Universidad de Costa Rica

Facultad de Ciencias Sociales

Escuela de Geografía

Estimación de las áreas potenciales de recarga hídrica mediante mediciones de infiltración y modelación hidrológica en la microcuenca río Tigre para ayudar a la gestión del agua de la ASADA San Gabriel, San José, Costa Rica, 2016 – 2017.

Seminario de Graduación para optar por el grado de

Licenciatura en Geografía

Susana Aguilar Brenes

Melissa Ríos Solano

Alejandro Ureña Rodríguez

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2018

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE

DEDICATORIA i
AGRADECIMIENTOS ii
ÍNDICE iii
RESUMEN v
ÍNDICE DE MAPAS vi
ÍNDICE DE FIGURAS vi
ÍNDICE DE GRÁFICOS vii
ÍNDICE DE TABLAS viii
ÍNDICE DE ANEXOS viii
CAPÍTULO 1. ASPECTOS SUSTENTATORIOS DE LA INVESTIGACIÓN 1
1.1. INTRODUCCIÓN 1
1.2. PROBLEMA DE ESTUDIO 2
1.3. JUSTIFICACIÓN 3
1.4. ÁREA DE ESTUDIO 5
1.5. ANTECEDENTES 7
1.4.1. Recurso hídrico en el ámbito legal costarricense 7
1.4.2. Recurso hídrico en el ámbito político costarricense 8
1.4.3. Proyectos de investigación con temas afines al recurso hídrico 8
1.6. OBJETIVOS 11
1.6.1. Objetivo general 11
1.6.2. Objetivos específicos 11
1.7. MARCO TEÓRICO 12
1.8. METODOLOGÍA 15
1.8.1. Diagnóstico geoambiental de la microcuenca 15
1.8.2. Infiltración en la microcuenca 24
1.8.3. Estimación cuantitativa de la recarga hídrica 30
CAPÍTULO 2. DIAGNÓSTICO GEOAMBIENTAL 34
2.1. Caracterización meteorológica 34
2.1.1. Temperatura 35
2.1.2. Humedad relativa 36

2.1.3. Precipitación 38
2.1.4. Evapotranspiración potencial 40
2.2. Caracterización de la geología regional 43
2.2.1. Formaciones geológicas 45
2.2.2. Estructuras geológicas de la región 48
2.3. Caracterización de la geomorfología regional 49
2.4. Caracterización topográfica 54
2.5. Caracterización geopedológica 58
2.6. Uso actual de la tierra 61
2.7. Caracterización hidrográfica 67
2.7.1. Parámetros morfométricos 67
2.7.2. Balance hídrico mensual 72
2.8. Caracterización demográfica 74
2.8.1. Relación ASADA, ambiente y población 76
CAPÍTULO 3. INFILTRACIÓN EN LA MICROCUENCA 77
3.1. Particularidades de las pruebas realizadas 77
3.2. Caracterización de la tasa de infiltración 78
3.1. Caracterización de la capacidad de infiltración 81
3.3. Caracterización de la conductividad hidráulica saturada 84
3.4. La infiltración en el contexto geoambiental de la microcuenca 86
3.5. Áreas potenciales de recarga hídrica 87
CAPÍTULO 4. ESTIMACIÓN CUANTITATIVA DE LA RECARGA HÍDRICA 94
4.1. Modelo hidrológico 94
4.2. Evaluación 94
4.3 Dinámica de la Recarga hídrica 100
CONCLUSIONES 103
RECOMENDACIONES 103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105
ANEXOS 114

RESUMEN

La falta de información sobre la ubicación y las limitaciones técnicas para la cuantificación del potencial hídrico de las áreas de recarga imposibilita el óptimo aprovechamiento del recurso por parte de las instituciones encargadas de su manejo. Esto impide el desarrollo y aplicación de medidas de protección y conservación de las fuentes de agua subterráneas.

El estudio realizado en la microcuenca río Tigre pretende solucionar dichas limitantes, a partir de la determinación de la ubicación geográfica de las áreas con potencial de recarga hídrica y la estimación cuantitativa del contenido volumétrico de éstas. Para lo cual se recurrió a la infiltración como principal indicador del proceso de entrada del agua a nivel del subsuelo.

Para esto, se consideraron tres etapas fundamentales e interrelacionadas, 1) reconocimiento de variables geoambientales (pendiente, textura de suelo y relieve), y antropogénicas (uso de la tierra) con relación directa al proceso de entrada de agua en el suelo, a fin de determinar la correlación existente entre éstas y los parámetros respectivos de la infiltración, 2) la ejecución de pruebas de infiltración distribuidas sobre el área, que permitieron medir la capacidad de infiltración (Fp) y la conductividad hidráulica saturada (Ksat) y 3) la simulación de los procesos que actúan en la generación de caudal, a partir de un modelo hidrológico que permite estimar los volúmenes de recarga diarios.

Los resultados entre 1,72 y 85,4 mm/h para la Fp, y entre los 0,04 y 30,24 mm/h para Ksat, fueron utilizados junto con la textura - la cual mostró mayor correlación con la infiltración - para la determinación de las áreas con mayor potencial de recarga hídrica, determinando que la microcuenca presenta un 71,1% (3,9km^2) de zonas de aprovechamiento hídrico.

El modelo hidrológico estimó variaciones entre 0 y 36 mm al día de recarga acuífera, lo cual supondría aportes de 2 hasta 130 mm mensuales, principales responsables de mantener el caudal de los afluentes de la microcuenca durante la faltante de lluvias respectiva a la época seca de la vertiente Pacífica de Costa Rica.

Palabras clave: *Área con potencial de recarga hídrica, infiltración, capacidad de infiltración, conductividad hidráulica saturada, modelo hidrológico*.

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación microcuenca río Tigre, 2017. 6
Mapa 2. Ubicación de estaciones meteorológicas, 2017. 16
Mapa 3. Ubicación de sitios de muestreo, microcuenca río Tigre 20 17. 25
Mapa 4. Geología regional, microcuenca río Tigre, 2017 44
Mapa 5. Geomorfología regional, microcuenca río Tigre, 2017. 53
Mapa 6. Modelo Digital de Elevaciones, microcuenca del río Tigre, 2017. 55
Mapa 7. Pendientes microcuenca río Tigre, 2017. 57
Mapa 8. Clasificación superficial de suelos según textura, microcuenca río Tigre, 2017. 60
Mapa 9. Uso de la tierra actual microcuenca río Tigre, 2017. 66
Mapa 10. Hidrología microcuenca río Tigre, 2017. 71
Mapa 11. Capacidad de infiltración en la microcuenca río Tigre, 2017. 83
Mapa 12. Conductividad hidráulica, microcuenca río Tigre, 2017. 85
Mapa 13. Áreas potenciales de recarga hídrica, microcuenca río Tigre, 2017. 89
Mapa 14. Áreas potenciales de recarga hídrica y uso de la tierra, microcuenca río Tigre, 2017 91
Mapa 15. Áreas potenciales de recarga hídrica y unidades geológicas, microcuenca río Tigre, 2017 93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estaciones meteorológicas. 17
Figura 2. Triángulo textural modificado para la prueba del “Tacto” 19
Figura 3. Infiltrómetro de doble anillo 24
Figura 4. Curva típica de infiltración. 27
Figura 5. Modelo conceptual. 31
Figura 6. Roca madre meteorizada, formación La Cruz 43
Figura 7. Rocas origen sedimentario e ígneo, formación Peña Negra. 46
Figura 8. Talud con fragmentos de andesita en una matriz sedimentaria. 46
Figura 9. Talud del miembro Tranquerillas 47
Figura 10. Pliegue alticlinal y sinclinal según sus flancos. 49
Figura 11. Actividad tectónica y erosiva de la cordillera de Talamanca. 50
Figura 12. Proceso erosivo. 50
Figura 13. Interacción de la actividad agrícola y urbana con la conformación del relieve 51
Figura 14. Trocha para la extracción maderera en la parte alta de la microcuenca 52
Figura 15. Valle en V . 52
Figura 16. Deslizamiento en la vertiente sur de la quebrada Tarbaca 54
Figura 17. Cárcava 54
Figura 18. Plasta de 15cm de largo y perfil (30cm) 59

Figura 19. Plasta de 8cm de largo 59
Figura 20. Cobertura boscosa 62
Figura 21. Bosque primario. 62
Figura 22. Bosque secundario 62
Figura 23. Bosque en condiciones húmedas 63
Figura 24. Plantación forestal. 63
Figura 25. Parche de suelo descubierto 64
Figura 26. Trocha 64
Figura 27. Pastos con presencia de árboles dispersos 64
Figura 28. Charral 65
Figura 29. Cultivo de café 65

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. *Promedio diario de temperatura (°C), microcuenca río Tigre, 2016-2017* 35
Gráfico 2. *Promedio mensual de temperatura (°C), microcuenca río Tigre, 2016 – 2017.* 36
Gráfico 3. *Promedio diario de humedad relativa (%), microcuenca río Tigre, 2016-2017* 37
Gráfico 4. Promedio mensual de humedad relativa (%), microcuenca río Tigre, 2016-2017. .. 38
Gráfico 5. *Total mensual de precipitación (mm),* 39
Gráfico 6. *Total diario de precipitación (mm), microcuenca río Tigre, 2016-2017* 40
Gráfico 7. *Total mensual de evapotranspiración potencial (mm), microcuenca río Tigre, 2016-2017* 41
Gráfico 8. *Total diario de evapotranspiración potencial (mm), microcuenca río Tigre, 2016-2017* 42
Gráfico 9. *Perfil topográfico, microcuenca río Tigre, 2017* 54
Gráfico 10. *Clasificación de suelos por textura, microcuenca río Tigre, 2017.* 58
Gráfico 11. *Uso de la tierra, microcuenca río Tigre, 2017.* 61
Gráfico 12. *Hidrograma unitario de la microcuenca río Tigre, 2016-2017* 68
Gráfico 13. *Perfil longitudinal de los ríos, microcuenca río Tigre, 2017* 70
Gráfico 14. *Balance hídrico mensual de la microcuenca río Tigre (septiembre 2016-agosto 2017).* 72
Gráfico 15. *Distribución de población por grupos quinquenales,microcuenca río Tigre, 2017.* 75
Gráfico 16. *Pruebas de infiltración, microcuenca río Tigre 2017.* 77
Gráfico 17. *Tasa de infiltración por lapso de tiempo, microcuenca río Tigre, 2017* 79
Gráfico 18. *Tasa de infiltración (mm/h), microcuenca río Tigre, 2017* 80
Gráfico 19. *Ejemplos curvas de ajuste de los datos*, microcuenca río Tigre, 2017 81
Gráfico 20. *Correlación de variables respecto a la capacidad de infiltración (Fp) y la conductividad hidráulica saturada (Ksat).* 87
Gráfico 21. *Distribución del pot*encia*l de recarga hídrica en la microcuenca río Tigre* 88

