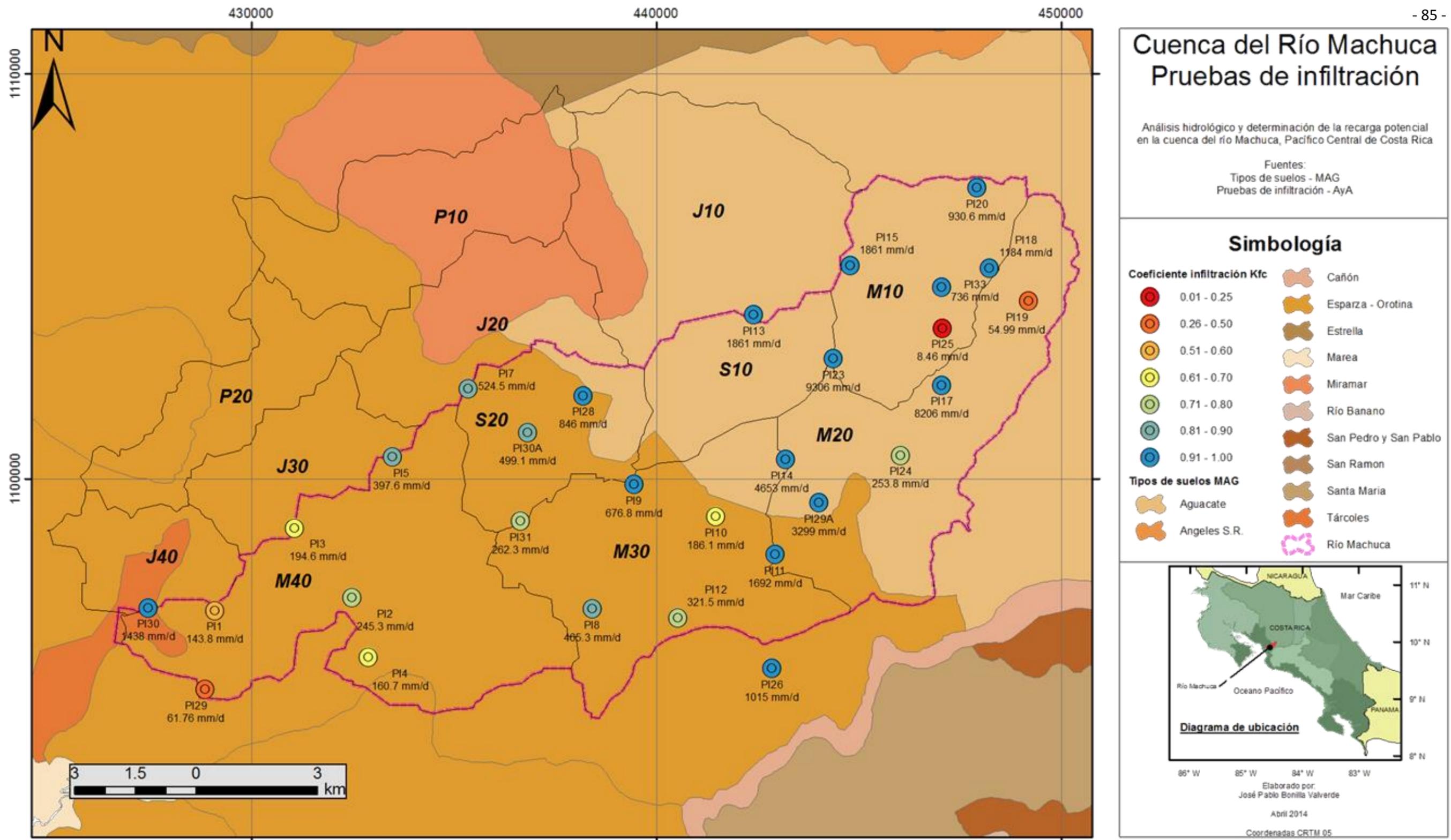


Figura 24. Mapa tipo de suelos y resultados de las pruebas de infiltración para la cuenca del río Machuca.

Solo en un caso las pendientes menores al 7% superan el 40% del área de la cuenca del río Machuca– cuenca M40 con un 41%; le siguen las cuencas M30 y S20 con un 38% y 27% respectivamente. En las demás cuencas las pendientes menores al 7% no superan el 10% del área de cada cuenca; siendo este porcentaje menor en la cuenca M10 (3%). Esto se refleja en los valores del coeficiente de pendiente, el cual es ligeramente superior al 0,06 para todas las cuencas, siendo el mayor valor el de 0,09 para las cuencas M20 y M40. Nótese las cuencas altas (M10 y M20) donde las pendientes mayores al 30% abarcan más de la mitad de la cuenca - con un 69% y 54% respectivamente. En la cuenca S10 el área con un pendiente mayor al 30% presenta el 34% del área y para la parte baja menos del 17% en las tres cuencas - S20, M30 y M40, que presentan valores de 17% para la primera y 14% del área para las dos últimas.

Los resultados de las pruebas de infiltración así como el tipo de suelo donde se ubican se muestran en la Figura 24. Las pruebas de infiltración se determinaron en octubre de 2012 por parte del Área Funcional de Hidrogeología de la UEN Gestión Ambiental del AyA. Los valores de la Figura 24 corresponden a la infiltración básica (kfc) según la metodología Schosinsky-Losilla (2000), donde la velocidad de infiltración determinada por el método del doble anillo en el campo se convierte en la infiltración básica. De manera general el 69% de los valores supera el 0,75 y el 93% el 0,50; se evidencia además como este valor disminuye conforme se desciende en elevación sobre el nivel del mar, pasando de valores mayores al 0,95 en la parte alta, entre 0,80 y 0,95 para la parte media y entre 0,50 y 0,75 en la parte baja.

La Figura 24 evidencia una predominancia de los suelos Aguacate y Esparza – Orotina; donde el primero abarca gran parte de la parte alta de la cuenca del río Machuca. La totalidad de la cuenca M10, el 95% de la cuenca S10 y el 84% de la cuenca M20 corresponden al suelo del tipo Aguacate, mientras, el tipo de suelo Esparza – Orotina representa el 78% de la cuenca S20, 88% de la cuenca M30 y 97% de la cuenca M40;

siendo este último el único que cuenta con suelos del tipo Tárcoles (3%) y que no cuenta con suelos del tipo Aguacate.

Los resultados de los balances para las cuencas de los puntos M10, M20 y S10 se presentan en las Figura 25, Figura 27, Figura 26 y Figura 27 respectivamente, en las que los caudales aforados máximos y mínimos se muestran en líneas rojas punteadas, el primer y tercer cuartil en línea de guiones amarillos y el caudal medio aforado en línea azul; los caudales obtenidos del modelo hídrico mensual se representan con una línea verde continua. Ambas imágenes representan los mismos valores. La diferencia entre las imágenes de la izquierda y las de la derecha yace en que el eje vertical está en escala logarítmica en la imagen de la derecha y en escala lineal en el de la izquierda.

En general, se logró modelar bien el comportamiento al final del estiaje, especialmente con los valores del mes de abril, pero no fue así al principio de esa época, con valores de escorrentía del doble de lo aforado en promedio, pero siempre menores que los máximos aforados, conforme avanzan los meses de enero, febrero y marzo, esta diferencia se reduce considerablemente, hasta alcanzar diferencias menores a un milímetro en abril. Este comportamiento se debe a la curva de recesión del modelo es lineal y no el logarítmico, como ocurre en la realidad. Esta es una de las limitantes del modelo.

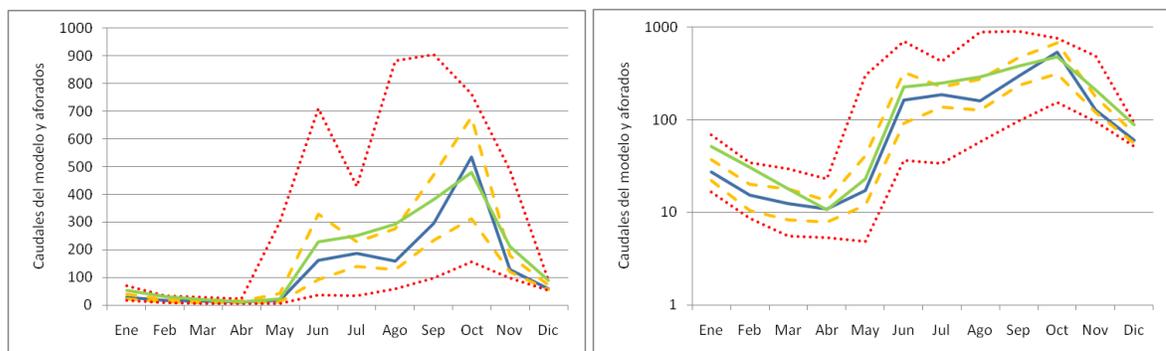


Figura 25. Calibración de las láminas de escorrentía modeladas y aforadas en M10.

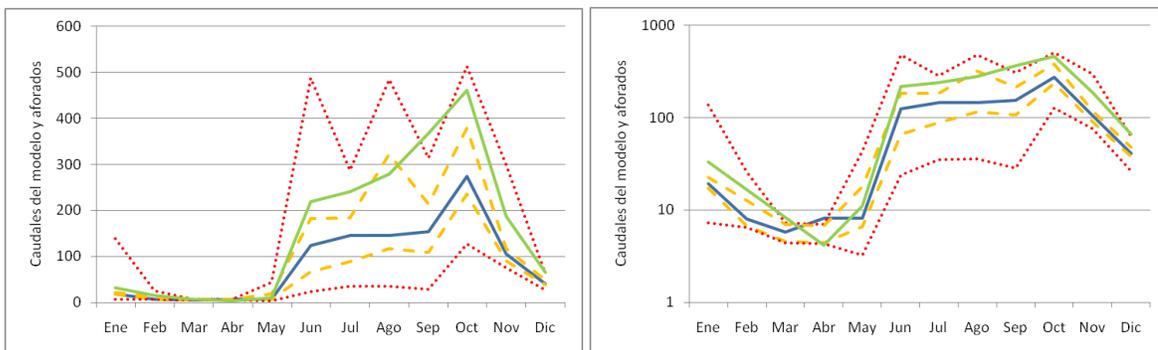


Figura 26. Calibración de las láminas de escorrentía modeladas y aforadas en M20.

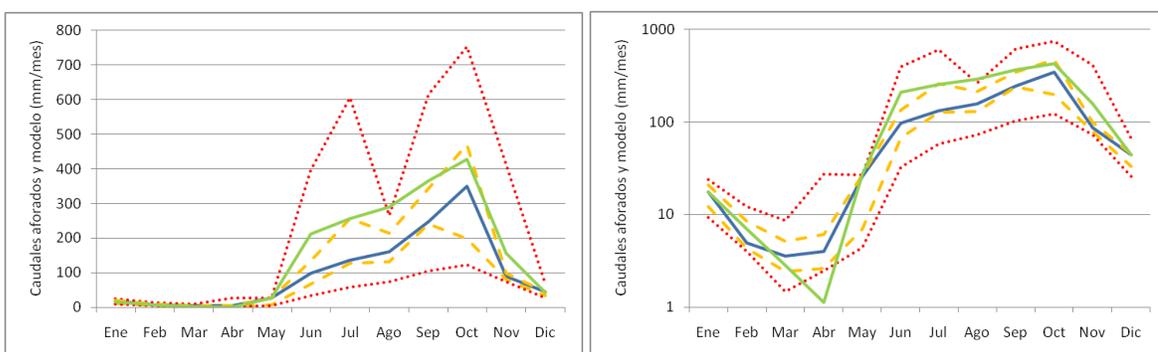


Figura 27. Calibración de las láminas de escorrentía modeladas y aforadas en S10.

De los tres modelos, el del punto M10 (Figura 25) representa mejor el comportamiento del estiaje. Especialmente el cambio entre los periodos seco y lluvioso (abril, mayo y junio). A pesar que se logra modelar el comportamiento de la época lluviosa en el modelo de la cuenca M20 este es casi del doble – del modelo respecto del aforado – pero igualmente menor a los valores máximos aforados. De nuevo es importante rescatar que el registro histórico de aforos de época lluviosa es más escaso y no es tan importante como el del estiaje para el propietario de la base de datos. Por lo tanto, se consideran válidos los resultados del modelo.

El Cuadro 16 presenta los principales resultados de los modelos; nótese la diferencia entre la escorrentía de modelo y la escorrentía aforada en las últimas dos

columnas, siendo la escorrentía modelada casi del doble de lo aforado en las cuencas M20 y S10, y una cuarta parte mayor en la cuenca M10. Esta diferencia es del orden de los 456 mm/año (12%) para la cuenca M10 y 636 mm/año (21%) para la cuenca S10, correspondiendo estas a la parte alta de la cuenca. La cuenca M20 presenta una diferencia de 859 mm/año (29%) para la cuenca M20. Estas diferencias son notablemente menores a las del balance hídrico anual.

Cuadro 16. Resultados anuales del balance hídrico mensual, en mm/año.

Cuenca	Precipitación (mm/año)	Precipitación efectiva (mm/año)	Evapotranspiración potencial (mm/año)	Evapotranspiración real (mm/año)	Percolación (mm/año)	Escorrentía modelo (mm/año)	Escorrentía aforada (mm/año)
M10	3756	3302	1515	1242	1030	2060	1604
M20	3579	3146	1571	1250	948	1897	1038
M30	3439	3023	1613	1165	929	1858	--
S10	3748	2996	1577	1187	905	1810	1174
S20	3606	3172	1616	1276	948	1895	--
M40	3296	2898	1639	1275	1298	1623	--

Los valores de percolación o recarga potencial son del orden de los 1000 mm/año, el cual representa casi un 50% de la escorrentía. El método Thornthwaite-Mather modificado modela un sistema cerrado, donde no hay salidas, y por lo tanto, todo el agua que percola deberá escurrir en algún momento como flujo base. En este modelo, la mayor recarga potencial se da en la cuenca M40 - del orden del 30% - lo cual es coincidente con la Figura 21 donde el aporte de la cuenca M40 es el tercero en magnitud, del orden de los 4,3 mm/mes, mientras que el menor valor de la recarga potencial se da en la cuenca S10 el cual es también coincide con los resultados de la Campaña 2013.

Se considera que con el registro histórico de aforos – que a partir de un aforo puntual buscan representar todo un mes – se puede calibrar bien la curva de recesión del río, y modelar y calibrar la época de estiaje de las cuencas generadas desde los puntos de aforo, pero estos valores no son tan representativos de la época lluviosa. El registro histórico cuenta en general con menos datos en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, y es más robusto en los meses de febrero y marzo

2.6. Balance hídrico de suelo

El balance hídrico de suelos se desarrolla siguiendo la metodología propuesta por Schosinsky (2006) con los mismos parámetros de entrada que los utilizados en el método Thornthwaite-Mather (1957): precipitación, evapotranspiración potencial, uso del suelo y pendientes. Además de los valores de entrada previamente mencionados, el Cuadro 17 presenta los principales resultados anuales del balance hídrico de suelos, como son la precipitación que infiltra, la evapotranspiración real y la recarga potencial del balance hídrico de suelos, la cual debería ser coincidente con la percolación de modelo Thornthwaite-Mather (1957).

Cuadro 17. Resultados del balance hídrico de suelos, en mm/año.