Gráfico 22. *Posibilidad de recarga muy alta, alta y moderada por uso de la tierra, microcuenca río Tigre, 2017.* 90
***Gráfico 23**. Posibilidad de recarga muy alta, alta y moderada por unidad geológica, microcuenca río Tigre, 2017.* 92
Gráfico 24. *Correlación entre los parámetros del modelo* 95
Gráfico 25. *Simulaciones de caudal diario, microcuenca río Tigre, septiembre 2016 – septiembre 2017.* 99
Gráfico 26. *Simulaciones de recarga hídrica, microcuenca río Tigre, septiembre 2016 – septiembre 2017.* 100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Clasificación de pendientes según microrelieve.* 21
Tabla 2. *Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según textura* 29
Tabla 3. *Rangos de los parámetros del modelo hidrológico* 33
Tabla 4. *Estadísticos de las variables meteorológicas, microcuenca río Tigre, 2016-2017.* 34
Tabla 5. *Parámetros morfométricos, microcuenca río Tigre* 67
Tabla 6. *Población por sexo y distrito en la microcuenca río Tigre, 2011.* 74
Tabla 7. *Población total proyectada para el año 2025 en la microcuenca río Tigre* 76
Tabla 8. *Estadística de los parámetros de capacidad de infiltración* 82
Tabla 9. *Resumen estadístico valores de los parámetros aceptados* 96
Tabla 10. *Flujos y depósitos de la precipitación, microcuenca río Tigre, 2016 - 2017.* 97
Tabla 11. *Acumulados mensuales estimados, microcuenca río Tigre* 101

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de variables por sitio de muestreo 114
Anexo 2. Tabla para pruebas en campo 116
Anexo 3. Código fuente de programación 117

CAPÍTULO 1. ASPECTOS SUSTENTATORIOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso que forma parte de todos los procesos naturales de la tierra, de allí su importancia para permitir la existencia de cualquier tipo de vida, por el papel que juega en las actividades propias de los seres humanos, tales como el abastecimiento de agua potable para las labores domésticas, la agricultura, industria, comercio y recreación, así como para la generación de electricidad y el mantenimiento de la salud (Blanco, 2009). Por otra parte, el agua como recurso de bajo costo es limitada, porque debe reunir condiciones de pureza bastante altas; especialmente aquella que se usa para consumo humano.

A pesar de su importancia, tanto el agua subterránea como la superficial son recursos limitados y sumamente frágiles, reconociéndose que las zonas estratégicas de recarga hídrica presentan alta vulnerabilidad, determinada por el grado de erosión, compactación de suelos y deforestación. Esto ha sido generado por el desarrollo de actividades agropecuarias, industriales, turísticas y urbanísticas mal planificadas que se suman a la negligencia, falta de conciencia y el desconocimiento de la población sobre la ubicación de esas áreas. Además de la falta de obligación para protegerlas, también se pueden mencionar la carencia de estudios técnicos y profesionales que brinden herramientas que permitan un manejo sostenible en las mismas (FONAES, 2002).

Debido a lo anterior, los recursos hídricos requieren de una gestión acorde a las circunstancias del entorno natural y social, dada la necesidad que tienen todos los seres humanos por ese bien que les es indispensable, en tanto satisface sus necesidades vitales. Por ello, la investigación enfatiza la importancia de saber de dónde se obtienen los recursos, conociendo específicamente los sitios de recarga, así como la manera en qué se están utilizando los mismos, a fin de establecer un diagnóstico que determine el estado en el que se encuentran para poder reconocer las características que presentan esas zonas y determinar la disponibilidad y la continuidad del agua.

Tales aspectos, son abordados en la presente investigación, por la importancia de conocer la naturaleza de las aguas subterráneas y superficiales, las cuales son el insumo para el

abastecimiento poblacional, con la finalidad primordial de modelar hidrológicamente y delimitar las áreas de recarga hídrica en la microcuenca del río Tigre. A través de un análisis geoambiental que permita establecer las zonas con mayor y menor potencial hídrico, así como la determinación de la infiltración en las mismas, y la estimación cuantitativa de la recarga acuífera, con lo cual se pretende brindar herramientas prácticas que le permitan una gestión local y participativa a la Asociación Administradora del Acueducto Rural y Alcantarillado Sanitario (ASADA) San Gabriel de Aserrí.

1.2. PROBLEMA DE ESTUDIO

El crecimiento poblacional conlleva efectos considerables para el medio ambiente y ha manifestado los impactos perjudiciales sobre el ser humano. La transformación a la que se ha sometido la naturaleza por necesidades humanas ha tenido repercusiones negativas importantes que hoy en día están afectando los recursos indispensables para la supervivencia humana.

Este es el caso de la expansión urbana, deforestación, sobreexplotación de los elementos naturales, aumento de la demanda, contaminación y otros efectos asociados. Todo esto ha generado la degradación, reducción y en algunos casos escasez de recursos ambientales como el agua, el aire puro, el suelo, además de productos maderables y de consumo.

Costa Rica no escapa a este fenómeno y sus repercusiones, ya que ha experimentado un aumento de la población, pasando de tener 1.625.000 habitantes en 1968 (Gómez, s.f) a 4,3 millones en el 2011 (INEC, 2012). Una de las consecuencias más importantes de este proceso radica en la expansión de los límites del núcleo urbano conocido como la Gran Área Metropolitana (GAM) hacia áreas periurbanas y rurales.

Las Asociaciones Administradoras de Acueductos Rurales (ASADAS), abastecen al 27% de población del país (Soto, 2014). Tales acueductos comunales son entes descentralizados del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), y presentan una serie de debilidades y limitaciones en términos de solidez financiera y faltantes de formación en los niveles técnicos y profesionales que les impide fortalecer la gestión de los recursos hídricos (Ballestero, 2009).

En el distrito de Tarbaca y sus alrededores, cerca de la microcuenca río Tigre, la alteración del medio ambiente no ha alcanzado límites críticos irreparables, pero tampoco existe un control adecuado de la modificación humana que impida que esto suceda en el futuro.

Por lo anterior, la Asociación Administradora de Acueductos Rurales (ASADA) San Gabriel ha manifestado una creciente preocupación por el estado de la microcuenca río Tigre, la cual administra. Esto debido a las recientes reducciones en la cantidad de agua captada de sus afluentes y la degradación de su calidad, producto de la construcción de viviendas y comercios en las cercanías y el aumento en el número de usuarios a los que abastecer.

Esta situación se ve agravada por el hecho de que los alrededores de los ríos y las áreas de recarga hídrica no cuentan con límites de protección, tanto por encontrarse en terrenos privados como por la falta de conocimiento y potestad de la ASADA para ejecutar y validar los reglamentos concernientes existentes en la política nacional. Es en este sentido, que se comprueba la necesidad de dicha institución de identificar y delimitar adecuadamente las áreas de recarga hídrica, así como de conocer la cantidad de agua con la que disponen a fin de, posteriormente, gestionar de la mejor manera los recursos hídricos.

Por lo anterior, el problema de estudio se deriva de un proceso de expansión urbana descontrolado que aunado a la ausencia de límites de protección establecidos en la política ambiental y la falta de conocimiento sobre la ubicación exacta de las áreas de recarga hídrica, está provocando una afectación en la calidad y cantidad de los recursos hídricos en la microcuenca río Tigre, los cuales abastecen a los usuarios de la ASADA San Gabriel de Aserrí.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La temática de los recursos hídricos ha resultado ser de relevancia social, además de ser pertinente, ya que es un asunto que debe tratarse con urgencia para evitar los inconvenientes de escasez que sufren hoy día familias, inversionistas, industrias, agricultores y ganaderos. De allí se suscita que el tema sea uno de los de mayor preocupación y generador de conflicto en la sociedad costarricense, así mismo ha sido el tema por el cual tanto a nivel nacional como local ha promovido la organización social.

Se reconoce la necesidad de tratar esta temática debido a la urgencia de disponer de datos o información actual que proporcionen los insumos para tener un mejor control sobre la disponibilidad y el uso que se debe hacer de los recursos. Lo anterior se menciona ya que en diferentes ocasiones se afirma que “en el país no existe información actualizada de tipo integral sobre el recurso hídrico…y la mayoría de datos que se generan se acumula en algunas

pocas organizaciones públicas…" (CIESA, 2010 citado por Morales, s.f., p. 9). Tal situación ha llevado a que no se logre avanzar en una respuesta efectiva en la gestión de los recursos hídricos y provocando a su vez que la población continúe desinformada.

Referente al contexto del área de estudio, se llevó a cabo un estudio experimental en la microcuenca río Tigre. Con la finalidad de proporcionar datos y una evaluación que le permita, tanto a la ASADA San Gabriel como a las comunidades (Tigre, Tarbaca, Chirogres, Tranquerillas, Bajos de Fraga y Joya) que habitan tanto dentro y en los alrededores del área de estudio, reconocer el potencial y el estado en el que se encuentra el recurso a causa del uso que se esté haciendo del medio, el cual positiva o negativamente impacta en la disponibilidad, calidad y continuidad del agua.

La razón principal que motivó el desarrollo de la investigación son las reducciones en la cantidad de agua que se manifiestan en las temporadas secas. Las cuales preocupan a la ASADA San Gabriel e incitan a la búsqueda de nuevas zonas de captura con las cuales abastecer a la población usuaria; se agrega además los cambios en el uso, la deforestación y el crecimiento urbano que en conjunto amenazan las fuentes de agua.

El presente proyecto proporciona insumos que le permitan a la ASADA San Gabriel fortalecer su gestión a fin de procurar un servicio óptimo. En donde puedan tomar las medidas necesarias para evitar los deterioros que se puedan presentar en el ambiente. Lo cual a su vez provocará que las poblaciones abastecidas se involucren y tomen conciencia acerca de que el detrimento en su entorno natural tendrá como consecuencia un deterioro en el recurso agua que incurrirá en la calidad de vida de cada uno de ellos.

Por consiguiente, entre los beneficiados de esta investigación están la ASADA San Gabriel, como beneficiario directo, al ser el ente que requiere de los insumos derivados del proyecto y además porque es quien se abastece del agua que proporciona la microcuenca del río Tigre. Los beneficiarios indirectos corresponden a las poblaciones servidas por la ASADA, las cuales se refieren a las comunidades de San Gabriel, Tranquerillas, Calle Mora, Calle los Ángeles, La Fila Arriba y Las Brisas.

Además, la población que se verá favorecida y que constituyen los beneficiarios indirectos ilegítimos, corresponden a las comunidades asentadas en la microcuenca hidrográfica río

Tigre. Ya que a pesar de que éstas no son usuarios de la ASADA San Gabriel, las acciones que lleve a cabo la misma en términos de mejora ambiental (una vez que disponga de los insumos), les será de provecho en cuanto al fortalecimiento de su calidad de vida.