Cuenca	Precipitación media mensual (mm/año)	Precipitación que infiltra (mm/año)	Evapotranspiración potencial (mm/año)	Evapotranspiración real (mm/año)	Recarga potencial (mm/año)
M10	3756	3298	1515	1119	2179
M20	3579	3142	1571	1147	1995
M30	3439	3018	1613	1167	1852
S10	3748	3292	1577	1157	2136
S20	3606	3167	1616	1175	1992
M40	3296	2893	1639	1176	1717

La percolación en el balance hídrico mensual – método Thornthwaite-Mather (1957) – equivale a la recarga potencial en el balance hídrico de suelos – método Schosinsky (2006); la percolación del balance hídrico, la recarga potencial del balance de suelos y la diferencia entre estas y así como el porcentaje que esta diferencia se muestra en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Comparación de los resultados del balance hídrico (Thornthwaite-Mather) y del balance hídrico de suelos (Schosinsky), en mm/año.

Cuenca	Recarga potencial (mm/año)		Diferencia	Porcentaje
	Thornthwaite-Mather	Schosinsky		
M10	1030	2179	-1149	-35,8%
M20	948	1995	-1047	-35,6%
M30	929	1852	-923	-33,2%
S10	905	2136	-1231	-40,5%
S20	948	1992	-1044	-35,5%
M40	1298	1717	-419	-13,9%

Como se observa en el Cuadro 18 en general para toda la cuenca del río Machuca, la recarga potencial se estima mayor a partir de los cálculos efectuados por medio del balance hídrico de suelos planteado por Schosinsky (2006), del orden del 30% respecto al promedio de ambos. Es importante rescatar que las menores diferencias se observan en las cuenca baja – M40. Está gran diferencia se debe en parte a que el balance hídrico de suelos estima que toda el agua que alcanza el suelo se infiltra, lo cual no es cierto, debido a que de ser cierto, no habría crecidas.

La recarga potencial se estima del orden de los 1000 mm/año en toda la cuenca del río Machuca, siendo la cuenca M40 la que mayor valor presentó, del orden de los 1300 mm/año por medio del método de Thornthwaite-Mather modificado. La recarga potencial calculada por el método de Schosinsky es del doble que la anterior. Esto se debe a los valores del coeficiente de escorrentía usados los cuales en todos los casos

representan la unidad. Esto quiere decir – según el método Schosinsky – que toda la precipitación efectiva que alcanza el suelo se infiltra, y por lo tanto no habría escorrentía superficial en los cauces.

Además de contar con un escenario de precipitación mayor en un 10% al promedio del registro total de las estaciones y no contar con un registro adecuado de caudales en la época lluviosa, se estima que igual se modela una escorrentía muy superior a lo que realmente escurre. Esto último – y el hecho de que en la zona no se conocen pozos con un alto potencial para ser explotados – hace suponer que existe una percolación profunda a un acuífero regional, que aún no ha sido explorado.

3. Hidrogeoquímica

Durante la campaña de aforos 2013 se muestrearon las aguas de los ríos para caracterizarlas químicamente. En la caracterización química de las aguas se midió la conductividad eléctrica y se determinó la concentración de varios iones mayores (calcio Ca^{2+} , magnesio Mg^{2+} , bicarbonato HCO_3^- , sulfato SO_4^{2-} , cloruro Cl^- y nitrato NO_3^-). En esta caracterización no fue posible realizar el análisis para determinar ni la concentración del ión sodio (Na^+) ni la del ión potasio (K^+) en las muestras de agua por parte del Laboratorio Nacional de Aguas del AyA.

Los valores de la conductividad y de los iones determinados en la Campaña 2013 se muestran en el Cuadro 19. Al encontrarse secas las dos cuencas del río Paires, no fue posible caracterizar las aguas de la misma; por el contrario, se cuenta con dos resultados para los puntos M40 y J40, debido a que estos se aforaron y muestrearon los dos días que duró la campaña 2013.

Cuadro 19. Conductividad eléctrica e iones en los puntos de la campaña 2013 sobre las cuencas de los ríos Machuca y Jesús María.

Punto	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cloruros mg/L	Sulfatos mg/L	Bicarbonato mg/L	Calcio mg/L	Magnesio mg/L	Carbonato mg/L
M10	1002	125	188	161	153	13	0
M20	607	49	158	106	74	9	0
M30	483	36	102	121	51	10	0
S10	93	1	8	61	15	2	0
S20	433	58	53	128	28	8	0
M40	353	22	49	146	39	11	0
M40	349	20	47	141	48	6	0
J10	284	1	100	76	46	6	0
J20	302	1	112	80	50	6	0
J30	312	2	90	104	46	11	0
J40	265	2,4	45	135	40	8	0
J40	267	2,4	42	130	39	7	0

En el Cuadro 19 se muestra como los valores de la conductividad disminuyen en el río Machuca conforme este desciende hacia el mar, con valores del orden de: $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ en la cuenca M10, $600 \mu\text{S}/\text{cm}$ en la cuenca M20 y $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ en la cuenca M30; presentando estas valores de la misma magnitud que la cuenca S20, la cuales están al lado una de la otra. Esta última no tiene relación con la cuenca aguas arriba, la S10, con un valor de conductividad eléctrica de los $93 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Para el río Jesús María la conductividad permanece alrededor de los $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ para todas las cuencas, aunque está aumenta conforme va descendiendo de la cuenca J10 a la J20 y a la J30, y luego disminuye hasta alcanzar un valor menor a la cuenca J10 en la cuenca J40. Esta alta conductividad presente en la parte alta del río Machuca se comporta como un indicador natural. Además de los datos de la campaña se cuenta con los valores del potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica de los pozos y nacientes que opera el AyA en la cuenca del río Machuca los cuales se muestran en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Conductividad y potencial de hidrogeno promedio para los pozos y nacientes en la cuenca del río Machuca operados por el AyA.

Sistema	Fuente	Número de datos	pH	Conductividad (μS/cm)
Jesús María	Naciente 1	1	4,7	21
	Naciente 2	1	4,1	44
	Naciente 3	1	4,2	31
	Mezcla de Nacientes	39	6,7	68
	Pozo 1	26	7,0	258
	Pozo 2	29	7,1	192
Línea de Ojo de Agua	Pozo Cascajal	20	7,6	283
	Pozo Ceiba 1	17	6,8	271
	Pozo Ceiba 2	23	6,9	279
	Pozo IDA 1	22	6,8	239
	Pozo IDA 2	9	6,8	333
	Pozo INCOP 1	5	7,5	698
	Pozo INCOP 2	5	7,4	685
	Pozo Quintas Enricón 1	23	6,9	176
	Pozo Quintas Enricón 2	21	7,1	154
	Pozo Quintas Enricón 3	20	7,0	156
Pozo Villa Nueva	44	7,3	974	
San Mateo	Pozo Oficina San Mateo	1	6,5	281
	Pozo Planta tratamiento	12	5,8	61

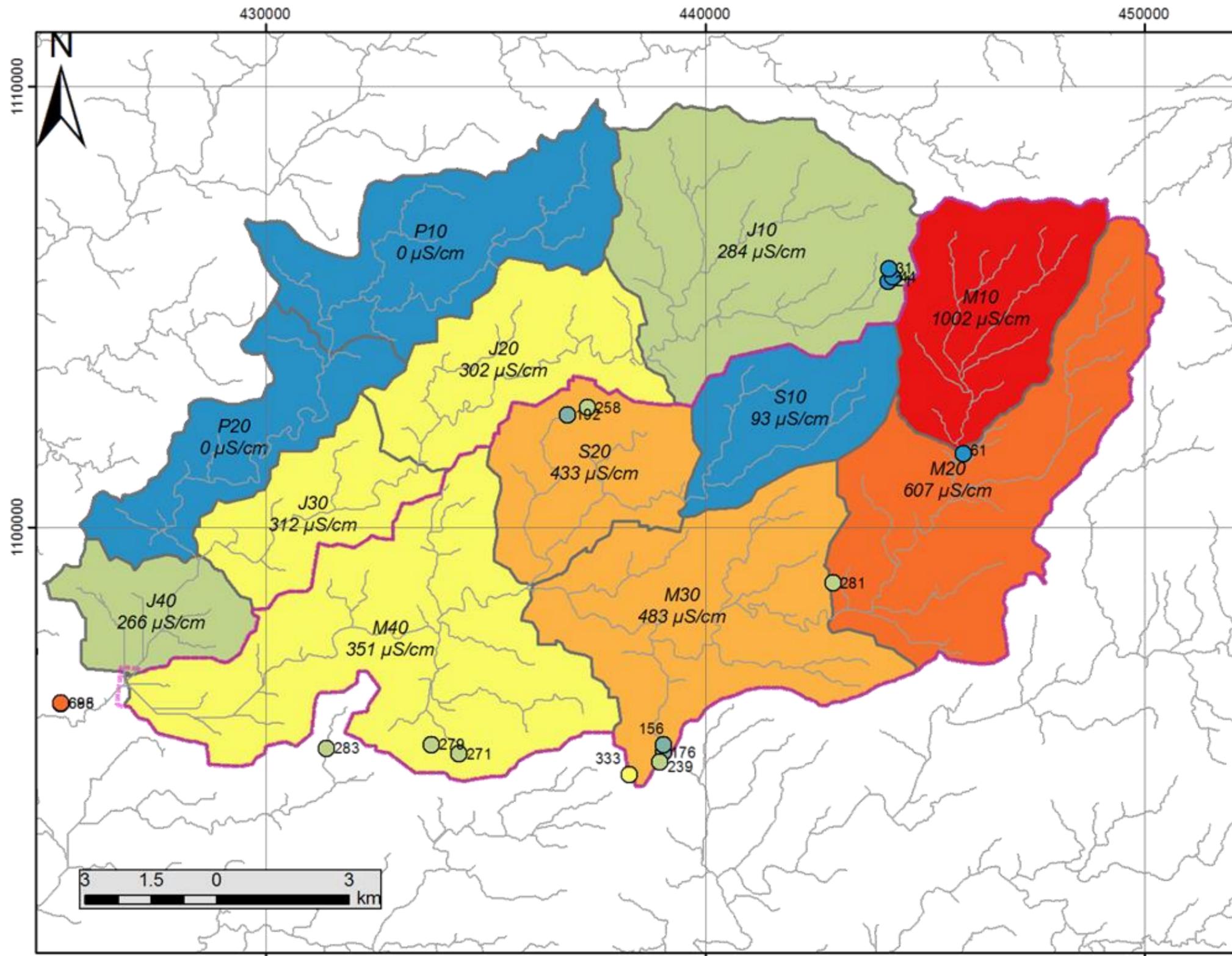
Los datos del Cuadro 20 se obtienen de la base de datos del LNA de la Región Pacífico Central del AyA la cual cuenta con un registro de diez años - desde el 2004. La mediana de los valores del pH y la conductividad en la base de datos así como el número de registros con se cuentan; las fuentes se agrupan por sistema de abastecimiento y ubicación – separados por líneas. Los nombres con número se refieren a fuentes de un mismo campo de pozos o nacientes.

Nótese los valores de la conductividad eléctrica en los pozos del sistema de abastecimiento Línea de Ojo de Agua – entre la unión de las cuencas M30 y S20 y la cuenca M40, los cuales tienen valores de conductividad entre los 150 μS/cm y 300 μS/cm

– con excepción de los pozos INCOP, cercanos a la costa - , los cuales rondan los valores que se esperan en el sistema acuífero que diluye la alta conductividad procedente de la cuenca M10; específicamente para pasar del orden de los 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la confluencia de los ríos Machuca y Surubres a 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la confluencia del río Machuca y Jesús María. Además, en la parte alta de la cuenca del río Machuca existe un afluente o fuente que se convierte en un indicador o trazador de origen natural, al presentan una conductividad eléctrica del orden de los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y con concentraciones de iones altas, del tipo cloruro bicarbonatadas cálcicas. Tanto estas aguas como las de las tres nacientes Jesús María se encuentran en el Grupo Aguacate.

La Figura 28 muestra espacialmente las conductividades de las aguas superficiales - Cuadro 19 - y las de las aguas de los pozos y nacientes - Cuadro 20 -; donde se evidencia como las aguas de la parte alta del río Machuca no guarda relación con las presentes en los pozos del sistema San Mateo. Por el contrario, las aguas del cauce principal del río Machuca se van diluyendo conforme desciende hacia el mar, y esta dilución podría ser aportada por el mismo acuífero que alimenta a los pozos de los sistemas Jesús María y Línea de Ojo de Agua (Enricón, IDA, Ceiba y Cascajal). Las aguas de las tres nacientes Jesús María si guardan relación con las de la cuenca S10, a pesar de no estar dentro de la cuenca, si están cerca. La unión de las tres nacientes no se considera representativa puesto que se muestrea después de un tanque de contacto para regular el pH de estas aguas.

El acumulado de los miliequivalentes de los otros cationes que no se determinaron ($\text{Na}+\text{K}$ – principalmente) se estima por medio del balance de electroneutralidad. Para la construcción de los gráficos que se presentan a continuación se asume que el balance eléctrico es de un 0%, donde la suma de cationes y aniones sería cero. Es evidente que se perdió la opción de juzgar la calidad del análisis.



Cuenca del Río Machuca Conductividad eléctrica

Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial en la cuenca del río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica

Fuentes:
LNA -AyA
PRCR 2010 - MH

Simbología

Historicos LNA	Campaña_2013
CE (uS/cm)	CE (uS/cm)
● 0 - 100	● 0 - 100
● 101 - 200	● 201 - 300
● 201 - 300	● 301 - 400
● 301 - 400	● 401 - 500
● 501 - 750	● 501 - 750
● 751 - 1000	● 751 - 1002
○ C. río Machuca	

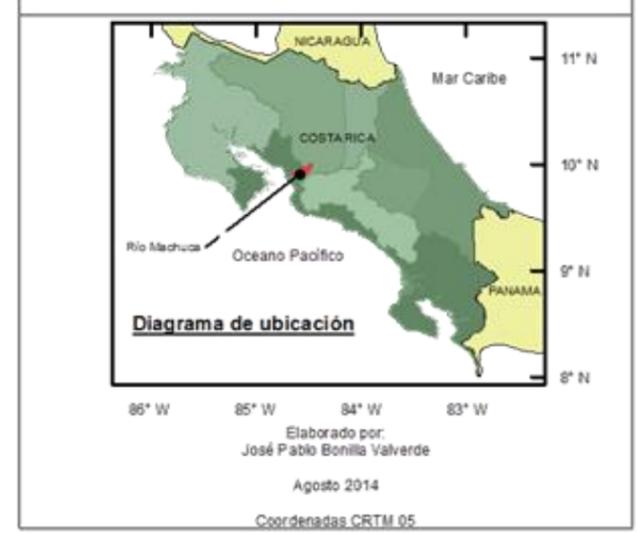


Figura 28. Conductividad eléctrica en las fuentes operadas por el AyA y los medidos en la Campaña de aforos del 2013.

Como los puntos J40 y M40 se aforaron los dos días de la campaña para poder ligar los datos de caudal de los distintos días, también se muestreo el mismo punto en dos días distintos; por esto estos se marcan con una línea gris en el Cuadro 19 y se presentan en la Figura 29, donde la concentración en meq/l se muestra en un diagrama de barras para los diez puntos muestreados durante la campaña 2013.