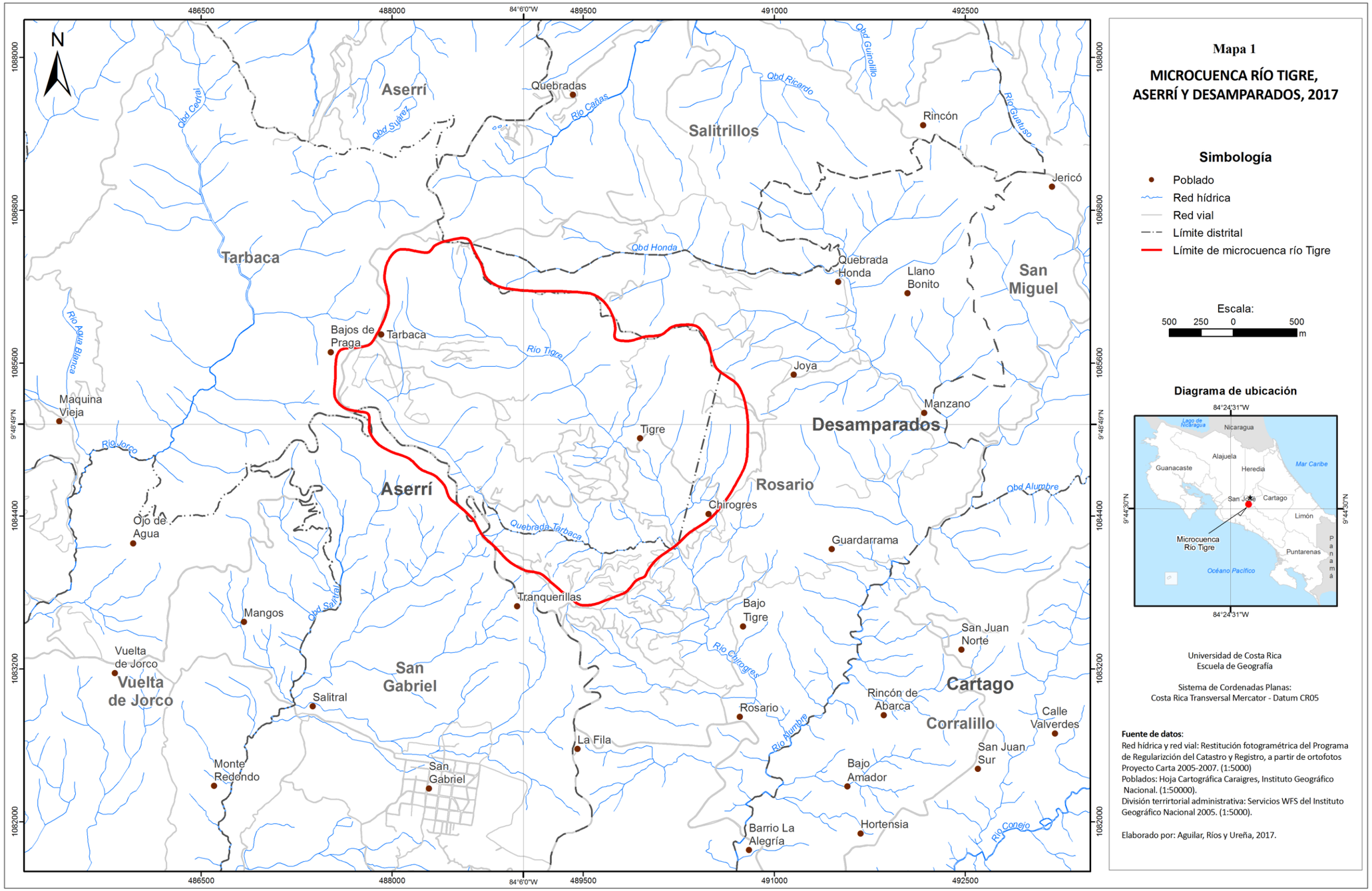
1.4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio posee una extensión de 5,5 km² y se ubica entre las coordenadas métricas, 487.540 y 490.800 FE, 1.083.700 y 1.086.570 FN, del sistema de coordenadas Costa Rica Transversal de Mercator 2005; ésta a su vez se ubica en la hoja cartográfica Caraigres 3.345-II del Instituto Geográfico Nacional. Administrativamente, un 15,2% de la microcuenca pertenece al cantón Desamparados (0,85km²) y un 84,8% al cantón Aserrí (4,7km²), provincia San José (Mapa 1).

Cabe destacar, que se trata de una microcuenca conformada por los dos tributarios del río Chirogres, los cuales son: quebrada Tarbaca y río Tigre; observaciones y mediciones realizadas en campo a través de aforos por parte de la ASADA San Gabriel han demostrado que el río Tigre es el colector principal, por lo cual se le ha asignado al área de estudio el nombre de microcuenca río Tigre.

Dentro de las características de la unidad hídrica se destaca:

- Los cursos superficiales de agua de la microcuenca río Tigre son utilizados por la ASADA San Gabriel de Aserrí, para abastecer al distrito central San Gabriel y otras localidades cercanas como Tranquerillas, Calle Mora, Calle los Ángeles, la Fila Arriba y las Brisas.
- La ASADA San Gabriel trabaja de manera separada y diferenciada cada tributario, considerándolos sistemas totalmente independientes.
- El sistema Quebrada Tarbaca, abastece un total de 345 viviendas y locales comerciales ubicados en los barrios de Tranquerillas, Calle Mora, Calle los Ángeles, la Fila Arriba y las Brisas. Por su parte, el sistema río Tigre abastece 1.273 edificaciones que comprenden los hogares, comercios y servicios de la comunidad de San Gabriel (Venegas, 2012).
- La ASADA cuenta con un total de 1.806 abonados los cuales corresponde a usuarios que pagan por el servicio que reciben.


Mapa 1
MICROCUENCA RÍO TIGRE, ASERRÍ Y DESAMPARADOS, 2017
Simbología
Poblado
Red hídrica
Red vial
Límite distrital
Límite de microcuenca río Tigre
Escala:
500 250 0 500
m
Diagrama de ubicación
Lago de Nicaragua
Nicaragua
Alajuela
Guanacaste
Heredia
Mar Caribe
San José
Cartago
Limón
Microcuenca Río Tigre
Puntarenas
Panamá
Océano Pacífico
84°24'31"W
9°44'30"N
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Red hídrica y red vial: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularizción del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
486500
488000
84°6'0"W
489500
491000
492500
1088000
1086800
1085600
1084400
1083200
1082000
9°48'49"N
Aserrí
Quebradas
Salitrillos
Rincón
Jericó
Tarbaca
Quebrada Honda
Llano Bonito
San Miguel
Bajos de Praga
Tarbaca
Joya
Manzano
Maquina Vieja
Tigre
Desamparados
Aserrí
Rosario
Chirogres
Ojo de Agua
Guardarrama
Tranquerillas
Bajo Tigre
Mangos
San Juan Norte
Vuelta de Jorco
Vuelta de Jorco
San Gabriel
Salitral
Rincón de Abarca
Cartago
Rosario
Corralillo
Calle Valverdes
La Fila
San Juan Sur
Monte Redondo
San Gabriel
Bajo Amador
Hortensia
Barrio La Alegría
Río Cachí
Río Cañas
Qbd Ricardo
Qbd Guinollito
Río Guatuso
Qbd Cedral
Qbd Suárez
Qbd Honda
Río Agua Blanca
Río Tigre
Río Jorco
Qbd Alumbre
Quebrada Tarbaca
Qbd Santal
Río Chirogres
Río Alumbre
Río Conejo

1.5. ANTECEDENTES

Los recursos hídricos y en especial las áreas de recarga son temas de gran interés por la relevancia que posee el agua como elemento indispensable para la vida. Por ello dicha temática se enmarca dentro de una serie de estrategias y proyectos que han definido términos de protección que contribuyen a conservar las características naturales de las fuentes de agua. Por lo tanto, en este apartado, se hace mención al manejo que ha tenido el tema desde el ámbito legal, político y proyectos de investigación realizados por terceros.

1.4.1. Recurso hídrico en el ámbito legal costarricense

El marco legal costarricense dispone de leyes vigentes que definen medidas a fin de proteger el recurso hídrico nacional, tal es el caso de la Ley de Aguas N°276 la cual determina que los ríos, sus afluentes y las aguas subterráneas son de dominio público, y cuyo aprovechamiento debe ser autorizado por el Ministerio de Ambiente y Energía. Además que las aguas potables de los ríos estarán afectas al servicio de cañerías en poblaciones, por lo que se declara como reserva de dominio a favor de la nación las tierras que circunden los sitios de captación de agua potable en un perímetro no menor a 200m de radio, así como también las zonas forestales que protegen los terrenos en los cuales se produce la infiltración y aquellos que dan asiento a cuencas hidrográficas y los márgenes de los cursos permanentes (Asamblea Legislativa de la República, 1942).

Además, la Ley Forestal N°7575 que establece parámetros de protección de las áreas que bordean nacientes, las riberas de los ríos, quebradas y arroyos, áreas de recarga y los acuíferos, también hace hincapié en el manejo de los bosques para mantener la estabilidad del recurso hídrico (Asamblea Legislativa de la República, 1996).

Por otra parte, la Ley Orgánica del Ambiente N°7554 estipula el resguardo de los ecosistemas que regulan el régimen hídrico y la protección de cada uno de los componentes de las cuencas hidrográficas para mantener el equilibrio del sistema agua (Asamblea Legislativa de la República, 1995). La Ley de Biodiversidad N°7788 recomienda utilizar el programa de pago de servicios ambientales para incentivar la sostenibilidad del recurso por medio de los acueductos rurales y la protección de zonas de recarga (Asamblea Legislativa de la República, 1998).

1.4.2. Recurso hídrico en el ámbito político costarricense

Costa Rica actualmente se encuentra en proceso de gestionar planes, políticas y estrategias de planificación hídrica, tal es el caso del actual *Plan de Gobierno* en el que se mencionan aspectos tales como la creación de un Plan Nacional de Recursos Hídricos moderno y enfocado en la planificación, tomando como unidad de análisis estratégica la cuenca. También se habla del fortalecimiento de las ASADAS como entes responsables del uso del recurso hídrico, así como incorporar a las municipalidades para que dentro de los planes de ordenamiento tomen en consideración la gestión integrada del uso de la tierra y del recurso hídrico.

Además, se pretende reforzar la normativa en cuanto a sanciones, a fin de garantizar el cuidado de las cuencas y mantos acuíferos, por lo que se pretende impulsar la aprobación de la Ley de Gestión Integrada de Recursos Hídricos y establecer un programa institucional para la protección y recuperación de las áreas de recarga acuífera en cuencas hidrográficas y nacientes de agua (Solís, 2013).

Se cuenta también con el Plan Nacional de Ordenamiento Territorial, dentro de sus lineamientos se pretende impulsar el manejo integral de las cuencas hidrográficas en los diversos planes de ordenamiento territorial, y se incentiva la gestión conjunta de las cuencas como estrategia para la protección y conservación del recurso hídrico (Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, 2013).