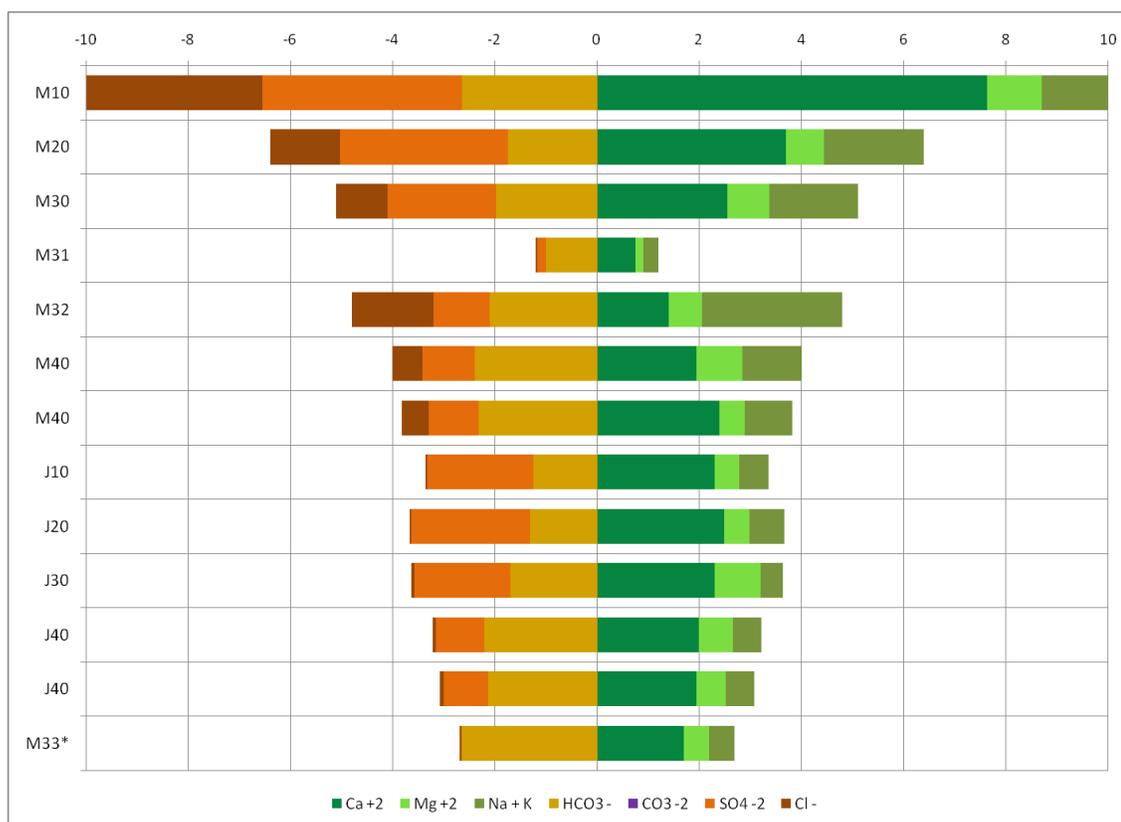


Figura 29. Diagrama de barras para la caracterización química del agua superficial de la cuenca hidrográfica Jesús María, en miliequivalentes por litro

En la Figura 29 se observa que la concentración en las muestras de agua de la parte alta de la cuenca del río Machuca (M10) es mucho mayor que en las muestras de la parte baja, para todos los iones y se observa una tendencia a la dilución conforme se avanza aguas abajo debido al aporte de volumen de los afluentes distintos del río – que se estima es el aporte de un sistema acuífero presentes en la cuenca del río Machuca, lo cual

es congruente con el análisis de la conductividad eléctrica. En la cuenca M10 existe una quebrada que se conoce como la Quebrada Agria, la cual probablemente aporte la mayor carga iónica al resto de las aguas. Entre las cuencas M10, M20 y M30 se reducen las concentraciones de los iones cloro y calcio, principalmente. El punto M33* corresponde a una naciente que se identifica cerca del punto M30, esta no guarda relación con las aguas del río Machuca, pero podría ser un agente de dilución.

El río Surubres presenta un comportamiento distinto a la cuenca principal del río Machuca, donde su concentración aumenta conforme avanza hacia el río Machuca. En la confluencia con el cauce principal del río Machuca, las concentraciones de los iones son muy parecidas para ambos ríos, al igual que el valor de la conductividad, con excepción del calcio y el sodio y potasio; siendo estos dos últimos valores estimados. La Figura 30, Figura 31 y Figura 32 presenta la concentración de los iones para los distintos puntos muestreados en los ríos Machuca, Surubres y Jesús María, respectivamente.

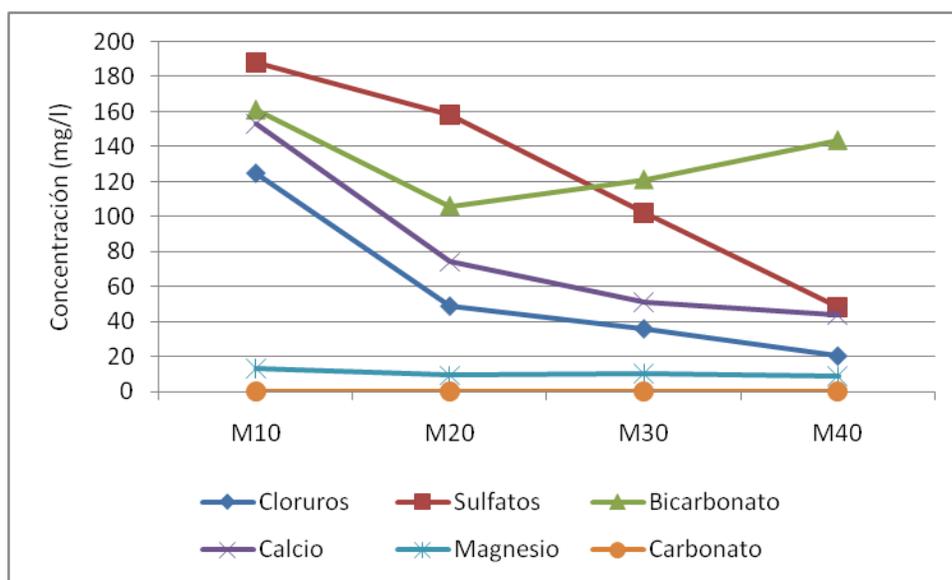


Figura 30. Diagrama con la concentración para los iones determinados en la Campaña 2013 para el cauce principal del río Machuca

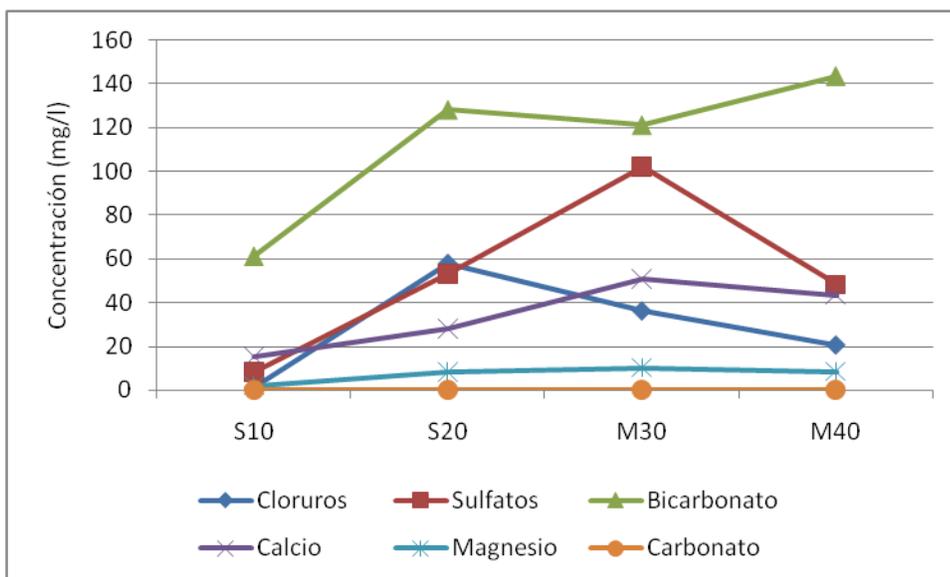


Figura 31. Diagrama con la concentración para los iones determinados en la Campaña 2013 para el cauce del río Surubres (S10 y S20) y el río Machuca.

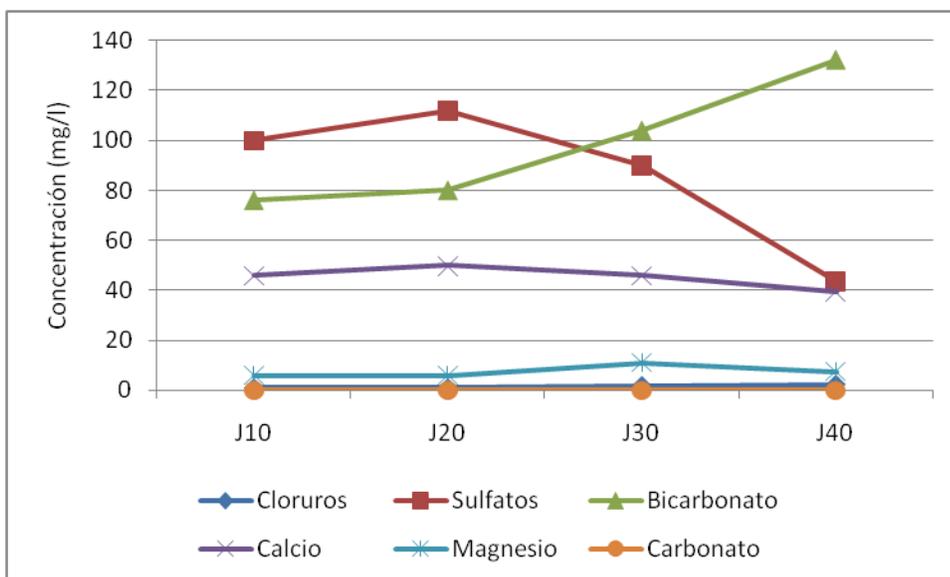


Figura 32. Diagrama con la concentración para los iones determinados en la Campaña 2013 para el cauce principal del río Jesús María.

Las aguas del río Jesús María son sulfatadas cálcicas en la parte alta, y conforme descenden aguas abajo se van convirtiendo a sulfatadas carbonatadas cálcicas. Lo mismo

ocurre con las aguas del río Machuca, solo que éstas son ligeramente menos cálcicas, donde la concentración de iones y la conductividad en el río Machuca disminuye conforme va recibiendo aportes del sistema acuífero presente en la zona, por lo tanto el agua se va diluyendo conforme avanza hacia el mar. Especialmente entre la parte alta antes de la toma y a la altura del puente entre San Mateo y Orotina donde todas las concentraciones se reducen casi a la mitad. Antes de la unión de los ríos Machuca y Surubres, la concentración disminuye casi una cuarta parte. Tanto el río Surubres como el Machuca presentan una conductividad similar antes de la confluencia. También se aprecia como aumenta casi cinco veces la conductividad en el río Surubres.

En las aguas de la cuenca del río Jesús María se observa que la concentración en meq/l de la suma de los aniones se mantiene casi constante a lo largo del cauce. Se evidencia que aumenta el contenido de bicarbonato y se reduce el de sulfato conforme desciende el flujo de agua a lo largo de la cuenca hasta el mar. El contenido de ión calcio disminuye en los cationes. La disminución en el caudal del río Jesús María y el contenido casi constante de la suma aniones en miliequivalentes por litro parecen indicar que en la cuenca del río Jesús María no hay aporte de acuíferos, sino una interacción entre el acuífero del lecho del río y el agua superficial; para asegurar esto se debe caracterizar el sistemas acuífero.

A partir de la información de la base de datos del LNA se obtienen las medianas de los valores de conductividad de las fuentes del AyA. Respecto a la conductividad, las aguas del río Surubres es similar a la de las nacientes del Jesús María, a pesar de estar en otra cuenca. Cerca de la confluencia con el río Machuca, las aguas del río Surubres guardan más similitud con las aguas del río Machuca cerca de la confluencia que con las aguas que provienen del primer punto de muestreo sobre el río Surubres. Todas las aguas de los pozos alrededor de las cuencas S20, M30 y M40 presentan conductividades menores a las determinadas en las aguas muestreadas en la Campaña 2013.

Se cuenta con un indicador de origen natural en la cuenca del río Machuca (M10) el cual no está identificado, pero existe, debido a que la conductividad en la toma es del orden de los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se evidencia como debe existir un sistema acuífero con menor concentración que está aportando agua al río Machuca a lo largo de su cauce principal, por lo que la concentración disminuye a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la cuenca M20 y luego disminuye de nuevo a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la cuenca M30.

4. *Proyecciones de población*

Para estimar el desarrollo y el crecimiento de la población se recurre a diversos métodos, entre ellos los métodos de comparación gráfica, los numéricos, los estadísticos y los de los componentes del cambio demográfico. Se desarrollan varios modelos en los siguientes apartados y se comparan sus resultados para determinar cuál de ellos es que mejor representa el crecimiento poblacional estimado en la zona de estudio, así como el requerimiento de agua de dicha población.

Es importante resaltar, de nuevo, que las proyecciones de población son estimaciones con límites de confianza claros. El comportamiento de las poblaciones es difícil de predecir porque son multifactoriales y muchos de esos factores son difíciles de medir y deben ser estimados. Para proyectar las necesidades de agua potables de una población en el futuro, lo más recomendable es sobrestimar la población. Esta situación es contraria a otros usos de las proyecciones poblacionales, por ejemplo al proyectar los ingresos de una institución, en los que lo conveniente es ser cauteloso y subestimar la población.

Conforme se alejan las proyecciones del censo de origen, aumenta la incertidumbre de los resultados. Para efectos de esta investigación se realizan proyecciones a casi treinta años, hasta el año 2040 y se decidió descartar del análisis al

distrito de San Rafael del cantón de San Ramón – a pesar de formar parte de la cuenca del río Machuca – pues se encuentra en la parte alta de la cuenca, donde más del 90% del terreno tiene una pendiente que supera el 45% y por lo tanto los suelos es mejor conservarlos como bosques, según el Reglamento.

4.1. Comparación gráfica

En el método de la comparación gráfica se seleccionan zonas que hayan experimentado un desarrollo como el que se espera que se dé para él área de estudio. Para hacer la comparación, se han seleccionado cuatro cantones. Los tres primeros cantones han sido impactados por la construcción de una nueva ruta que los comunica con la capital, acortando significativamente el tiempo de viaje, conectando mejor sus territorios y propiciando un desarrollo urbanístico y un incremento demográfico paralelos. El cuarto cantón es uno que se ha visto afectado indirectamente por el desarrollo de los complejos turísticos, convirtiéndose en una “ciudad dormitorio” o satélite.

El primer caso corresponde a los cantones de San Ramón y de Palmares de la provincia de Alajuela en al occidente del Valle Central de Costa Rica. La carretera panamericana norte, también conocida como Ruta 1, se inauguró a principios de la década de los años 1970. El trayecto de la carretera va desde el parque central de San José hasta la frontera de Nicaragua en Peñas Blancas, al norte del país. Esta carretera acortó el tiempo de viaje de San José a San Ramón y Palmares de tres horas a una hora solamente. El cantón de San Ramón se ubica en la ladera norte de los montes del Aguacate, limita al sur con la zona de estudio, el río Machuca nace en uno de sus distritos y los otros tienen muchas características en común con la parte alta de la zona de estudio.

Similarmente, el cantón de Pococí en la provincia de Limón en la vertiente Caribe del país, puede servir de comparación. La carretera Braulio Carrillo, o ruta 32, se

construyó a mediados de la década de 1980, convirtiéndose en una de las últimas fronteras agrícolas del país. Antes de la construcción de la ruta 32, se demoraba más de seis horas para llegar a la ciudad de Guápiles, después de la inauguración de esta ruta, el tiempo de viaje se acortó a una hora. Esta zona no guarda tantas características en común con la zona de estudio.