1.4.3. Proyectos de investigación con temas afines al recurso hídrico

La temática referente a los recursos hídricos se ha ampliado de modo que se han llevado a cabo una serie de trabajos de investigación que han venido a sustentar la faltante de información que en su momento pudo darse tanto en Costa Rica como fuera del país, de los cuales se exponen a continuación sus alcances.

En Nicaragua se llevó a cabo la elaboración de una metodología participativa con el objetivo de identificar zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. Dicha metodología se aplicó en la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa. Integrando para ello conocimiento local, técnico y científico para finalmente proponer estrategias concretas para el manejo de las áreas de recarga (Matus, 2007).

En Panamá se realizó una investigación en la subcuenca del río Grande, municipio de Ipala, departamento Chiquimula con el fin de generar información hidrográfica. Identificando de ese modo las zonas potenciales para la recarga hídrica y generar así panoramas reales y actualizados con bases científicas. Que permitirán la elaboración de planes de manejo integrales para cada una de las zonas determinadas (Sosa, 2009).

Ramírez y Vargas (2010), en Honduras llevaron a cabo una delimitación de las zonas de recarga acuífera de los sistemas montañosos de El Volcán y La Chorrera. Mediante la separación entre la metodología del levantamiento y la metodología de la evaluación, en la primera parte se utilizó material cartográfico en donde se estableció dichas áreas en un mapa a escala 1: 50.000; y en la segunda parte por medios empíricos y mucho más confiables se corroboró la delimitación hecha anteriormente.

En la subcuenca del río Zaratí, se realizaron talleres participativos en las comunidades que se benefician con este río. Mediante la unificación de juicios (tanto de los actores locales como del grupo técnico) se identificaron las potenciales áreas de recarga para el río Zaratí. Tomando como base el conocimiento local y el reconocimiento del área de estudio (González, 2011).

Por otra parte, en México se hizo un estudio con el cual se propusieron ciertas áreas como zonas estratégicas de recarga en la cuenca de México con el fin de contar con decretos de protección. Lo anterior se desarrolló debido a la falta de instrumentos legales para delimitar y proteger las zonas de recarga de su posible impermeabilización y para restringir las actividades a desarrollar en su superficie que puedan afectar la cantidad o calidad del agua infiltrada (Lema, Melgoza, Garay, Monroy, Fresan, Pérez, Moctezuma, s.f.).

En el ámbito costarricense no se tienen legalmente definidas aquellas áreas de recarga hídrica, sin embargo, por la importancia de reconocerlas y protegerlas se han llevado a cabo investigaciones referentes al tema, donde destacan:

Méndez, Calvo y Lozano (2000) llevaron a cabo un diagnóstico biofísico con el fin de facilitar el manejo de los recursos hídricos en las comunidades de Bijagual, Delicias y Sur del cantón Turrubares. También determinaron las condiciones ideales del uso de la tierra para garantizar

el abastecimiento y calidad, para el consumo humano y la producción agrícola en comunidades rurales.

La investigación denominada *Identificación y manejo de las áreas de recarga hídrica en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito San Carlos, Costa Rica* desarrollada por Blanco (2009), contextualiza el uso inadecuado del suelo dentro de las áreas de recarga hídrica (ARH) y éstos representan un verdadero riesgo para la preservación y seguridad del recurso. Incluye temas relevantes para la investigación en términos técnicos y descriptivos de la cuenca como por ejemplo: Caracterización de variables biofísicas y métodos para identificar ARH.

Bolaños (2011), realizó una propuesta de reforestación y recuperación de la cobertura vegetal en la zona de recarga hídrica de las fuentes captadas por la ASADA de Higuito ubicada en la microcuenca del río Purires en el Guarco de Cartago. Para contribuir con el mantenimiento de la calidad del recurso hídrico y los ecosistemas asociados que se desarrollan en la zona.

Mora y Ruiz (2013), que desarrollaron un estudio en la parte media y alta de las subcuencas Frijoles y Guacalito, localizadas en el sector norte del volcán Miravalles. Con el objetivo de determinar aquellas áreas potenciales de recarga hídrica a través de la integración de variables biofísicas. Además se propusieron lineamientos de protección de acuerdo a la condición de uso de la tierra en las áreas de recarga hídrica.

Otros estudios realizados se han enfocado en el área de las ciencias Geológicas como lo es el caso de Arellano (2005) en cuyo trabajo se contextualiza la necesidad de un modelo hidrogeológico para definir aspectos como potencial de extracción, recarga del acuífero, y zonas de potencial contaminación, finalizando con un plan de gestión para el aprovechamiento.

Además, se incluye la investigación de Fuentes (2006) la cual se inserta en el contexto de la importancia para el país de conocer el estado y disponibilidad de sus recursos naturales, en especial el agua. Para ello se analizó la vulnerabilidad en la cuenca del río Potrero, siendo una localidad de gran fragilidad hídrica por la cantidad de meses secos que atraviesa. El proyecto como tal incluye una caracterización hidrogeológica indispensable para poder definir ciertos aspectos relevantes en la cuenca y su interacción directa o indirecta con el recurso. Aborda

temas de interés como lo son por ejemplo: Una base de análisis geológico, análisis hidrológico y vulnerabilidad del acuífero.

Siguiendo el lineamiento anterior se presenta el estudio de Ramírez (2007) cuya investigación trata sobre el desarrollo de un modelo de la hidrogeología del cantón occidental de Grecia provincia Alajuela. Y en una propuesta de zonificación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos que se ubican dentro del sector.

La temática del agua va tomando poco a poco la importancia que requiere, de ahí que algunas comunidades o incluso municipalidades, han empezado a tomar medidas al respecto. Como lo es el caso de la Municipalidad de Cartago que en el año 2001 contrató los servicios profesionales de una geóloga. La cual a través del trabajo de campo geológico e hidrológico así como un análisis climatológico, estudio de suelos, medición de la escorrentía y pruebas de infiltración determinó la ubicación de tres áreas de recarga acuífera (Guzmán y Díaz, 2007).

Se puede determinar que investigaciones u estudios referentes a modelización hidrológica, delimitación y estimación de las áreas de recarga hídrica aún no se presentan en la zona de San Gabriel de Aserrí, por ende se evidencia un vacío de información que el presente proyecto oportunamente pretende solucionar.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo general

Modelar hidrológicamente la recarga potencial en la microcuenca río Tigre a fin de simular la cantidad de líquido disponible en las áreas de recarga hídrica, desde un enfoque integral de la Geografía.

1.6.2. Objetivos específicos

1. Reconocer a través de variables geoambientales el estado actual de la microcuenca río Tigre.
2. Determinar la capacidad de infiltración y la conductividad hidráulica saturada para delimitar las áreas de recarga hídrica en la microcuenca.
3. Diseñar y aplicar un modelo hidrológico de simulación, a partir de datos hidrometeorológicos, para realizar estimaciones potenciales de volúmenes de recarga acuífera en la microcuenca.

1.7. MARCO TEÓRICO

Del contenido total de agua en el planeta, solo el 3% es disponible y apto para el mantenimiento de los ecosistemas terrestres y el abastecimiento humano. La distribución de este porcentaje de agua fresca no es uniforme, un 68,7% se encuentra en forma sólida en los casquetes polares y glaciares, 0,3% de forma líquida, en la superficie terrestre (lagos, ríos y pantanos) y un 30,1% en el subsuelo (Bralower y Bice, s.f). Adicionalmente existe una desequilibrada repartición espacial de las fuentes de suministro de agua fresca, lo cual ha provocado problemas de abastecimiento y estrés hídrico en algunos países.

En el sistema climático terrestre, comprendido por los subsistemas: hidrósfera, criósfera, litósfera, atmósfera y biósfera, el agua juega un papel indispensable como ingrediente activo en el intercambio entre dichos subsistemas y por tanto en la integración necesaria para mantener este complejo sistema (Hidalgo, 2010). De ahí la importancia del ciclo hidrológico, el cual hace alusión al bucle o sucesión de fenómenos referentes a la circulación y transferencia del agua, en distintos estados, que se produce entre la atmósfera y la superficie terrestre, y que involucra diversos procesos particulares como lo son: la precipitación, el agua almacenada, la condensación, el escurrimiento superficial, el escurrimiento subterráneo, la infiltración y agua freática, la escorrentía superficial, escorrentía subterránea, evapotranspiración y la percolación (Blanco, 2009).

El ciclo del agua, como también se denomina, puede ser analizado en diferentes escalas, según el estudio que se realice. En Geografía es usual estudiarlo a nivel de cuenca hidrográfica, ya que se trata de un área natural de captación y concentración de agua superficial así como subterránea. Siendo un territorio delimitado esencialmente por las zonas de escorrentía que convergen hacia un mismo cauce (González, 2011). En dicho espacio, se concentran e interrelacionan todos los procesos hidrológicos antes mencionados con los diferentes ecosistemas y actividades humanas que se encuentren dentro de sus límites.

Este sistema fluvial o hídrico, comprende los canales y laderas inmediatas, dentro de una organización jerárquica comúnmente utilizada para la determinación del orden y nombre de una cuenca hidrográfica. De acuerdo a la disposición de las redes de drenaje, se califican los cauces como ríos, quebradas, arroyos, entre otros; mientras que las laderas se diferencian entre cuenca, subcuenca y microcuenca; ambos elementos vinculados en la determinación del nombre

específico de un área de captación (Arce, 2001). Se hace referencia a una cuenca a aquellas con superficies mayores a los 1.000 km^2, subcuencas a las áreas de 10 a 1.000 km^2 y a microcuencas a las que poseen áreas menores a 10 km^2 (Birkel, 2007). También se considera que una cuenca es aquella que posee orden de cauces 6 y 7, subcuencas a órdenes de cauces 4 y 5, y microcuencas a las que poseen orden de cauces 1,2 y 3 (Aguirre, 2007).

La consideración del ciclo hidrológico en un espacio delimitado facilita el análisis y medición de los flujos de agua dentro del terreno, simplificando el balance hídrico, el cual hace referencia al equilibrio, en un área y tiempo específico, entre las entradas del sistema (precipitación) con respecto a los flujos negativos o egresos, que incluye la evapotranspiración, la escorrentía (directa, y de base) y el almacenamiento, tanto superficial como subterráneo. Este último proceso, el estudio del subsuelo, es uno de los temas más modernos de la Hidrología, pero de igual o mayor relevancia debido a la importancia de éste para la generación de caudales durante las épocas de sequía.

De manera general el inicio del bucle se concibe desde la caída de precipitaciones en el sistema, las cuales al alcanzar la superficie pueden seguir un recorrido de forma lateral sobre las laderas de la cuenca hasta llegar a un cauce, proceso conocido como escorrentía superficial. Parte de las aguas precipitadas continúa un movimiento vertical a través del suelo, fenómeno designado como infiltración, y reconocido por el descenso del agua hacia capas internas de la matriz del suelo (Fattorelli y Fernández, 2011).