El último cantón es Liberia, en la provincia de Guanacaste, cuya cabecera es la ciudad homónima. Este cantón – en general, toda la provincia de Guanacaste – ha sido fuertemente impactado por el desarrollo de grandes complejos turísticos que aprovechan la belleza escénica de sus paisajes. La provincia de Guanacaste ha sido la provincia que presenta una mayor Tasa Intercensal de Crecimiento (TIC) con un 1,8% mientras que el país se ha mantenido casi estable entre los censos del 2000 y 2011. El aumento demográfico en la ciudad de Liberia ha sido importante y la ciudad funciona como un gran dormitorio.

En la Figura 33 se muestran los datos de la población de los censos de 1950, 1973, 1984, 2000 y 2011 del INEC para los cantones de San Ramón, Palmares, Liberia y Pococí en líneas continuas y para los cantones de San Mateo y Orotina y la suma de ambos en líneas discontinuas. Nótese el crecimiento de la población en el cantón de Pococí, el cual se duplicó en menos de un cuarto de siglo, entre 1950 y 1973, luego se duplicó en los once años siguientes y, finalmente se triplicó entre 1984 y 2000.

Los cantones de Palmares y de San Ramón muestran un comportamiento parecido entre ellos pero con menores tasas para el cantón de Palmares; además, la población en cantón de San Ramón en 1973 es del orden de la de los cantones de San Mateo y Orotina, por lo que solo se utilizarán los valores del cantón de San Ramón. Por su parte, Liberia muestra un comportamiento parecido al de Orotina entre 1950 y 1984, cuando ambas ciudades eran el centro de una industria agropecuaria, pero con un repunte desde 1984

que se atenúa en el último censo. El cantón de San Mateo no ha presentado grandes alteraciones en su población y más bien presenta un crecimiento del tipo vegetativo.

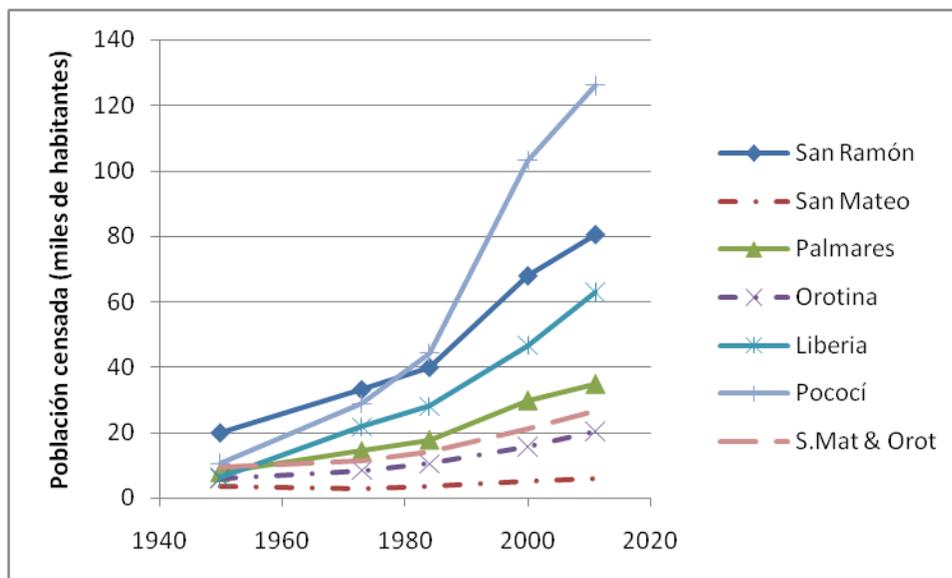


Figura 33. Población entre 1950 y 2011 para los cuatro cantones seleccionados para la comparación gráfica de Costa Rica según los censos nacionales.

Los cantones de Palmares y de San Ramón muestran un comportamiento parecido entre ellos pero con menores tasas para el cantón de Palmares; además, la población en cantón de San Ramón en 1973 es del orden de la de los cantones de San Mateo y Orotina, por lo que solo se utilizarán los valores del cantón de San Ramón. Por su parte, Liberia muestra un comportamiento parecido al de Orotina entre 1950 y 1984, cuando ambas ciudades eran el centro de una industria agropecuaria, pero con un repunte desde 1984 que se atenúa en el último censo. El cantón de San Mateo no ha presentado grandes alteraciones en su población y más bien presenta un crecimiento del tipo vegetativo.

La Figura 34 muestra las Tasas de Crecimiento Intercensales (TCI) de los periodos entre los censos, es decir 1950-1973, 1973-1984, 1984-2000 y 2000-2011 para los cantones de San Ramón, Palmares, Liberia, Pococí, San Mateo y Orotina. El crecimiento del cantón de Pococí también se evidencia en esta gráfica; presentando valores superiores

al 4% desde 1973 hasta el 2000 y disminuyendo en el periodo 2000-2011 a valores cercanos a los de los demás cantones. Todos los demás cantones presentan TCI del mismo orden, excepto San Mateo, el cual experimenta un descenso en su población entre los censos de 1950-1973.

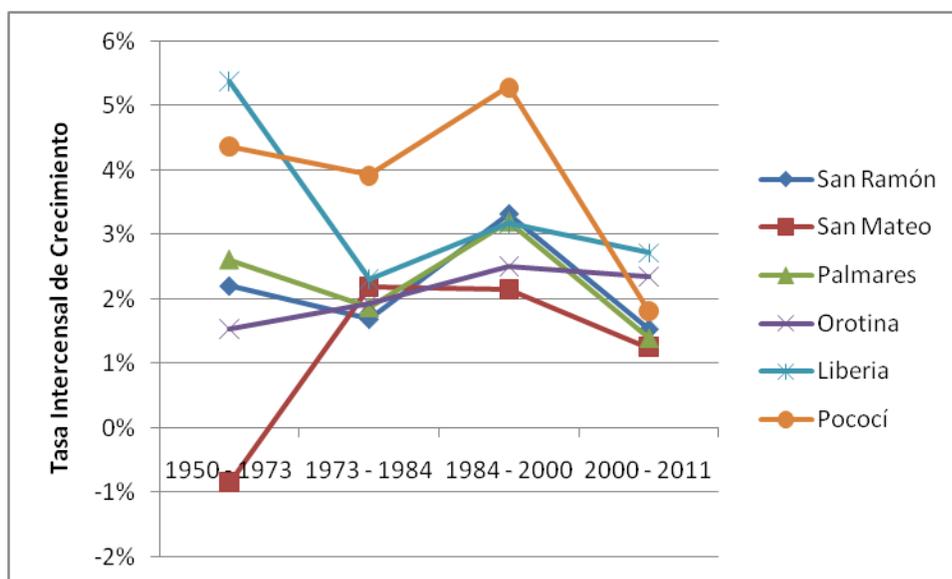


Figura 34. Tasa de Crecimiento Intercensal (TCI) en los cantones seleccionados para la comparación gráfica así como los del área de estudio.

Para estimar el crecimiento poblacional de los cantones de San Mateo y de Orotina debido a la influencia de la carretera San José – Caldera, se hace la comparación gráfica entre el crecimiento experimentado por San Ramón desde el censo de 1973 debido a la carretera Interamericana; entre el impacto de la carretera Braulio Carrillo desde el censo de 1984 en Pococí; y con el crecimiento de la última década en Liberia debido al desarrollo turístico. Cabe señalar que el método solo permite estimar la población por el periodo de con que se cuenta con datos, por lo tanto, para la comparación a partir de 1973 se tienen casi cuarenta años al 2011; por el contrario, para la comparación a partir del 2000 solo cuenta con un once años de datos.

De una población total actual los cantones de Orotina y San Mateo cercana a los veintiséis mil habitantes, se estima que en tres décadas pueda haber entre ochenta mil y cien mil en caso de que se experimente un crecimiento poblacional similar al del cantón de Pococí en la década de 1980. Este escenario de triplicado de la población en cuarenta años se considera poco probable. Los resultados se presentan en la Figura 35 y en el Cuadro 21, y nótese que en ambos no hay valores en algunos modelos pues el ámbito de los datos de los modelos no es de al menos cuarenta años para el modelo seleccionado como se ha mencionado.

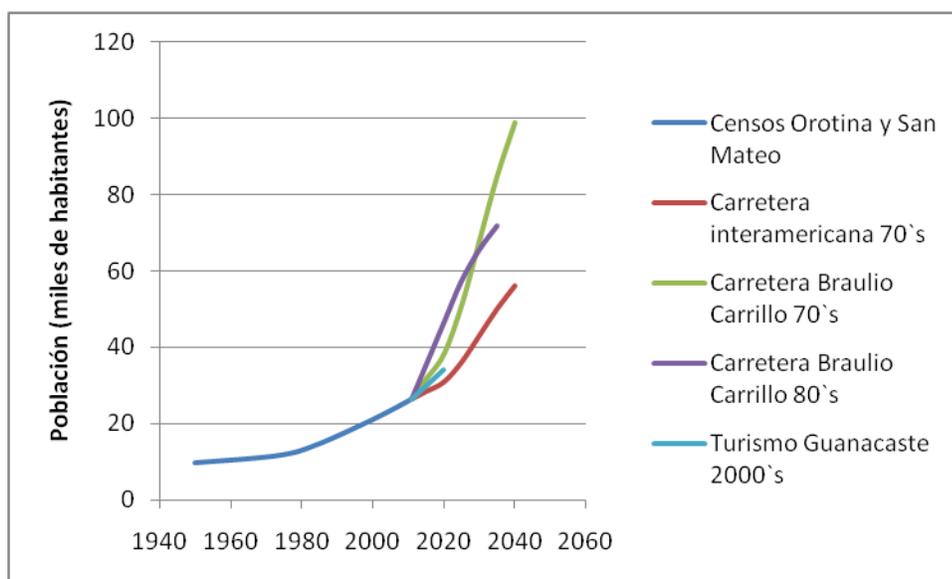


Figura 35. Proyección de la población en los cantones de San Mateo y Orotina a partir del método de Comparación Gráfica a partir de los censos de 1953 a 2011.

Cuadro 21. Proyecciones de población a partir del método de Comparación Gráfica

Punto	2011	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Carretera interamericana década 1970	26 477	28 454	30 925	36 108	43 099	50 089	56 112
Carretera Braulio Carrillo década 1970	26 477	31 679	38 181	50 980	67 977	84 975	99 006
Carretera Braulio Carrillo década 1980	26 477	35 305	46 341	57 376	65 523	71 744	--
Turismo Guanacaste década 2000	26 477	29 834	34 030	--	--	--	--

Se considera que el caso de San Ramón podría adecuarse mejor al crecimiento que va a experimentar la zona, pues se prevé que sea mayor el impacto de cercanía con el centro del país que el de ciudad satélite para un desarrollo turístico en la costa. El comportamiento de San Ramón es el más probable que experimente la zona de estudio por compartir más patrones en común (clima y cercanía a San José) con San Mateo y Orotina. Además, del poco atractivo de la costa por la cercanía a la desembocadura del río Tárcoles al sur, la ciudad de Puntarenas al oeste y que el polo turístico de Jaco al sur ya está consolidado. De crecer como el cantón de San Ramón, se espera que la población alcance los 31 000 habitantes para el año 2020, 43 000 mil para el 2030 y 56 000 mil para el 2040, lo que implica que la población aumente un poco más que al doble en 30 años.

4.2. Tendencias censales

A partir de la información de los censos del 2000 y 2011 del INEC se construyen los modelos que siguen la tendencia que la población ha experimentado en el pasado, partiendo del cambio entre los últimos dos censos para cada uno de los distritos de los cantones de San Mateo y de Orotina. En el Cuadro 22 se presentan el Crecimiento Anual (CA), la Tasa de Crecimiento Anual (TCA) y la Tasa de Crecimiento Intercensal (TCI) para cada uno de los distritos, para cada uno de los cantones y para ambos. El CA representa el crecimiento entre censos dividido por el periodo entre censos, la TCA representa el porcentaje del CA entre la población inicial y la TCI representa la TCA en función logarítmica. Para una mejor comprensión de estos conceptos se recomienda revisar el documento del INEC (2012).

Cuadro 22. Tasas de crecimiento para los distritos de San Mateo y Orotina.

Cantón	Distrito	Crecimiento Anual (CA) habitantes/año	Tasa Crecimiento Anual (TCA)	Tasa Crecimiento Intercensal (TCI)
San Mateo	San Mateo	15	5,7	0,57
	Desmonte	16	16,7	1,67
	Jesús María	41	19,0	1,91
Orotina	Orotina	147	16,6	1,67
	El Mastate	18	10,4	1,04
	Hacienda Vieja	12	12,6	1,26
	Coyolar	207	43,3	4,42
	La Ceiba	37	21,8	2,19
Acumulado	Cantón San Mateo	72	12,6	1,26
	Cantón Orotina	421	23,4	2,35
	Ambos cantones	494	20,8	2,09

Con estos datos se construyen las proyecciones a partir del CA y de la TCI, las cuales corresponden a las constantes de los modelos lineales y logarítmicos, los cuales son completamente opacados por las tendencias de los distritos de Orotina y Coyolar, que son muy grandes con respecto a los demás, entre tres y cuatro veces y con una tasa de crecimiento muy abrupta para el último. Los resultados para cada cantón, y para la unión de ambos, para cada uno de los métodos se muestran en el Cuadro 23 y en la Figura 36.

Cuadro 23. Proyecciones de la población a partir del método de tendencia censal.

Cantón	2011	2015	2020	2025	2030	2035	2040
San Mateo TCA	6136	6424	6785	7145	7506	7866	8227
Orotina TCA	20 341	22 027	24 134	26 241	28 349	30 456	32 563
Ambos TCA	26 477	28 451	30 919	33 387	35 854	38 322	40 790
San Mateo TCI	6136	6461	6897	7369	7882	8439	9044
Orotina TCI	20 341	22 457	25 513	29 118	33 387	38 465	44 532
Ambos TCI	26 477	28 917	32 410	36 487	41 269	46 905	53 576

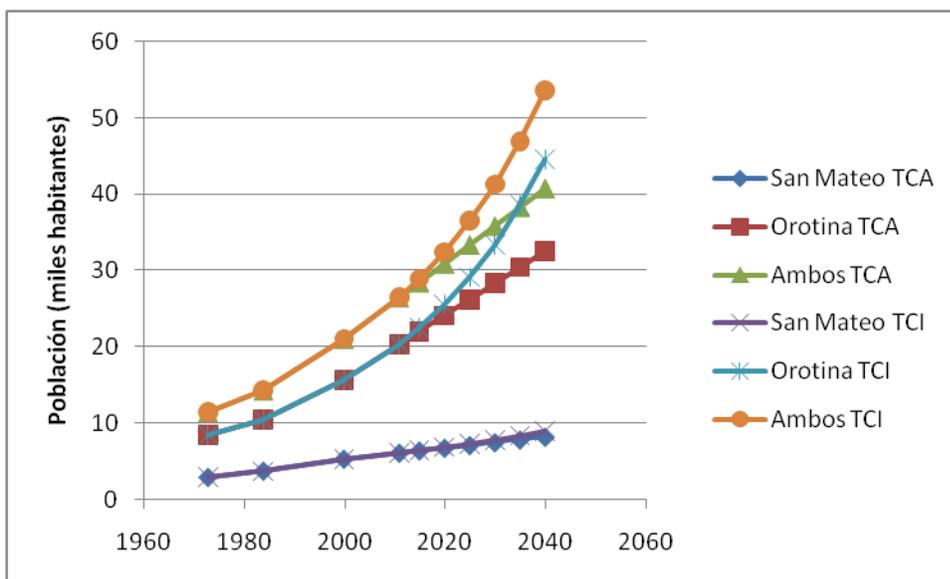


Figura 36. Proyección de la población en los cantones de San Mateo y de Orotina a partir del método de tendencia censal.

Actualmente el cantón de San Mateo representa una cuarta parte de la población total y Orotina el resto, de mantenerse la tendencia entre los censos del 2000 y del 2011 se espera que crezca más el cantón de Orotina, un 50% en el caso de mantener un comportamiento lineal, superando los 40 000 mil habitantes y se duplicaría en el caso de presentar un comportamiento exponencial a 53 000 mil habitantes. Todas las tendencias son menores que los modelos generados a partir de la comparación gráfica.

4.3. Componentes demográficos

En Costa Rica actualmente se presenta un aumento en la esperanza de vida al nacer y en la esperanza de vida a la edad de 60 años, mientras que la tasa de fecundidad ha descendido hasta alcanzar un valor de 1,9 hijos por mujer en el 2010 de manera generalizada. Estos dos fenómenos hacen que la tendencia sea hacia una estabilización de la población local, pero esta se compensa con la migración (positiva o negativa) de la población.

Cuadro 24. Nacimientos, defunciones y tasas netas de crecimiento para los distritos de San Mateo y Orotina para el año 2013.

Cantón	Nombre	Nacimientos	Defunciones	Tasa Neta Crecimiento
San Mateo	San Mateo	25	15	10
	Desmonte	5	2	3
	Jesús María y Labrador	22	15	7
Orotina	Orotina	154	57	97
	El Mastate	36	11	25
	Hacienda Vieja	11	6	5
	Coyolar	93	20	73
	La Ceiba	24	11	13
Cantones	San Mateo	52	32	20
	Orotina	318	105	213
	Ambos	370	137	233

Tanto las tasas de nacimiento, de defunción y de migración se obtienen a partir del censo 2011 del INEC. A partir de las tasas de nacimientos y de defunción se obtiene la Tasa Neta de Crecimiento (TNC). El Cuadro 24 presenta los resultados, en este se incluye el distrito de Labrador el cual se mezcla con el de Jesús María para ser coincidentes con la información del censo 2011. Se observa la diferencia en el crecimiento que han experimentado los cantones de San Mateo y de Orotina, la cual es más de tres veces. Además es notoria una mayor Tasa de Crecimiento (TC) en los distritos de Mastate, Coyolar y Orotina, respectivamente, la cual es casi del doble que las TC del resto de los distritos.

Los indicadores de migración solo se encuentran para el cantón en el censo del 2011. La Tasa de Migración Neta (TMN) es de 10,23 migrantes por cada mil habitantes para el cantón de San Mateo y 10,53 para el cantón de Orotina. La TMN promedio para el país es de 2,69 migrantes por cada mil habitantes. Las mayores TMN nacionales son 19,57 para el cantón de San Pablo, 15,53 para el cantón de Mora y 12,7 para el de Santa Ana.

Los dos últimos cantones han sido impactados por la apertura de la ruta 27 (carretera San José – Caldera).

A partir de estos datos se elaboran cinco escenarios para cada uno de los distritos, en los que se combinan las TCN de cada distrito con distintas TMN que ha experimentado el país; las cuales son las TMN media del país y las de los cantones de Orotina, Santa Ana, Mora y San Pablo. En todos los escenarios se considera que el crecimiento de los distritos de Desmonte y Hacienda Vieja se comportarán como el país; con su propia TCN y la TMN promedio del país. Esto debido a las altas pendientes presentes en estos distritos (lo mismo ocurre con el distrito de San Rafael de San Ramón, que fue excluido del análisis).

El **primer escenario** solo considera el crecimiento a partir de la TCN de cada distrito y la TMN del país para todos los distritos. El **segundo escenario** utiliza la TMN del país para los distritos de Desmonte y Hacienda Vieja y la TMN de Orotina para el resto de los distritos. El **tercer escenario** es similar al segundo, solo se cambia la TMN de Mora para la del distrito de Coyolar. El **cuarto escenario** se crea a partir de la TMN de Mora para todos los distritos. En último lugar, el **quinto escenario** considera una migración igual a la del cantón de San Pablo. El Cuadro 25 presenta un resumen de la construcción de los escenarios y los resultados se presentan en la Figura 37 y en el Cuadro 26.

Cuadro 25. Resumen TMN utilizadas en los escenarios componentes demográficos.

Cantón	Distrito	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
San Mateo	San Mateo	País	Orotina	Orotina	Mora	San Pablo
	Desmonte	País	País	País	País	País
	Jesús María	País	Orotina	Orotina	Mora	San Pablo
Orotina	Orotina	País	Orotina	Orotina	Mora	San Pablo
	El Mastate	País	Orotina	Orotina	Mora	San Pablo
	Hacienda Vieja	País	País	País	País	País
	Coyolar	País	Orotina	Mora	Mora	San Pablo
	La Ceiba	País	Orotina	Orotina	Mora	San Pablo

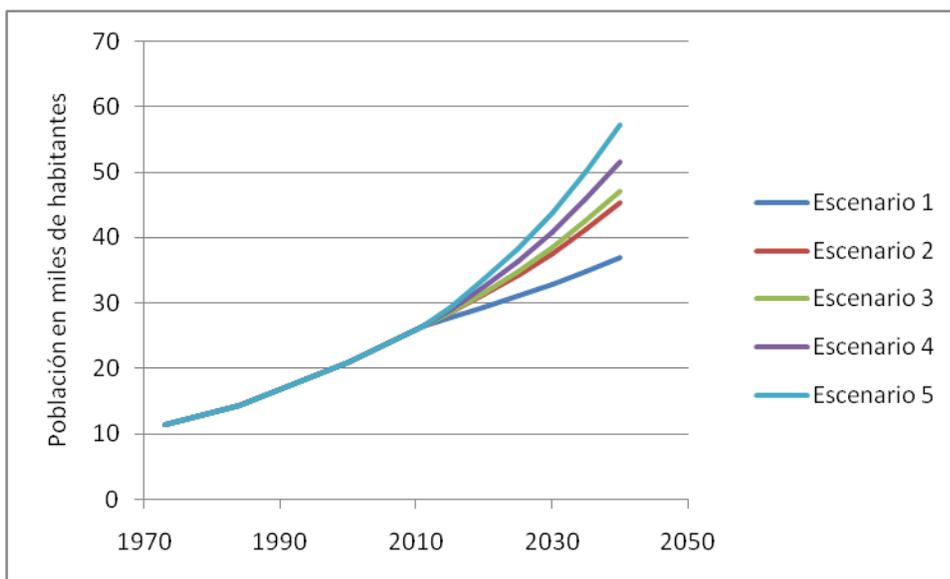


Figura 37. Proyección población para los cantones de San Mateo y Orotina a partir del método de componentes demográficos.

Cuadro 26. Proyecciones de población para los cantones de San Mateo y Orotina con el método de componentes demográficos.

Escenario	2011	2015	2020	2025	2030	2035	2040
1	26 477	27 704	29 319	31 038	32 866	34 813	36 886
2	26 477	28 498	31 242	34 269	37 609	41 293	45 361
3	26 477	28 622	31 556	34 820	38 453	42 499	47 008
4	26 477	29 004	32 503	36 451	40 908	45 940	51 623
5	26 477	29 413	33 541	38 285	43 738	50 009	57 223

4.4. Escenarios densidad de población

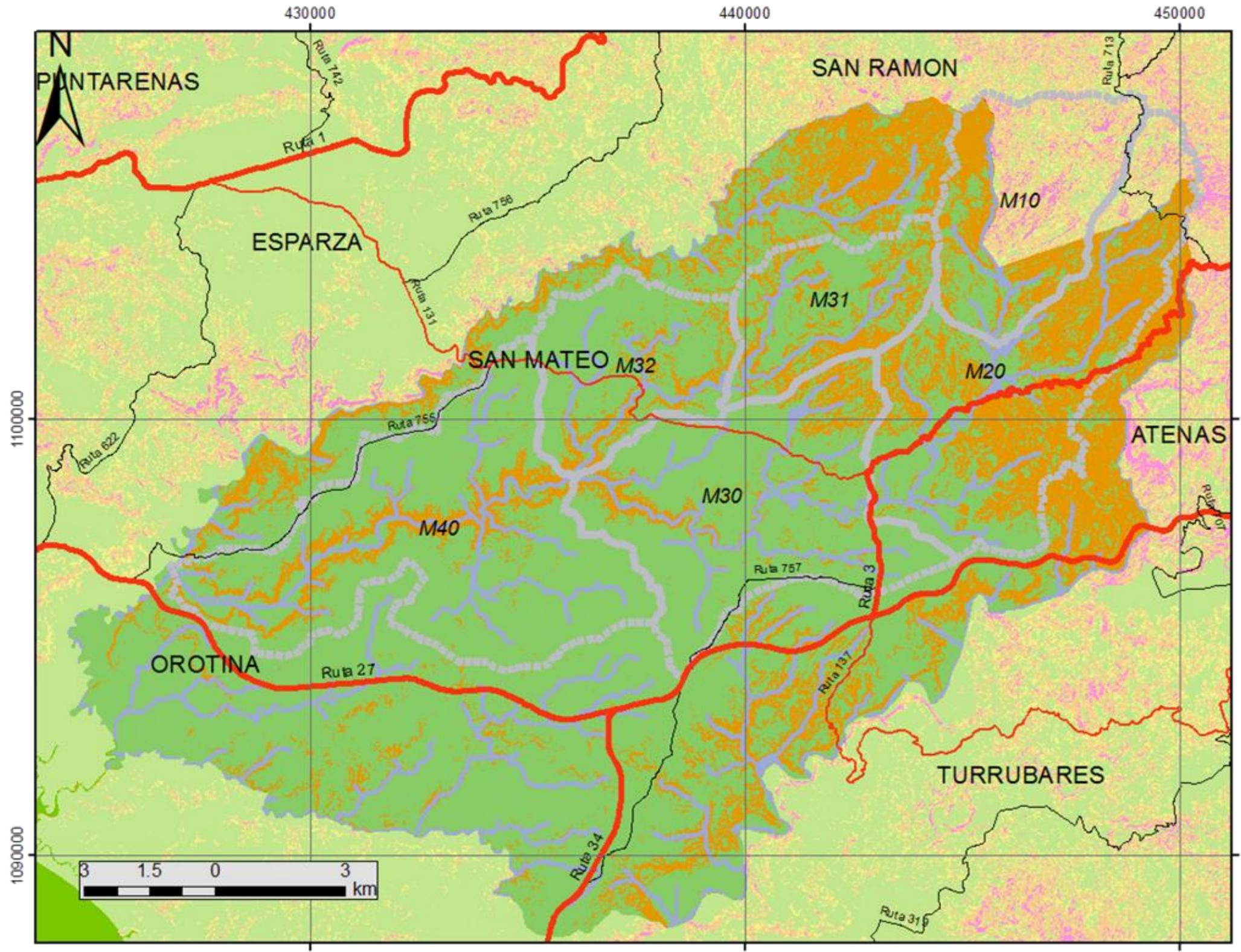
Es importante corroborar que la población según las proyecciones pueda ocupar el espacio físico disponible. Los escenarios de población buscan determinar la capacidad de saturación que se podría dar en el área de estudio. Los criterios para determinar el área disponible para ser urbanizada son los siguientes: pendientes menores al 30% y fuera de zonas de protección de ríos. Las zonas con pendientes mayores al 30% se consideran con restricción, pero no significa que no se pueda desarrollar actividades del todo. Con la

restricción, lo que se busca es controlar el desarrollo urbanístico, en sectores donde el municipio pueda controlar y proyectar los servicios que brinda.

Se mantiene el criterio de la pendiente del 30% del terreno expuesto por ProDUS (2009) debido a que este no solo tiene sustentos legales, sino que también se fundamenta en lo difícil de brindar acceso a servicios públicos – transporte, salud, abastecimiento y otros – para pendientes más altas. Igualmente se presentan los porcentajes de área que habilitaría permitir el desarrollo en terrenos con pendientes menores a un 40% (manual de buenas prácticas ambientales del SETENA) y al 75% (decreto 33879).

La Figura 38 se presenta un mapa con las áreas disponibles para ser urbanizadas en verde, las que tienen restricción por pendiente (>30%) en anaranjado y las que tienen restricción por encontrarse a 50 metros del río en azul. Las áreas con restricción son propuestas – con excepción de los cincuenta metros de los ríos – y no implican que este prohibido del todo la construcción. Solo se presenta el mapa con la restricción de desarrollo urbanístico en terrenos con pendientes mayores al 30%; los otros dos escenarios (pendiente >40% y pendiente >75%) presenta mucha mayor área disponible. Los terrenos con pendiente mayor al 75% por ley definitivamente no se pueden desarrollar urbanísticamente.

Por restricción se entiende desarrollo urbanístico, según el terreno, se puede desarrollar pero a menor escala. Además de presentar menos áreas con restricción en las cuencas bajas – M30, S20 y M40, éstas son las que presentan una mejor vialidad, con un circuito formado por las rutas 3 y 27 y las rutas 131, 755 y 757. Las cuencas M10 y S10 no son atravesadas por ninguna ruta nacional, solo la ruta 713 que cruza la divisoria de aguas de la cuenca M10. El aeropuerto internacional está planteado para ser construido en la cuenca M40, lo cual convierte a la parte baja del río Machuca como el principal eje de desarrollo urbanístico de la cuenca



Cuenca del Río Machuca

Area disponible para crecimiento poblacional

Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial en la cuenca del río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica

Fuentes:
Laboratorio Nacional de Aguas - AyA
UEN Gestión Ambiental - AyA
PRCR-CR 2010 -MH

Simbología

- Primaria
- Secundaria
- Terciaria
- Con restricción
- Margen ríos
- Disponible
- Río Machuca

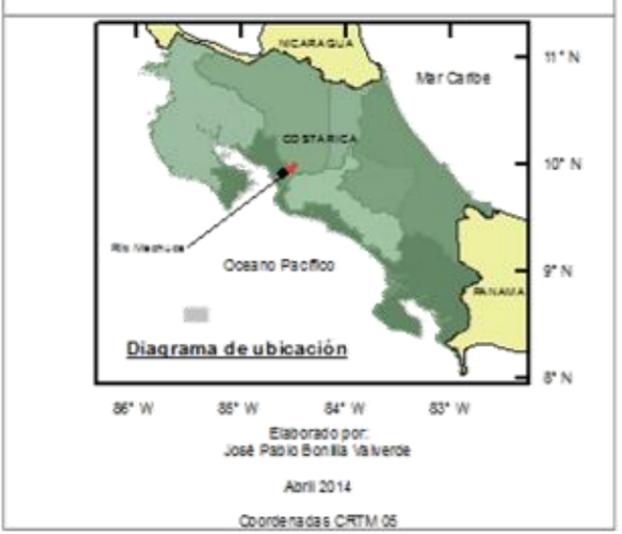


Figura 38. Área disponible para crecimiento poblacional en los cantones de San Mateo y Orotina.