Cada sector específico tiene asociado una capacidad de infiltración, la cual es concerniente a la cantidad máxima de agua o bien el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie, cuando es mantenido en contacto con el agua a la presión atmosférica (Pizarro, Flores, Sangüesa y Martínez, s.f.). Además está directamente relacionado con las condiciones y características de la superficie del suelo: tipo, grado de humedad, presencia de sustancias coloidales, la acción de la precipitación sobre éste, la cubierta vegetal, la temperatura y la acción del hombre y animales (Maderey, 2005).

Del proceso de infiltración se deriva la recarga hídrica, ya que para que ésta suceda es necesario que el agua procedente del exterior se incorpore de manera natural en el acuífero dándose como resultado las llamadas “áreas de recarga hídrica”. Las cuales según el reglamento de la Ley Forestal

se definen como "*superficies de terrenos en las cuales ocurre la principal infiltración que alimenta un determinado acuífero*" (Gaceta, 1997).

Dichas áreas involucran un conjunto de aspectos de ámbito geológico, geomorfológico, y de ámbito medioambiental, que comprenden características climáticas, físicas y biológicas de los suelos concernientes, todos interrelacionados en el proceso de ingreso del agua en la matriz del terreno, de la cual penden los depósitos freáticos.

En el contexto nacional, las características topográficas y climáticas presentadas, hacen de Costa Rica un país privilegiado en relación a los recursos hídricos, registrándose promedios anuales acumulados de precipitación de 3.297 mm, los cuales se convierten en 996 mm de evapotranspiración y cerca de 2.215 mm de caudal para las 34 cuencas hidrográficas en las que se divide el país, con un estimado de volumen disponible per cápita de 26.221 m^3/persona/año para el 2005 (Guzmán y Calvo, 2013).

Con dichos potenciales hídricos se ha dado lugar a represas de generación hidroeléctricas, turismo, industria y actividades agrícolas que toman gran porcentaje de estos recursos, con lo cual la oferta para consumo humano es más reducida. Es también relevante mencionar que debido a la condición privilegiada respecto al agua, que se ha llevado a cabo el impulso de proyectos de ley como lo es la Ley de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (Solís, 2013), así como planes que pretenden impulsar el manejo integral de las cuencas hidrográficas como lo es el Plan Nacional de Ordenamiento Territorial (Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, 2013).

El estimado de agua subterránea utilizable para el país es de 11 km^3, siendo un recurso crecientemente utilizado para suplir el aumento en la demanda y a la vez descuidado por la contaminación de los acuíferos, uso insostenible de la tierra y no tratamiento de las aguas residuales, lo cual hace de las zonas de recarga hídrica un depósito valioso y ampliamente vulnerable (Guzmán-Arias y Calvo-Alvarado, 2013) que requiere un manejo adecuado para la sostenibilidad de éste en una sociedad más demandante en conjunción con los faltantes de agua que el cambio climático pueda acarrear.

Dada la complejidad del ciclo del agua y los procesos concernientes a éste, se utiliza la modelización hidrológica. Que simplifica el comportamiento real del sistema físico (la cuenca

hidrográfica), a partir de la conceptualización teórica y matemática de los movimientos del agua en superficie. Por consiguiente, la modelización describe aspectos del sistema hídrico a fin de representar las relaciones entre las variables hidrológicas o bien para simular la estructura temporal o espacial de una variable. Teniendo también entre sus funcionalidades el modelado de ríos y cuencas, calidad de aguas, predicción de crecidas y riesgos hidrológicos (WHYCOS, 2005).

A partir de los modelos, es posible conocer la relación intrincada entre la caída de las lluvias y la generación de caudal en una cuenca, a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de ésta. Permitiendo simular y predecir los flujos, movimientos y depósitos del agua en el sistema, a fin de estimar eficientemente el comportamiento y la magnitud (abundancia y carencia) del agua (Chávarri, 2005) en una región o cuenca específica. Concibiéndose como una herramienta de gran utilidad para el manejo y gestión de los recursos hídricos a corto y largo plazo.

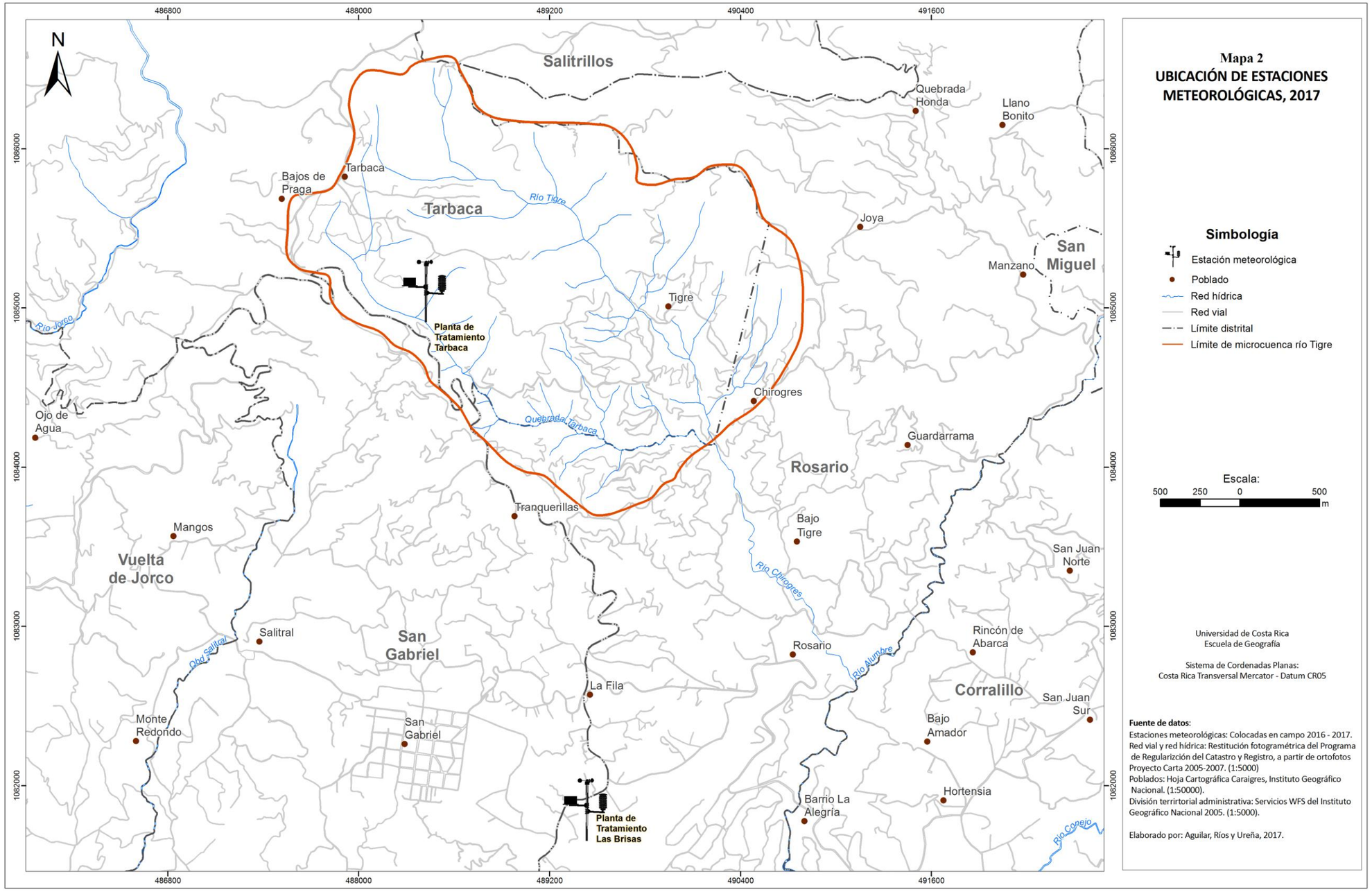
1.8. METODOLOGÍA

La metodología implementada en este proyecto de investigación, implicó un trabajo experimental que contempló la recolección y generación de información biofísica, el análisis integral de ésta, así como la medición de la capacidad de infiltración y la conductividad hidráulica en el área de estudio. Esta información fue utilizada para identificar y delimitar las áreas de recarga hídrica y aplicar un modelo hidrológico conceptual con el cual la ASADA San Gabriel de Aserrí puede estimar la recarga potencial de la microcuenca río Tigre.

1.8.1. Diagnóstico geoambiental de la microcuenca

La primera etapa considerada por el proyecto consistió en la caracterización biofísica de la microcuenca en cuestión. Recolectando la información que tuviera relación directa o indirecta con la infiltración y recarga hídrica. Por lo cual se reunió y generó datos sobre las variables climatológicas, geológicas, geomorfológicas, suelos, hidrografía y usos de la tierra.

Para la información climatología, se solicitaron los datos al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Pero debido a la lejanía evidenciada de las estaciones meteorológicas en relación con el área de estudio, se optó por la colocación de dos estaciones (Figura 1) prestadas por la Escuela de Geografía, una dentro y otra fuera de la microcuenca, por cuestiones de seguridad de las mismas (Mapa 2).


Mapa 2
UBICACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS, 2017
N
Salitrillos
Tarbaca
San Miguel
Rosario
Vuelta de Jorco
San Gabriel
Corralillo
Quebrada Honda
Llano Bonito
Bajos de Praga
Tarbaca
Río Tigre
Joya
Manzano
Tigre
Planta de Tratamiento Tarbaca
Río Jorco
Chirogres
Quebrada Tarbaca
Ojo de Agua
Guardarrama
Tranquerillas
Bajo Tigre
Mangos
San Juan Norte
Río Chirogres
Salitral
Río Alumbre
Rincón de Abarca
Rosario
Qbda Salitral
La Fila
San Juan Sur
Monte Redondo
San Gabriel
Bajo Amador
Hortensia
Barrio La Alegría
Planta de Tratamiento Las Brisas
Río Conejo
Escala:
500 250 0 500 m
Simbología
Estación meteorológica
Poblado
Red hídrica
Red vial
Límite distrital
Límite de microcuenca río Tigre
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Estaciones meteorológicas: Colocadas en campo 2016 - 2017.
Red vial y red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
486800
488000
489200
490400
491600
1086000
1085000
1084000
1083000
1082000

Dichas estaciones, marca Davis, se mantuvieron durante un año, con recolección de datos cada 30 minutos. Con lo cual se obtuvo un año meteorológico (setiembre 2016 a setiembre 2017) de información sobre precipitación, temperatura, humedad, viento, y demás variables de índole climáticos. La estación meteorológica dentro de la microcuenca río Tigre fue la utilizada finalmente para el análisis meteorológico, debido a su ubicación y por tener menor cantidad de datos faltantes, mientras la otra estación fue empleada para completar la información y revisar datos atípicos de la primera.