Tanto en la Figura 38 como en el Cuadro 27, en el Cuadro 28 y en el Cuadro 29 se demuestra la gran diferencia que puede tener una regularización del espacio físico. En la parte alta de la cuenca, especialmente en la cuenca M10, el área disponible para ser urbanizado pasa de ser menor de un 30% a ser mayor del 40%, con solo aumentar en un 10% la pendiente – de 30% a 40% - de los terrenos con posibilidad de desarrollar urbanizaciones. El aumento del área disponible con permitir desarrollo urbanístico en terrenos con pendientes menores al 75% en la cuenca M10 habilitaría un 80% del área - siendo un 10% por protección de las márgenes de los ríos y el otro 10% por terrenos quebrados. Esto refuerza los escenarios del apartado anterior, donde se excluyó el distrito de San Rafael de San Ramón y se proyecta un crecimiento vegetativo en los distritos de Desmonte de San Mateo y Hacienda Vieja de Orotina.

De manera general, ampliar el área disponible por pendiente del terreno en la cuenca del río Machuca permitiría desarrollar un 60% de la cuenca del río Machuca en el caso de permitir desarrollo urbanístico en terrenos no pendientes menores al 30%; a un 70% permitiendo desarrollar urbanísticamente terrenos con una pendiente menor del 40%; y por último, de permitir desarrollos urbanísticos en terrenos con pendientes menores del 75% se podría urbanizar un 85% de los terrenos de la cuenca del río Machuca.

Cuadro 27. Disponibilidad de hectáreas para urbanizar con una pendiente >30%.

Escenario	Margen río	<30%	>30%	Disponible	Con restricción
M10	211,0	1165,2	518,3	27,4%	72,6%
M20	356,0	1624,0	1273,2	39,1%	60,9%
M30	357,7	334,8	2400,6	77,6%	22,4%
S10	125,9	388,0	771,4	60,0%	40,0%
S20	154,3	213,0	1159,7	75,9%	24,1%
M40	428,0	462,9	3078,8	77,6%	22,4%
Total	1632,8	4188,0	9202,0	61,3%	38,7%

Cuadro 28. Disponibilidad de hectáreas para urbanizar con una pendiente >40%.

Escenario	Margen río	<40%	>40%	Disponible	Con restricción
M10	211,0	894,5	789,0	41,6%	58,4%
M20	356,0	1127,2	1769,9	54,4%	45,6%
M30	357,7	173,0	2562,4	82,8%	17,2%
S10	125,9	188,0	971,4	75,6%	24,4%
S20	154,3	98,2	1274,5	83,5%	16,5%
M40	428,0	310,3	3231,5	81,4%	18,6%
Total	1632,8	2791,2	10598,8	70,6%	29,4%

Cuadro 29. Disponibilidad de hectáreas para urbanizar con una pendiente >75%.

Escenario	Margen río	<75%	>75%	Disponible	Con restricción
M10	211,0	167,4	1516,1	80,0%	20,0%
M20	356,0	150,6	2746,6	84,4%	15,6%
M30	357,7	17,3	2718,1	87,9%	12,1%
S10	125,9	13,6	1145,8	89,1%	10,9%
S20	154,3	5,7	1367,1	89,5%	10,5%
M40	428,0	64,8	3476,9	87,6%	12,4%
Total	1632,8	419,5	12970,5	86,3%	13,7%

Por lo expuesto anteriormente se propone mantener el criterio de ProDUS para la propuesta de Plan Regulador de Orotina (2009) – permitir desarrollos urbanísticos en terrenos con pendientes menores del 30%. Según ProDUS (2009) la máxima densidad actualmente en el cantón de Orotina es de 30 viviendas por hectárea y propone una densidad de 15 viviendas por hectárea para las zonas de crecimiento y 0,25 viviendas por hectárea para las zonas con restricción - no incluye la zona de protección de los ríos. En el caso de desarrollos urbanísticos consignados bajo la categoría de parcelamiento agrícola – situación actual- se puede alcanzar densidades de 1,4 viviendas por hectárea.

Con un índice de ocupación de 3,5 habitantes por vivienda se tienen las siguientes densidades: 105 habitantes por hectárea, 53 habitantes por hectárea, 5 habitantes por hectárea y 1 habitante por hectárea. Se plantean cuatro escenarios, en todos los casos se permitirá un área del 25% de zona urbana y 25% de zona de anillo urbano o de crecimiento para las cuencas M30, S20 y M40 - con más de un 60% de los terrenos con

una pendiente menor del 30%), y la variación en los escenarios se da en el resto del 50% del área disponible, donde se plantea que se dé un desarrollo del 10%, 20%, 30% y 40% del área restante. El escenario crítico es que se desarrolle el 50% del terreno en centros urbanos y su anillo de contención y un 40% en parcelamientos agrícolas, dejando siempre un 10% a áreas verdes, comunes y caminos.

Los escenarios con las áreas disponibles para los diferentes usos de suelo planteados se presentan en el Cuadro 30. La población de cada escenario se presenta en el Cuadro 31. En el caso de densificar al máximo los centros urbanos y los anillos alrededor de estos y permitir un mínimo de desarrollos urbanísticos del tipo “Quintas” en la demás zonas rurales, la cuenca del río Machuca podría albergar 51 000 habitantes, donde un 40% del área de la cuenca quedaría libre para otras prácticas, y en el caso de permitir que se desarrolle el 90% del área, la población que puede albergar la cuenca es del 57 500 habitantes.

Cuadro 30. Distribución de áreas para en los posibles escenarios, en Ha.

Cuenca	Restricción	Urbano	Anillo crecimiento	Parcelas agrícolas			
				10%	20%	30%	40%
M10	518			117	233	350	466
M20	1273			162	325	487	650
M30	2401	84	84	33	67	100	134
S10	771			39	78	116	155
S20	1160	53	53	21	43	64	85
M40	3079	116	116	46	93	139	185
Total	9202	253	253	419	838	1256	1675

Cuadro 31. Máxima población que puede albergar la cuenca del río Machuca

Escenario	Máxima población
1	51 221
2	53 315
3	55 409
4	57 503

4.5. Selección, proyección y estimación de la demanda

Con los tres modelos de proyección de población y a partir de las opciones y de las alternativas analizadas en cada uno de ellos, se hace una comparación entre ellos y se selecciona el escenario que se considera más probable, además de uno mayor y otro menor que el más probable. Además, se verifica que estas puedan ocupar el espacio físico disponible. En la Figura 39 se presentan los resultados de los once modelos de proyección demográficos planteados.

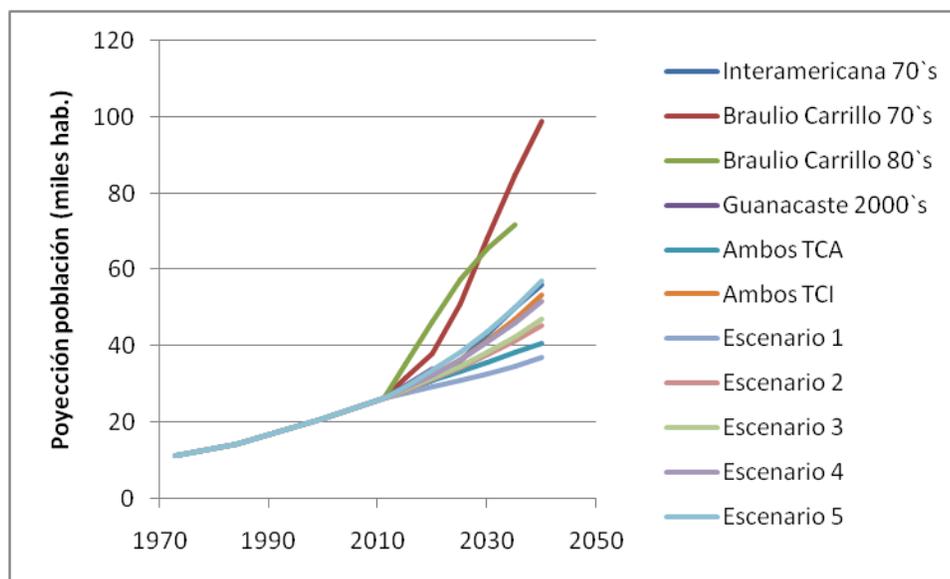


Figura 39. Proyección de la población en los cantones de San Mateo y Orotina a partir de varios métodos demográficos.

Se selecciona el modelo de los Componentes Demográficos en el que se estima que se dará una migración similar a la del cantón de Mora (escenario quinto) como el más probable. Además, se selecciona el modelo de comparación gráfica que estima un crecimiento parecido al del cantón de San Ramón con la construcción de la carretera interamericana en los años 1970, el cual es más desordenado, y por lo tanto se obtiene

una mayor población. Por último, se selecciona el modelo tendencial, el cual prevé que se mantenga el comportamiento que se experimentó entre los censos del 2000 y 2011. Estos se presentan en la Figura 40.

Para estimar las necesidades de agua para el abastecimiento de estas poblaciones, se proponen dos modelos de dotación, uno para un operador eficiente y otro para un operador ineficiente. En el primer caso, el de un operador eficiente, se plantea una dotación de 250 l/hab./día, de la cual una parte de 150 l/hab./día es de consumo domiciliario, otra de 30 l/hab./día es de consumo no domiciliario y 70 l/hab./día son de agua no controlada, la cual equivale aproximadamente a una eficiencia del 70% del operador. Para el segundo caso, el operador ineficiente, se presume una dotación de 350 l/hab./día, de ese total, 180 l/hab./día son para la dotación domiciliario y otro tanto igual para la no domiciliario, mientras que unos 170 l/hab./día corresponderían al agua no controlada, para una eficiencia del operador del 50%.

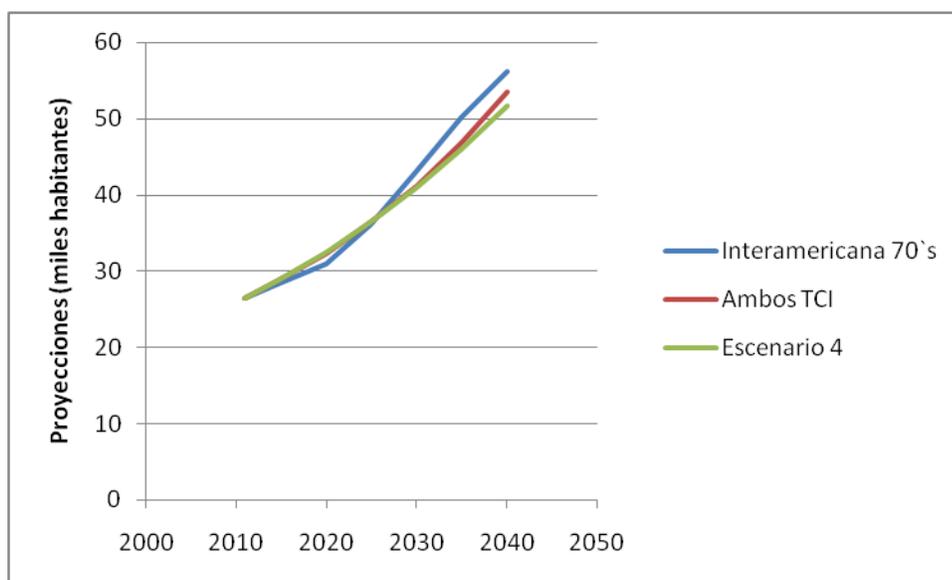


Figura 40. Proyecciones de la población seleccionadas.

Se proyecta alcanzar una población de 32,5 mil habitantes para el año 2020, para la cual se requeriría una o varias fuentes con un caudal promedio de 94 l/s para el

operador eficiente y 132 l/s para el operador ineficiente. En el 2030 la población alcanzará acaso los 41 mil habitantes, para lo cual se requerirá una fuente con una capacidad de 118 l/s ó 166 l/s según sea eficiente o ineficiente el operador. Finalmente, se espera que en toda el área la población sea de 51,6 mil habitantes, así que el requerimiento de caudal sería del orden de los 150 l/s en el caso de manejar dotaciones de un operador eficiente o 209 l/s en el caso de ser ineficiente el operador.

Se desarrollaron cuatro escenarios de densidad de población, a partir de los cuales, se calcula que la máxima densidad que puede alcanzar la cuenca del río Machuca puede variar de los cincuenta mil habitantes a los cincuenta y siete mil habitantes. El área disponible puede aumentar en el caso se permitir otros escenarios de desarrollo. Se estima que las aguas superficiales presentes en la parte alta del río Machuca a partir de los aforos y el balance hídrico mensual no están en capacidad de brindar el caudal demandado por la población en el año 2040. Se puede plantear captar el río Jesús María y el Machuca para satisfacer esta demanda. Se debe explorar el potencial en la margen del río Machuca, cerca del punto de aforo M20.

Capítulo VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Conclusiones

- Se determinó la recarga potencial en la cuenca del río Machuca a partir de la caracterización hidrológica, siendo está del orden de los 1000 mm/año.
- Se caracterizó hidrológicamente la cuenca del río Machuca a partir de un balance hídrico anual y se estimó precipitación por el método de las isoyetas por ser el que presenta el menor valor residual.
- Con los Balances de Cuenca Mensuales se cuantificó el caudal en la parte alta de la cuenca del río Machuca y esta no supera los 75 l/s.
- A partir de los aforos de la Campaña 2013 y reforzado con la hidrogeología y la caracterización física y química del agua se infirió que existe una interacción entre el sistema acuífero y las aguas del río Machuca que justifica la dilución observada y el aumento del caudal.
- Con las proyecciones de población, se determinó que es posible que la población en la cuenca se duplique. Si la población de la región se duplicará se requerirán, al menos 75 l/s adicionales, en el mejor de los escenarios; los cuales deben obtenerse de otras áreas distintas a la parte alta del río Machuca.

2. Recomendaciones

- La estación meteorológica San Miguel de Barranca midió la precipitación en el Pacífico Central desde 1937 hasta el 2007, contando con más de setenta años de registro; es

necesario retomar la operación de esta estación con el objeto de contar con esta información para continuar caracterizando la zona.

- Se debe continuar el registro histórico de aforos, así como instalar estaciones limnográficas que monitoreen constantemente el río Machuca y el Jesús María; se recomienda instalar estas estaciones por lo menos en los puntos conocidos como toma del sistema San Mateo (M10), a la altura del puente entre San Mateo y Orotina (M20) y en el río Jesús María cerca de San Juan de Dios (J10).
- En el caso de recurrir al recurso subterráneo, se debe explorar la posibilidad de perforar en las márgenes de los ríos Machuca y Jesús María, cerca de los puntos de aforo M20 y J10. Cerca del punto M20 se cuenta un terreno que se encuentra abandonado por haber sido arrastrado por una creciente. En toda las cuencas existen evidencias de grandes eventos – crecidas -, desde grandes bloques – de más de dos metros – en la cuenca M10, como deslizamientos en la cuenca J10.
- Se debe realizar un análisis económico de alternativas de abastecimiento, para garantizar mejor proyecto para abastecer con el recurso hídrico a la población que se prevé dé en los cantones de San Mateo y Orotina.
- Es importante que se cuente con un Plan Regulador en los cantones de San Mateo y Orotina, de manera que se pueda prever el desarrollo urbano de una manera sostenida. Este debe ser acorde con la disponibilidad de recurso en la cuenca.
- Se debe revisar la metodología propuesta por Schosinsky, debido a que se detectó que el coeficiente de escorrentía puede alcanzar valores de la unidad, lo cual implicaría que toda el agua que alcanza el suelo se infiltra, y no habría escorrentía superficial, solo flujo base según lo propuesto por el autor, y es evidente que esto no está ocurriendo en la realidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APARICIO, F., 1989: Fundamentos de hidrología de superficie. – 303pp. Editorial Limusa, S.A. de C.V., México.

APPELO, C.A.J & POSTMA, D., 2010: Geochemistry, groundwater and pollution. – 649pp. A.A. Balkema Publishers, Leiden, Holanda [2da ed.].

AyA., 2010: Diagnóstico de Inversiones. – 64 pp. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José, Costa Rica

CAMACHO, C., 1993: Opciones para las obras de protección de la toma del acueducto de San Mateo de Alajuela.- 135 pp. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

CCP & INEC, 2008: Costa Rica: Estimaciones y proyecciones de población por distrito y otras áreas geográficas. 1970-2030. – 7pp. Centro Centroamericano de Población de la Universidad Costa Rica e Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2008, San José, Costa Rica

CCP& INEC, 2013: Estimaciones y Proyecciones de Población por sexo y edad 1950-2050. – 17pp. Centro Centroamericano de Población de la Universidad Costa Rica e Instituto Nacional de Estadística y Censos, Marzo 2013, San José, Costa Rica – publicaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC)

CHOW, V., 1994: Hidrología aplicada. – 571 pp. McGraw-Hill Interamericana S.A, Santa Fe de Bogotá, Colombia.

CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R., 1978: Hidrología subterránea. – 2359pp. Ediciones Omega, S. A., Barcelona, España – Tomos I & II

DENYER, P., AGUILAR, T. & ALVARADO, G., 2003: Geología y estratigrafía de la hoja Barranca, Costa Rica. – Escala 1:50000, Rev. Geol. Amér. Central, 29_105-125, 2003.

DENYER, P. & KUSSMAUL, S., 2000: Geología de Costa Rica. – 520 pp. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica

DGEC, 1950: Censo general de la República de Costa Rica 1950. –314pp. Dirección General de Estadística y Censos, San José, Costa Rica– Ministerio de Economía, Industria y Comercio de la Dirección General de Estadística y Censos (DGEC)

DGEC, 1963: Censo de población 1963. – 321pp. Dirección General de Estadística y Censos, San José, Costa Rica– Ministerio de Economía, Industria y Comercio de la Dirección General de Estadística y Censos (DGEC)

DGEC, 1973: Población total, urbana y rural por provincias, cantones y distritos: 1973. – 23pp. Dirección General de Estadística y Censos, San José, Costa Rica– Ministerio de Economía, Industria y Comercio de la Dirección General de Estadística y Censos (DGEC)

DGEC, 1984: VII Censo Nacional de Población y IV de Vivienda: resultados generales. – 30pp. Dirección General de Estadística y Censos, San José, Costa Rica– Ministerio de Economía, Industria y Comercio de la Dirección General de Estadística y Censos (DGEC)

DUNNE, T. & LEOPOLD, L.B. 1978: Water in Environmental Planning. – 818 pp. W. H. Freeman and Company

HAESTAD METHODS, 2003: Advanced Water Distribution Modeling and Management. – 702 pp.

HOLDRIDGE, L.R., 1959: Life zone ecology. – 1967 pp.

IHE & UNESCO., 1981: Métodos de cálculo del balance hídrico. – 183 pp. Instituto de Hidrología de España & Organización de las Naciones Unidas para la educación, la Ciencia y la Cultura.

IMTA., 2008. Balances Hídricos por cuencas hidrográficas y Propuesta de Modernización de las Redes de Medición en Costa Rica. – 153 pp. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

IMN, 2009: Atlas Climatológico de Costa Rica. – Archivo interactivo. Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica.

INEC, 2000: IX Censo Nacional de Población y V de Vivienda: resultados generales. – 80pp. Instituto Nacional de Estadística y Censos, San José, Costa Rica – publicaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC)

INEC, 2011: X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2011: resultados generales. – 140pp. Instituto Nacional de Estadística y Censos, San José, Costa Rica – 1 ed. publicaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC)

- INEC, 2012: X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda: Indicadores provinciales. – 32pp. Instituto Nacional de Estadística y Censos, San José, Costa Rica – publicaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC)
- LINSLEY, R & FRANZINI, J., 1975: Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. – 791 pp. Compañía Editorial Continental, S.A., Méjico.
- LOPEZ, R.A., 2000: Diseño de acueductos y alcantarillados. – 384 pp. Ed. ALFAOMEGA, Santa Fe de Bogotá [2da Ed.].
- MONSALVE, G. 1999: Hidrología en la Ingeniería. – 358pp. ALFAOMEGA grupo Editor, S.A. de C.V., Méjico.
- PANIAGUA, M., 2013: Cartografía censal en Costa Rica: de lo análogo a lo digital. - Rev. Geog. Amér. Central, 50_113-140, 2013.
- POEHLS, D.J. & SMITH, G.J., 2009: Encyclopedic Dictionary of Hidrogeology. – 519 pp. Ed. Academic Press, EE.UU. [1ra ed.].
- PRCR, 2010: Cartografía de Costa Rica – Escala 1:10000, base de geodatos, Programa Regularización de Catastro y Registro (PRCR).
- PRODUS, 2007: Diagnóstico del Plan Regulador Cantonal de Orotina. – 1103 pp. ProDUS [Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible], Universidad de Costa Rica – Informe para la Municipalidad de Orotina
- PRODUS, 2009: Propuesta del Plan Regulador Cantonal de Orotina. – 1103 pp. ProDUS [Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible], Universidad de Costa Rica – Informe para la Municipalidad de Orotina

ROJAS, N., 2011: Estudio cuencas: Jesús María. – 18 pp. IMN [Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica].

SCALON, B.R., 2008. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge - Hydrogeology Journal, 10:18–39

SCHOSINSKY, G. & LOSILLA, M., 2000: Modelo Analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. - Rev. Geol. Amér. Central, 23_43-55, 2000.

SCHOSINSKY, G., 2006: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. - Rev. Geol. Amér. Central, 34-45_13-30, 2006.

SOLANO, J., 2001: Aspectos Fisiográficos aplicados a un Bosquejo de Regionalización Geográfico Climático de Costa Rica. - Rev. Top. Meteor. Oceanog., 8(1):26-39, 2001.

TEC., 2008: Atlas de Costa Rica 2008. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago [Base de datos geográfica].

UNESCO., 2007. Balance hídrico superficial de Costa Rica, Período 1970-2002. - 49 pp. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe – Documento Técnico N° 10.

UNESCO., 2008: Water Resources Assessment. Integral water balance in basins. – 95 pp. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Documento Técnico N° 14.

VILLÓN, M., 2004: Hidrología. – 474 pp. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1 Edición, Cartago.

XU, C.Y. & SINGH, V.P., 1998: A review on monthly water balance models for water resources investigations. - Water Resources Management, 12_31-50, 1998.

APENDICES

A.1. Aspectos fisiográficos – Curvas hipsométricas

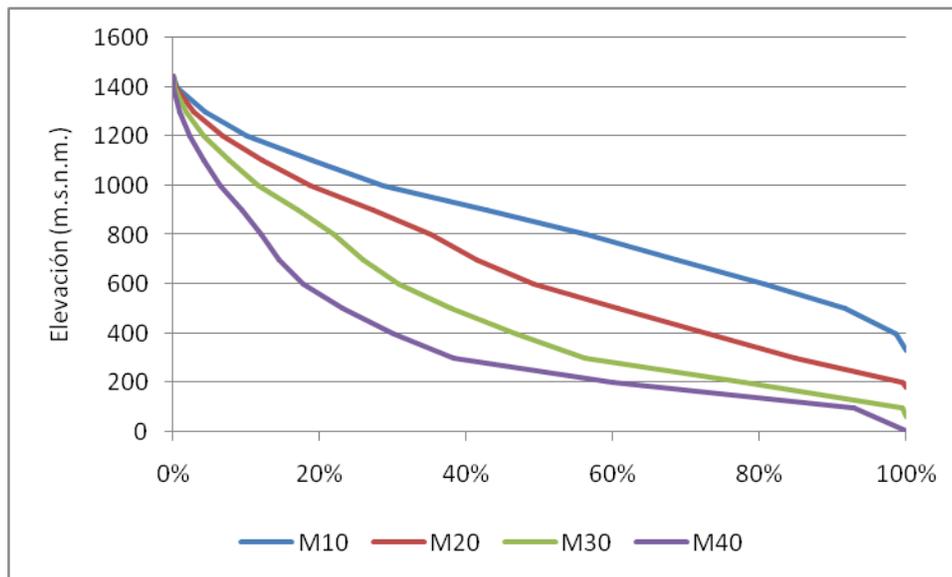


Figura A.1.1. Curva hipsométrica para las cuencas del río Machuca.

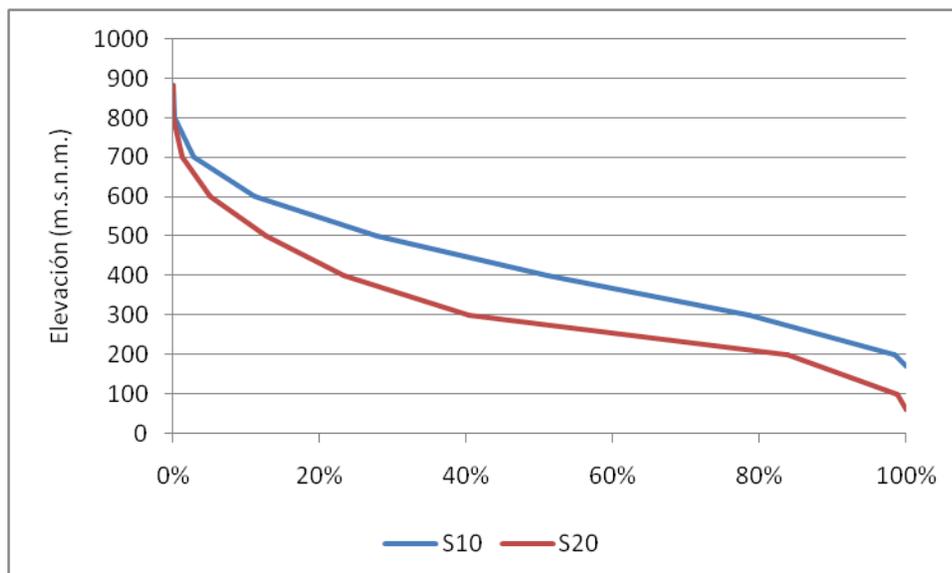


Figura A.1.2. Curva hipsométrica para las cuencas del río Surubres.

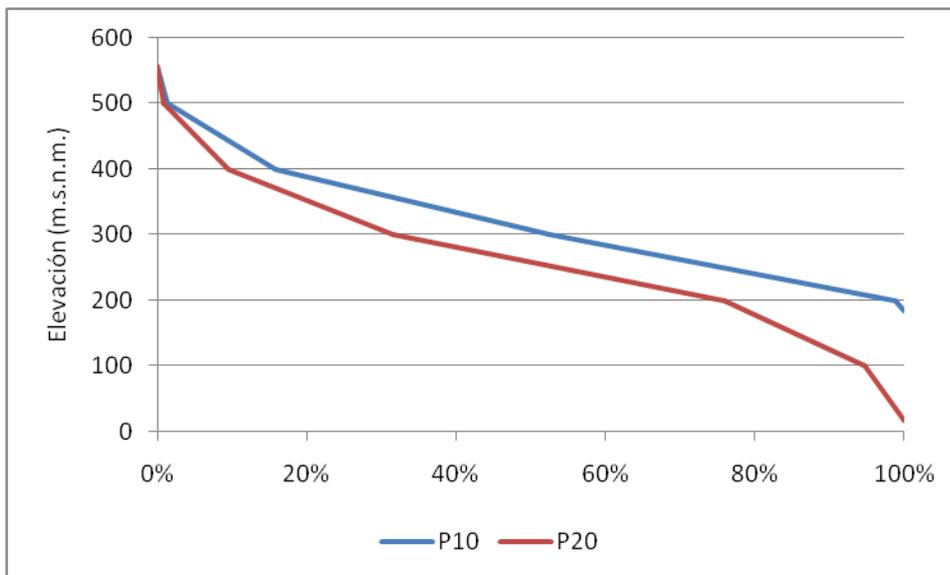


Figura A.1.3. Curva hipsométrica para las cuencas del río Paires.

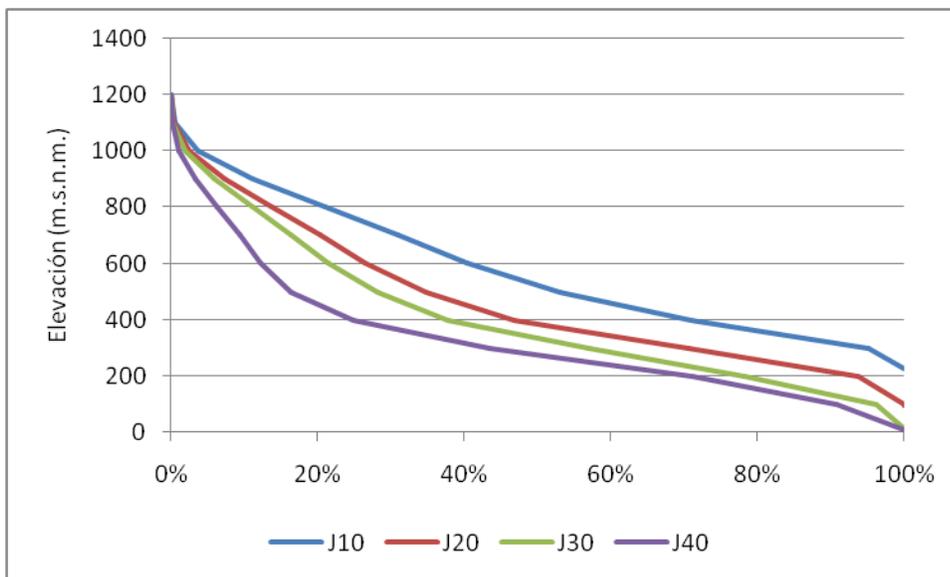


Figura A.1.4. Curva hipsométrica para las cuencas del río Jesús María.

A.2. Aspectos fisiográficos – Perfil de los ríos

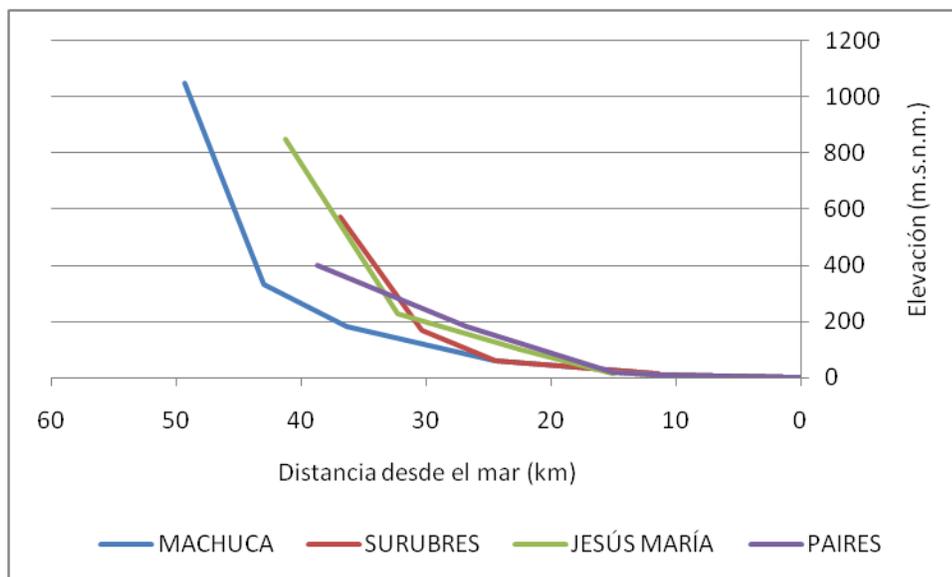


Figura A.2.1. Perfiles para las cuencas de los ríos Machuca, Surubres, Jesús María y Paires desde la desembocadura al mar.