En la extracción de los datos de las estaciones meteorológicas, se utilizó el programa WeatherLink versión 5.9.3. Luego éstos fueron convertidos en promedios o totales, según corresponda (diarios y mensuales), mediante el uso del programa R Studio, mismo que se empleó posteriormente para la graficación de los resultados obtenidos.

Figura 1. Obsérvese a la izquierda la estación meteorológica ubicada en la planta de tratamiento Tarbaca a una altitud de 1671 m.s.n.m. y a la derecha la que se ubicó en la planta Las Brisas a una altitud de 1552 m.s.n.m.

El caso particular se presentó para la variable de evapotranspiración potencial, es decir la tasa máxima de evapotranspiración, que sucede en condiciones de disponibilidad de agua (Hartman, 2016). Para su obtención se recurrió a la utilización de los datos de temperatura y humedad de la estación ubicada dentro de la microcuenca en conjunto con los datos de radiación solar de la estación complementaria (fuera de la microcuenca). Esto por motivo, de que la segunda era la única que contaba con el piranómetro (sensor de radiación). El cálculo

se hizo a partir de un código establecido previamente que sigue la fórmula descrita por Dunn y Mackay (1995) para la estimación de la evapotranspiración potencial mediante la ecuación de Penman-Montheith, la cual es de uso recurrente debido la consideración de la influencia de la vegetación en el proceso hidrológico (Dunn y Mackay, 1995); presentada a continuación,

$$E_a = \frac{R_n \Delta + \frac{\rho C_p \delta e}{r_a}}{\lambda [\Delta + \Upsilon(1 + r_c/r_a)]}$$

Donde; *Rn* es la radiación neta en W m^{-2}, *ρ* es la densidad del aire en kg m^{-3}, C*p* es el calor específico del aire a presión constante (J kg^{-1} °C^{-1}), *δe* es el déficit de presión de vapor del aire (mbar), Δ es el gradiente de presión saturado de vapor en mbar °C^{-1}, γ es la constante psicométrica (mbar °C^{-1}), r_c es la resistencia de superficie, un valor para todas las plantas del cultivo analizado en s m^{-1},que depende del área foliar, λ es el calor latente de vaporización del agua en J kg $^{-1}$ y r_a es la resistencia aerodinámica también medida en s m^{-1} (Dunn y Mackay, 1995). A falta de más información al respecto, las variables r_c y r_a se trabajan con valores de un cultivo de referencia, 80 y 50 respectivamente.

La caracterización geológica se realizó tomando como base las estructuras extraídas del mapa geológico de la subcuenca del río Grande de Candelaria y río Pirrís elaborado por Luis Guillermo Brenes y la hoja geológica Caraigres escala 1:50.000. Mediante visitas de campo, se analizó la conformación litológica de perfiles estructurales, así como fragmentos de roca a fin de detallar a que formación geológica correspondían de acuerdo con la hoja Caraigres, así como también se fotografiaron afloramientos y alteraciones y se compararon con las descripciones geológicas dadas por Denyer y Arias (1991) citado en Sojo, Denyer, Gazel y Alvarado (2017).

La descripción geomorfológica se determinó a partir del reconocimiento de las geoformas y modelado como resultado de los procesos erosivos y de sedimentación, a través de la interpretación en campo; además del apoyo en el Modelo de Elevación Digital y la cartografía preliminar del sector norte de la hoja Cartográfica Caraigres del Atlas Geomorfológico de Costa Rica de Bergoeing y Brenes (2017).

Tanto para la caracterización geológica como para la geomorfológica se trató desde un contexto regional, a fin de analizar el entorno sobre el que se encuentra ubicada la

microcuenca. Así como para solventar la faltante de información a nivel detalle micro sobre geología y geomorfología del área de estudio.

Como parte del análisis geopedológico se consideró la propiedad física de textura del suelo que consiste en la proporción de partículas por tamaño (arcillas, limos y arenas); la combinación de estas tres fracciones determina la clase textural. Dicha propiedad tiene una serie de aplicaciones directas entre las que destaca el ámbito hidrológico para la determinación de tasa de infiltración y conductividad hidráulica (Pellegrini, 2014).

La textura del suelo se estimó directamente en campo a un total de 80 muestras (Anexo 1) extraídas entre 5 y 15cm de profundidad. Lo anterior se hizo mediante la técnica del "tacto", que consiste en humedecer una porción del suelo amoldarlo, amasarlo y hacer plastas (Milford, 1997). Reconociendo que la arena se presenta al tacto abrasivo y con gránulos identificables individualmente; el limo se siente como talco o harina y la arcilla se percibe como plastilina. Sin embargo, estos componentes la mayoría de los casos se presentan combinados (Pellegrini, 2014).

Mediante la repetición de dicho proceso se determinó la plasticidad según Milford (1997), la cual permite reconocer si el material edáfico cambia continuamente de forma bajo la acción de una presión aplicada y mantiene dicha forma al eliminarse la presión. Se midieron las plastas formadas y utilizando el triángulo textural modificado para la prueba del tacto se fue fijando la categoría textural (Figura 2).

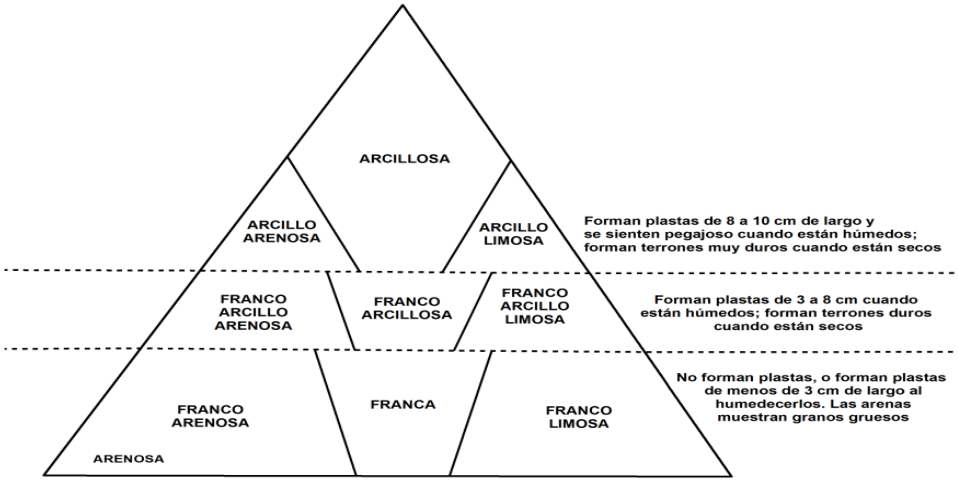


Figura 2. Triángulo textural modificado para la prueba del "Tacto"
Fuente: Milford, 1997.

Se determinó la consistencia del suelo con el objetivo de observar la resistencia del suelo a la deformación o ruptura, considerando para ello la propiedad de adherencia en húmedo de la masa del suelo. Tal cualidad determinó la capacidad de los materiales del suelo de adherirse a otros objetos, utilizando para ello la presión del material con los dedos pulgares e índices. Además se identificó el color en seco con la finalidad de utilizarlo como apoyo en la interpretación y clasificación de los suelos. Se usó el Sistema de Notación Munsell, éste define los parámetros de matiz, valor y croma del color del suelo y asigna un nombre (Pellegrini, 2014). La cartografía respectiva se realizó a partir del método determinístico conocido como Ponderado por el Inverso a la Distancia con sus siglas en inglés IDW, a fin de crear una superficie estimada a partir del conjunto de puntos dispersos.

El microrelieve de la microcuenca se obtuvo a partir de las curvas de nivel cada 10m realizadas a partir de la matriz de puntos de cada 10 m sobre el terreno, los cuales tienen una diferencia de cierre de nivelación de 2mm (Aguilar, 2009). Tales datos forman parte de la restitución fotogramétrica del Programa de Regularización de Catastro y Registro. En el área de estudio se muestran variaciones entre los 1.378 hasta los 1.887 m.s.n.m. con una amplitud de 509 m.

Posteriormente, con el uso del programa ArcGIS se interpolaron los valores correspondientes a las elevaciones (z) mediante el método de *Topo a ráster*, obteniendo el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), es decir la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. A partir del MDE se creó la superficie de pendientes a través de la herramienta *Pendiente*, la cual calcula la tasa máxima de cambio del valor respecto al valor de las celdas vecinas. Posteriormente se realizó una reclasificación utilizando para ello la metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica (MAG y MIRENEN, 1988). De acuerdo a la inclinación se clasifican en distintas categorías desde planas, onduladas y escarpadas. Lo cual tiene relación directa con el proceso de infiltración (Tabla 1).

Está metodología toma en consideración estudios a nivel de detalle por lo que para las pendientes considera los microrelieves, creando por ende mayor cantidad de categorías de clasificación de pendientes.

El uso actual de la tierra se obtuvo mediante la digitalización de la imagen satelital brindada por la empresa Geospatial Innovations (GEOINN), ésta fue tomada con el sensor WorldView-2

el 10 de marzo de 2015 con una resolución espacial de 0,50m. La información digitalizada se comparó con la imagen satelital gratuita de Google Earth 2017 y finalmente se realizó una verificación en campo.

Tabla 1. *Clasificación de pendientes según microrelieve.*

Pendiente %	Categorías
0 - 3	Plano
3 - 8	Ligeramente Plano
8 - 15	Ligeramente Ondulado
15 - 30	Moderadamente Ondulado
30 - 45	Ondulado
45 - 60	Fuertemente ondulado
60 - 75	Escarpado
75 y más	Fuertemente escarpado

Fuente: MAG y MIRENEN, 1988.
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

La caracterización hidrográfica de la microcuenca río Tigre, se efectuó a partir de dos evaluaciones individuales. En primera instancia, se realizó un análisis morfométrico, con ayuda del programa ArcGIS 10.3, para lo cual se requirió como única entrada el Modelo de Elevación Digital creado en secciones previas, y a partir del cual se estimaron los parámetros que tienen algún tipo de relación con el comportamiento hidrológico, el volumen y velocidad del flujo de la microcuenca (Cardona, 2013).

Se determinaron los parámetros concernientes a la forma de la cuenca; área, perímetro e índice de compacidad (Kc), este último estimado según la ecuación definida por Gravelius en 1914;

$$Kc = 0.28\ \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde *P* hace referencia al perímetro de la cuenca de estudio, mientras *A* se refiere al área de ésta. Este índice tiene relación con el tiempo de concentración (Tc), es decir el tiempo que dura una gota en llegar desde la cabecera o zona más alejada hasta la salida de la misma (Gaspari et al., 2012), estimado a partir de la fórmula desarrollada por Kirpich en 1940;

$$Tc = 0.0078L^{0.77}\ S^{-0.385}$$

Siendo L la longitud máxima del cauce y S la diferencia en elevación en la microcuenca (Núñez, 2001). Otros índices determinados tienen base topográfica; el índice de rugosidad del terreno estima la desviación estándar entre celdas o pixeles contiguos de valores de altitud (Leiva, 2012); el TWI o índice topográfico de humedad, fue diseñado para simplificar la respuesta de la cuenca ante eventos meteorológicos, considerando el área saturada como la relación entre el área drenada por unidad de contorno (α) entre el ángulo de pendiente local (β), de la forma (Kirby y Beven, 1979);

$$\ln (\alpha / \tan \beta)$$

La aplicación del TWI asume condiciones estables espacio – temporales en relación con procesos del ciclo hidrológico, distinguiendo, como resultado, las áreas con mayor susceptibilidad a la saturación, y producción de flujo superficial (Leiva, 2012).