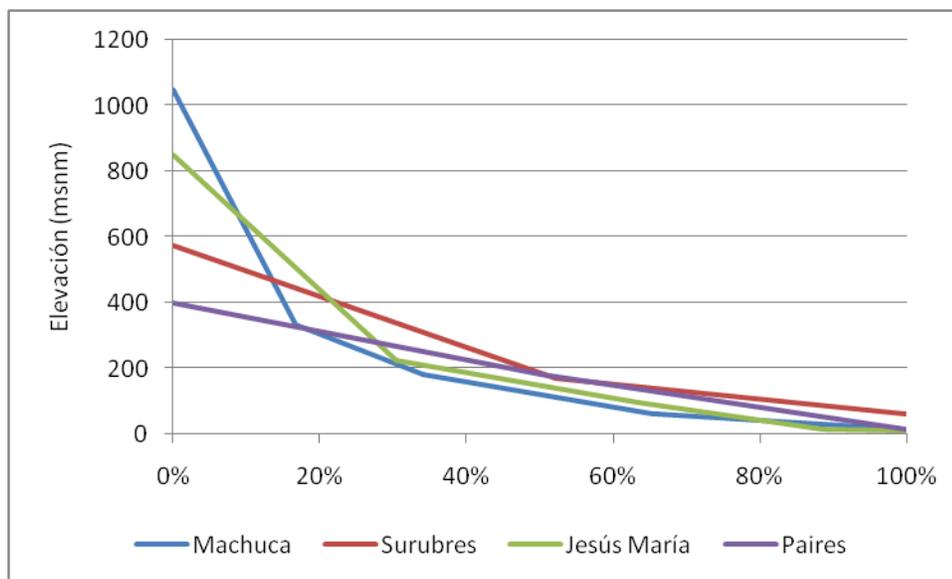


Figura A.2.1. Perfiles para las cuencas de los ríos Machuca, Surubres, Jesús María y Paires desde el punto de aforo a partir del porcentaje de recorrido desde la parte alta.

A.3. Balance hídrico mensual – Modelos Thornthwaite- Mather modificado

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P	1,1	2,9	18,0	104,4	531,8	496,6	477,1	499,8	611,6	730,6	251,5	30,9	3756,4
P efectiva	0,0	0,0	15,8	91,9	468,0	437,1	419,9	439,8	538,2	642,9	221,3	27,2	3302,1
ETP	127,4	144,5	169,0	163,6	138,5	123,3	123,9	111,8	104,2	102,7	97,2	108,8	1514,9
P efec - ETP	-127,4	-144,5	-153,2	-71,7	329,5	313,8	296,0	328,0	434,0	540,2	124,1	-81,6	
PPAA	-209,0	-353,6	-506,7	-578,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-81,6	
HS	237,2	165,3	112,7	94,2	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0	326,2	
ΔHS	-89,0	-71,9	-52,6	-18,5	305,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-73,8	
ETR	89,0	71,9	68,4	110,4	138,5	123,3	123,9	111,8	104,2	102,7	97,2	101,0	1242,3
Déficit	38,4	72,6	100,6	53,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	
Excedente	0,0	0,0	0,0	0,0	23,7	313,8	296,0	328,0	434,0	540,2	124,1	0,0	
Percolación	0,0	0,0	0,0	0,0	11,9	156,9	148,0	164,0	217,0	270,1	62,0	0,0	1029,9
Agua Disponible	125,6	74,1	43,7	25,8	27,1	172,9	250,0	311,5	400,8	506,5	360,9	212,9	2511,9
Agua Retenida	74,1	43,7	25,8	15,2	16,0	102,0	147,5	183,8	236,5	298,9	212,9	125,6	
Flujo Base	51,5	30,4	17,9	10,6	11,1	70,9	102,5	127,7	164,3	207,7	148,0	87,3	1029,9
Escorrentía Total	51,5	30,4	17,9	10,6	23,0	227,7	250,5	291,7	381,3	477,8	210,0	87,3	2059,8
Escorrentía aforada	27,4	15,4	12,3	10,8	17,2	161,1	185,6	159,1	294,7	534,8	126,5	59,3	1604,2
Diferencia Aforada-Total	-24,15	-15,02	-5,63	0,23	-5,71	-66,69	-64,89	-132,69	-86,59	57,06	-83,52	-27,97	

Figura A.3.1. Modelo Thornthwaite- Mather modificado calibrado para la cuenca M10.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P	1,3	2,7	16,8	99,0	506,8	473,0	456,2	476,5	582,6	695,1	239,7	29,6	3579,4
P efectiva	0,0	0,0	14,8	87,1	446,0	416,2	401,4	419,4	512,7	611,7	210,9	26,0	3146,4
ETP	132,1	149,9	175,2	169,6	143,6	127,8	128,4	115,9	108,1	106,5	100,8	112,8	1570,6
P efec - ETP	-132,1	-149,9	-160,4	-82,5	302,4	288,4	273,0	303,5	404,7	505,2	110,1	-86,7	
PPAA	-218,9	-368,7	-529,1	-611,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-86,7	
HS	185,5	120,1	75,5	59,4	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	272,2	
ΔHS	-86,6	-65,4	-44,7	-16,1	290,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-77,8	
ETR	86,6	65,4	59,5	103,2	143,6	127,8	128,4	115,9	108,1	106,5	100,8	103,9	1249,6
Déficit	45,5	84,5	115,7	66,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9	
Excedente	0,0	0,0	0,0	0,0	11,8	288,4	273,0	303,5	404,7	505,2	110,1	0,0	
Percolación	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	144,2	136,5	151,7	202,3	252,6	55,1	0,0	948,4
Agua Disponible	66,0	33,0	16,5	8,3	10,0	149,2	211,1	257,3	331,0	418,1	264,1	132,1	1896,7
Agua Retenida	33,0	16,5	8,3	4,1	5,0	74,6	105,6	128,7	165,5	209,0	132,1	66,0	
Flujo Base	33,0	16,5	8,3	4,1	5,0	74,6	105,6	128,7	165,5	209,0	132,1	66,0	948,4
Escorrentía Total	33,0	16,5	8,3	4,1	10,9	218,8	242,1	280,4	367,8	461,7	187,1	66,0	1896,7
Escorrentía aforada	19,4	8,0	5,8	8,1	8,1	124,5	144,9	145,4	154,1	273,3	105,6	40,9	1038,1
Diferencia Aforada-Total	-13,61	-8,54	-2,48	3,95	-2,81	-94,31	-97,14	-135,02	-213,69	-188,34	-81,48	-25,16	

Figura A.3.2. Modelo Thornthwaite- Mather modificado calibrado para la cuenca M20.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
P	0,9	1,5	12,6	102,2	509,8	484,3	509,9	526,1	622,3	695,2	245,0	38,2	3747,9
P efectiva	0,0	0,0	10,1	81,8	407,8	387,4	407,9	420,9	497,8	556,2	196,0	30,5	2996,4
ETP	132,6	150,4	175,9	170,3	144,1	128,3	128,9	116,3	108,5	106,9	101,2	113,2	1576,6
P efec - ETP	-132,6	-150,4	-165,8	-88,5	263,7	259,1	279,0	304,6	389,3	449,3	94,8	-82,7	
PPAA	-215,3	-365,7	-531,5	-620,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-82,7	
HS	103,9	56,2	28,6	19,9	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	178,4	
ΔHS	-74,6	-47,6	-27,6	-8,7	230,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-71,6	
ETR	74,6	47,6	37,7	90,4	144,1	128,3	128,9	116,3	108,5	106,9	101,2	102,1	1186,7
Déficit	58,1	102,8	138,1	79,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,1	
Excedente	0,0	0,0	0,0	0,0	33,6	259,1	279,0	304,6	389,3	449,3	94,8	0,0	
Percolación	0,0	0,0	0,0	0,0	16,8	129,6	139,5	152,3	194,7	224,6	47,4	0,0	904,9
Agua Disponible	29,3	11,7	4,7	1,9	17,6	136,6	194,1	229,9	286,6	339,3	183,1	73,2	1508,1
Agua Retenida	11,7	4,7	1,9	0,7	7,0	54,6	77,7	92,0	114,7	135,7	73,2	29,3	
Flujo Base	17,6	7,0	2,8	1,1	10,5	82,0	116,5	138,0	172,0	203,6	109,9	43,9	904,9
Escorrentía Total	17,6	7,0	2,8	1,1	27,3	211,5	256,0	290,2	366,7	428,2	157,2	43,9	1809,7
Escorrentía aforada	17,5	4,9	3,6	4,0	26,0	97,4	134,0	159,4	246,0	348,9	87,8	44,3	1173,9
Diferencia Aforada-Total	-0,07	-2,09	0,74	2,87	-1,30	-114,16	-121,99	-130,81	-120,61	-79,36	-69,41	0,40	

Figura A.3.3. Modelo Thornthwaite- Mather modificado calibrado para la cuenca S10.

A.4. Hidrogeoquímica – Estimación cationes faltantes

Cuadro A.4.1. Estimación de los cationes faltantes (Na+K principalmente) según el error esperado del Balance eléctrico, en meq/l

Punto	-5%	-2%	0%	+2%	+5%
M10	0,37	0,93	1,33	1,73	2,38
M20	1,35	1,71	1,96	2,22	2,63
M30	1,25	1,54	1,74	1,95	2,28
S10	0,17	0,23	0,28	0,33	0,41
S20	2,29	2,56	2,75	2,95	3,26
M40	0,78	1,01	1,16	1,33	1,59
M40	0,57	0,78	0,93	1,09	1,34
J10	0,25	0,43	0,57	0,70	0,92
J20	0,33	0,54	0,68	0,83	1,07
J30	0,09	0,29	0,43	0,58	0,81
J40	0,26	0,44	0,56	0,69	0,90
J40	0,26	0,43	0,55	0,67	0,87

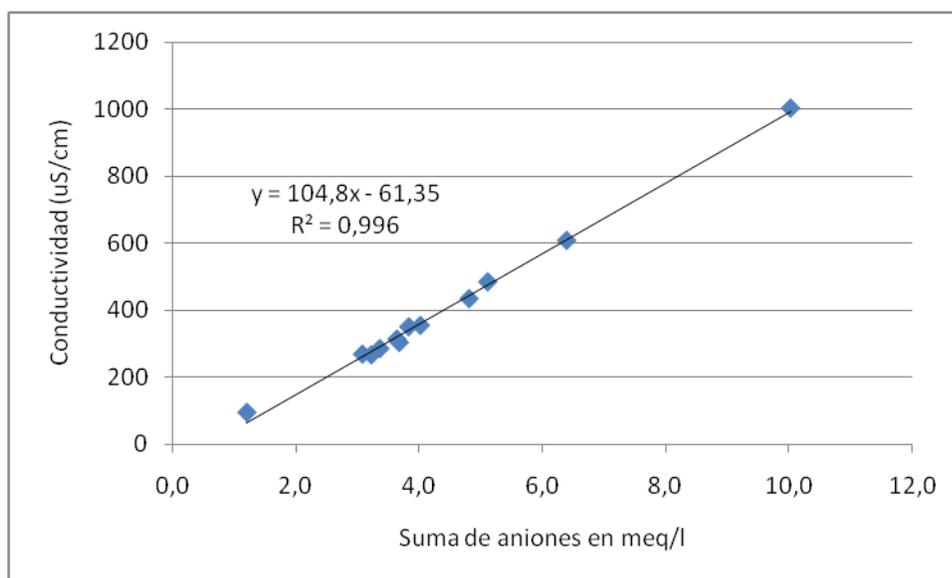


Figura A.4.1. Correlación entre la suma de los aniones y la conductividad para las muestras recolectadas durante la Campaña 2013.

A.5. Hidrogeoquímica – Diagramas de Piper.

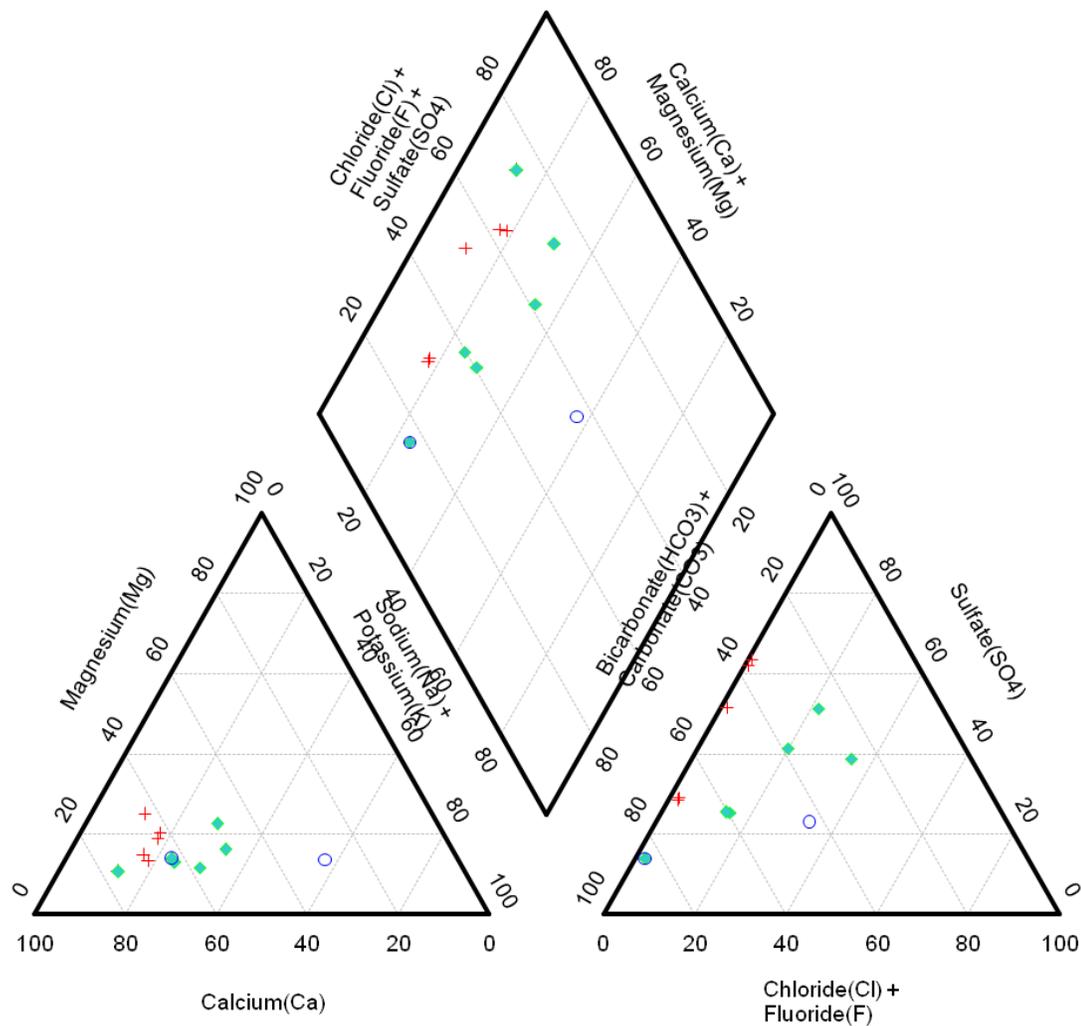


Figura A.5.1. Diagrama de Piper para la caracterización de las aguas de la Cuenca Hidrográfica Jesús María

Nota: valores del acumulado de sodio y potasio (Na+K) son estimados a partir del balance de eléctrico.