Otros parámetros determinados tienen relación con los flujos de agua, entre ellos se encuentran, la longitud del cauce principal, la orden de red, y densidad de drenaje. El primero, hace referencia a la distancia medida desde la cabecera hasta la salida de la microcuenca (Gaspari *et al*., 2012), y está vinculado también con el tiempo de concentración, por su correlación con el escurrimiento (Fuentes, 2004). La categorización de la red de drenaje sigue el método propuesto por Strahler, el cual asigna un número u orden de red, considerando aspectos asociados a confluencia y bifurcación de los flujos. Las corrientes de orden 1 van a ser aquellas que no tienen ningún tributario, cuando dos afluentes de primer orden se unen, se crea una corriente de orden 2, el orden 3 va a ser aquel que se genera por la unión de dos corrientes de orden 2 y así sucesivamente (Strahler, 1957).

Un indicio del desarrollo de los afluentes que conforman dicha red (Pinochet, 2013), se consigue mediante la estimación de la densidad de drenaje (D),

$$D = \frac{\sum_{i}^{Li}}{A_E}$$

Donde L_i es la longitud de los cauces de cada orden, y A_E el área total.

La segunda evaluación se enfocó en estimar el balance hídrico general de la microcuenca, a fin de representar de forma matemática los procesos que operan en la superficie terrestre e

interactúan entre sí en el complejo ciclo hidrológico global. En términos generales la ecuación de balance hídrico, establece que la suma y resta de todas las entradas y salidas deriva en un valor de cero, de la forma (Davie, 2008);

$$P \pm E \pm \Delta S \pm Q = 0$$

Donde los términos hacen referencia a la precipitación (P), evaporación (E), cambio en el almacenamiento (S) y escorrentía (Q). De esta forma se establece que no hay ganancias ni pérdidas en el intercambio de flujos atmósfera-superficie. Dicha ecuación es simplificada, asumiendo estacionalidad, a tres componentes: P, Q y ETA, siendo esta última la referente a la evapotranspiración.

Los datos utilizados en esta segunda evaluación fueron obtenidos de las estaciones meteorológicas, en valores promedios mensuales de las variables de evapotranspiración potencial y precipitación. Mientras que para los datos de caudal se utilizó el valor potencial resultante de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración, esto ya que los datos de aforos realizados y proporcionados por la ASADA San Gabriel no son suficientemente continuos para generar un valor por mes que equilibre el balance entre los otros componentes.

La caracterización demográfica se hizo a partir de las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Censo del 2011. La microcuenca ocupa tres distritos (Tarbaca, San Gabriel y Rosario) pero no en su totalidad. Por lo que se procedió a realizar el cálculo para estimar la población ocupante en la microcuenca, a partir del número total de habitantes por distrito, el número de viviendas ocupadas por distrito y el número de edificaciones de uso residencial dentro de la microcuenca.

$$\left(\frac{\text{Población Total por Distrito}}{\text{\# de Viviendas Ocupadas por Distrito}} \right) * \text{\# Edificaciones}$$

De esa manera fue posible obtener la población total para cada distrito dentro de la microcuenca y realizar las estimaciones correspondientes a la caracterización demográfica, como la población por sexo y rangos de edad. Así como la obtención de proyecciones de población para el año 2025.

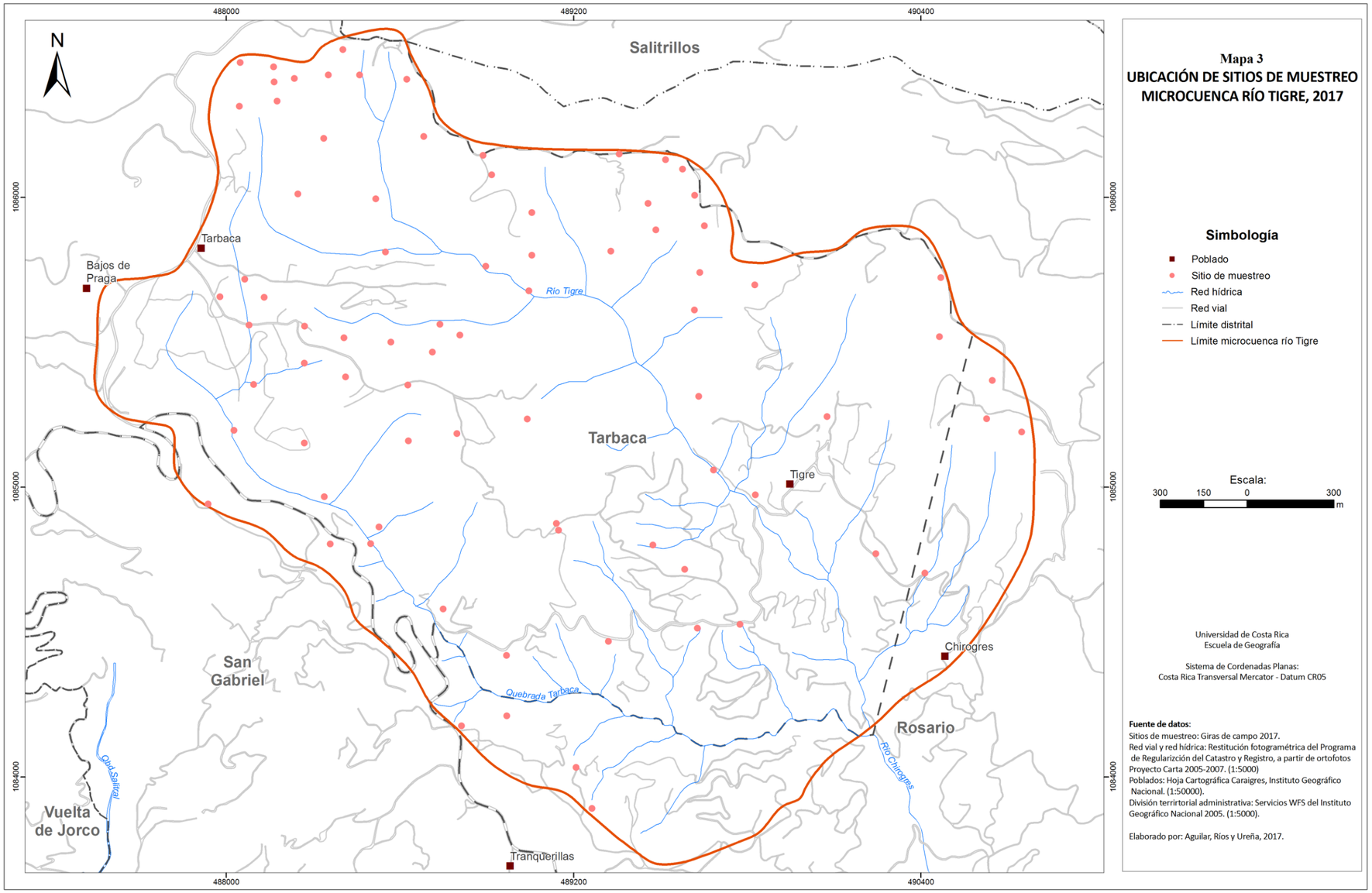
1.8.2. Infiltración en la microcuenca

El objetivo fundamental de esta etapa fue el de identificar las áreas con mayor potencial de recarga hídrica dentro de la microcuenca río Tigre, esto, a partir de la realización de pruebas de infiltración aplicando el método del doble anillo y el análisis integral en conjunto con algunas variables biofísicas consideradas en la sección previa.

Para la utilización del infiltrómetro de doble anillo, primeramente éste debió ser construido (Figura 3), para lo cual se diseñaron dos cilindros concéntricos, cuyas dimensiones fueron determinadas siguiendo los parámetros estandarizados por la USDA (United States Department of Agriculture), la altura de los anillos fue de 30 cm, mientras el diámetro fue de 20 y 30 cm para el anillo interior y exterior respectivamente (FCAyF, s.f.); el material utilizado fue lámina lisa hierro negro número 24. Posterior a su construcción, se graduó el cilindro interior manualmente a partir de unidades de volumen (litros).

Figura 3. Infiltrómetro de doble anillo
Fuente: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

Durante las visitas al área de estudio, se seleccionaron puntos para la realización de las pruebas. La elección de dichos sitios se efectuó adrede para conseguir una distribución equitativa, que cubrieran todas las diferencias evidenciadas en usos, coberturas y pendientes. Se estudiaron 80 puntos diferentes (Mapa 3) dentro de los límites de la microcuenca río Tigre (Anexo 1).



Mapa 3

UBICACIÓN DE SITIOS DE MUESTREO MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017

Simbología

- Poblado
- Sitio de muestreo
- Red hídrica
- Red vial
- Límite distrital
- Límite microcuenca río Tigre

Escala:

300 150 0 300 m

Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía

Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05

Fuente de datos:
Sitios de muestreo: Giras de campo 2017.
Red vial y red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División territorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).

Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

En tales sitios se tomó en cuenta consideraciones iniciales que consistieron en evitar terrenos con excesiva alteración antrópica, rocas y raíces gruesas que dificultarán la entrada de los anillos. La ejecución del método de Muntz (infiltrómetro de doble anillo) se tomaron medidas iniciales como limpieza del sitio, retirando de manera cuidadosa la maleza, vegetación u otro material encontrado, sin perjudicar el suelo inmediatamente inferior (Oscar, 2016).

Luego de este paso, se procedió a enterrar los cilindros a una profundidad determinada (5 cm) mediante el golpe constante de los mismos con un mazo, procurando la verticalidad de estos en relación con el terreno, esto mediante el uso de un nivel de construcción. Cuando ambos anillos estaban en posición, se procedió a verter el agua, primero en el aro exterior para revisar cualquier tipo de fuga y luego en el interior, intentando alcanzar la misma altura de agua en ambos recipientes. Una vez se alcanzó el nivel de agua inicial (5 litros), se empezó a correr el cronómetro, haciendo mediciones de la columna de agua cada cierto tiempo (Ibañez, Moreno y Blanquer, s.f), al principio, cuando la velocidad de infiltración es más rápida, se hicieron las mediciones cada 20 segundos, a medida que la velocidad disminuyó se efectuaron cada minuto. Otras contemplaciones in situ fue rellenar los cilindros cuando el agua llegaba a límites bajos y aún no se había alcanzado el nivel de saturación.

De acuerdo a los principios establecidos por Robert E. Horton, la lluvia precipitada puede seguir un camino horizontal a partir de un flujo superficial hasta llegar a los cauces de una cuenca, o infiltrarse en el suelo, el cual actúa como una presa permeable que sólo deja entrar cierto volumen de agua.

Al principio del evento de precipitación el agua ingresa en el suelo con una mayor velocidad, la cual está determinada en gran medida por la fuerza de gravedad y por la fuerza de succión, mayor en los suelos secos (Davie, 2008). Adicionalmente, cada suelo tiene un contenido máximo de humedad que puede almacenar temporalmente, denominado capacidad de campo, cuando la intensidad de la lluvia excede el volumen de agua que el suelo es capaz de infiltrar, es decir la capacidad de infiltración, se genera escorrentía superficial (Horton, 1933).

Es aquí donde se debe hacer una distinción entre la capacidad de infiltración y la tasa de infiltración, la cual determina la velocidad de ingreso del agua en el suelo cuando la cantidad de lluvia es menor a la capacidad de infiltración del suelo (Beven, 2004). Existiendo entonces

múltiples tasas, pero una única capacidad para un determinado suelo en un momento específico (Horton, 1940 citado en Sepúlveda, 2015).

Mediante la aplicación de las bases descritas por Horton, y diferentes autores después de él, se llegó a la definición de una gráfica representativa de la infiltración (Figura 4), la cual muestra la tasa de infiltración, es decir la velocidad de entrada del agua en el suelo con respecto al tiempo.

A pesar de que el proceso es dependiente de las características del suelo, el comportamiento es similar en todos los casos. Al principio, el ingreso de agua en el suelo adquiere mayor velocidad, a medida que avanza el tiempo y se va saturando el suelo, se ralentiza la entrada del agua a una tasa de infiltración constante, momento en el que se llega a la capacidad de infiltración del suelo, representado como una línea aplanada. Donde el flujo vertical del agua está controlado por el proceso de conductividad hidráulica saturada (Davie, 2008).

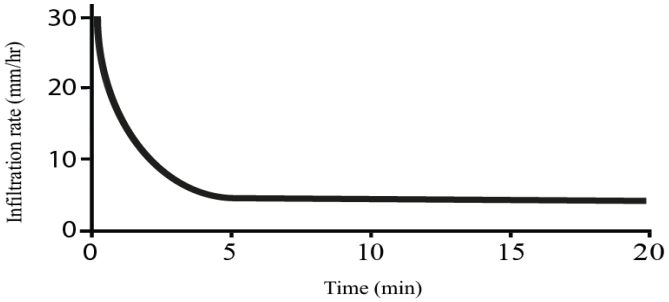


Figura 4. Curva típica de infiltración.
Fuente: Davie, 2008.

Con el uso del infiltrómetro de doble anillo para el registro de la infiltración, se asegura la entrada constante de agua de forma vertical en el anillo interno, ya que el cilindro exterior impide el movimiento lateral del agua, hasta alcanzar el punto de saturación del suelo. Con lo cual se preserva el principio de lluvias mayores a la que el suelo tiene capacidad de infiltrar (Alvarado y Barahona, 2017).

La duración de cada una de las pruebas es representativa de las condiciones del sitio de muestreo, en todos los casos la finalización de la prueba se hizo después de 5 o 6 mediciones continuas con la misma cantidad de infiltración (Anexo 1). Adicionalmente, en cada sitio de muestreo se analizaron las condiciones del terreno vinculadas con el proceso de infiltración; se tomaron datos de uso o cobertura, pendiente, textura mediante el tacto, color y plasticidad del suelo (Anexo 2).

Posterior a la realización de las pruebas, se procedió a la digitalización de los datos; para la determinación de la tasa de infiltración de cada prueba, primero se debió convertir las mediciones de litros a milímetros, esto mediante la multiplicación con el área del cilindro interior (0.63 m^2), luego se estimó la diferencia en el nivel de agua y el plazo de tiempo entre una medición y la siguiente, finalmente se obtuvo la razón de las diferencias y se multiplica por 60 para convertir los minutos en horas, con lo cual se obtiene el ingreso del agua por tiempo (mm/h). Para este proceso, nuevamente se recurrió al uso del programa R, donde además se generó un gráfico con la tasa de infiltración de las 80 pruebas. Luego de la determinación de la tasa de infiltración, se estimó la conductividad hidráulica saturada (Ksat), definida como la habilidad del medio poroso para transmitir el agua, que es dependiente del tamaño y la interconectividad entre los poros (Davie, 2008).

Además, se estimó la capacidad de infiltración, tasa máxima a la cual el agua puede ingresar en el suelo, dadas ciertas condiciones (Horton, 1933). Principalmente gobernada por la textura y el tamaño de los poros, la cobertura y uso de éste por parte de la población humana, la humedad precedente del suelo, y la presencia de organismos biológicos que causan bioturbación del suelo, incluyendo desde raíces, insectos, lombrices hasta grandes perforaciones por parte de los roedores (Horton, 1945). Para la determinación de éste parámetro se utilizó la ecuación de Horton, por ser de fácil aplicación y requerir de pocos parámetros;

$$fp = \mathrm{fc} + (\mathrm{fo} - \mathrm{fc})\mathrm{e}^{-\mathrm{kt}}$$

Donde fp es la capacidad de infiltración en el tiempo t, fo es la capacidad de infiltración inicial, fc la capacidad de infiltración final o en equilibrio, y k es la constante representativa del decaimiento (Kumar, 2014).

Para el ajuste de esta ecuación, realizado en R, se utilizó los valores observados como parámetros iniciales, correspondientes a la tasa inicial, la conductividad hidráulica saturada o tasa de infiltración constante y la pendiente respectiva de la curva generada por los datos, que se mantiene como única incógnita de la ecuación y es determinada con los demás parámetros (Alvarado y Barahona, 2017), como la diferencia entre el valor inicial y final de tasa de infiltración, dividida entre el tiempo transcurrido (Sepúlveda, 2015).

Con ambos valores, conductividad hidráulica saturada y capacidad de infiltración, se generaron mapas interpolados a través del método determinístico conocido como Ponderado por el Inverso a la Distancia con sus siglas en inglés IDW. El mismo se eligió dado que este asume que cada punto local posee una influencia en su entorno que va disminuyendo con la distancia, lo que significa que en los puntos más lejanos van disminuyendo la influencia (Poblete, 2008). Además, se utilizó ya que el análisis de correlación de la capacidad de infiltración y la conductividad hidráulica saturada no muestra relaciones fuertes con otras variables ambientales (textura, pendiente, elevación y uso de la tierra).

Se efectuó el análisis de correlación entre ellos mismo y con las variables biofísicas como lo la pendiente, elevación, uso de la tierra y tipo de suelo según su clase textural. Para esto se aplicó el coeficiente de Spearman, en vista de que es robusto a la presencia de ciertos desvíos del patrón natural y menos estricto, además permite ver la relación natural que existe entre las variables (Restrepo y González, 2007). A partir de los resultados de dependencia entre las variables se procedió a realizar un mapa de zonas de recarga hídrica considerando únicamente las variables que presentaron la mayor correlación entre ellas (capacidad de infiltración, la conductividad hidráulica saturada y textura), a través de la suma de sus valores ponderados utilizando para ello la calculadora raster en el programa ArcGis.

Para la ponderación de la textura se procedió a emplear el procedimiento aplicado por el grupo denominado Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas del CATIE, en el cual se le asigna un valor de 1 a 5 a las diferentes clases texturales según su relación con la capacidad de infiltración (Matus, Faustino y Jiménez, s.f.) (Tabla 2).

Tabla 2. *Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según textura*

Textura	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelo franco arenoso, con tamaño de agregados o partículas gruesas a medias y muy rápida capacidad de infiltración (mayor a 25 cm/h).	Muy alta	5
Suelo franco, con partes iguales de arena, limo y arcilla y rápida capacidad de infiltración (12,7 - 25 cm/h)	Alta	4
Suelo franco limoso, y moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración (2-12,7 cm/h)	Moderada	3
Suelo franco arcilloso, combinación de limos y arcilla, con muestras de compactación y lenta a moderada capacidad de infiltración (0,13 - 2 cm/h)	Baja	2
Suelos arcillosos, muy compactados, con muy lenta capacidad de infiltración (menor de 0,13 cm/h)	Muy baja	1

Fuente: Matus, Faustino y Jiménez, s.f

Tal método fue diseñado para la identificación de zonas de recarga mediante una forma práctica de evaluar en campo los diferentes criterios, que intervienen en el proceso de infilración.

1.8.3. Estimación cuantitativa de la recarga hídrica

La última etapa del proyecto contempló el diseño y evaluación de un modelo hidrológico de simulación, cuyo propósito final fue la estimación cuantitativa de la recarga hídrica en la microcuenca río Tigre durante el período meteorológico analizado, con posibilidades de generar proyecciones en el futuro.

El modelo es una versión simplificada de la realidad que permite representar el comportamiento de un sistema (Eterovic, 2008) mediante una función matemática. En ciencias hidrológicas es ampliamente utilizado para rellenar faltantes de información, solventar la ausencia de técnicas de medición y mejorar la comprensión del ciclo hidrológico, especialmente con relación al proceso precipitación - caudal (Beven, 2011).

Para la microcuenca río Tigre se diseñó un modelo hidrológico conceptual simple basado en la percepción adquirida académicamente, amparada, además, en el conocimiento obtenido mediante el trabajo de campo y los análisis previos realizados en el área de estudio, sobre los procesos que trabajan en el sistema, desde la caída de las precipitaciones hasta la generación de caudal.

De acuerdo a la comprensión concebida sobre el funcionamiento de una cuenca, el modelo conceptual sistemático diseñado e implementado mediante diferentes ecuaciones matemáticas, en un código en el programa R, presenta la estructura mostrada en la Figura 5. Las entradas del modelo son la precipitación y la evapotranspiración, ambas obtenidas en las etapas previas de la investigación, consideradas a escala diaria.

En principio, el modelo está diseñado para separar la precipitación caída en la microcuenca (“P”) en dos flujos, la precipitación que cae directamente al suelo (“Ps”) y la lluvia que es interceptada por los árboles (“Pi”), dicha segregación se realiza mediante la inclusión de un parámetro “a”, el cual se multiplica por el volumen de agua precipitada. El mismo procedimiento se realiza para la variable de evapotranspiración potencial (“ETP”), dividida en transpiración (“T”) y evaporación (“E”) mediante el parámetro “b”.

El modelo está compuesto por tres reservorios y 9 parámetros (a, b, c, d, g, h, fo, fc, k); el primer reservorio corresponde a la intercepción ("INT"), es decir el agua almacenada temporalmente en el dosel de los árboles, y cuya importancia es mayor en los bosques, donde el índice de área foliar es más grande, el dosel es muy denso. La lluvia interceptada puede volver a la atmósfera mediante transpiración o escurrir por las ramas y tronco de los árboles o por medio del goteo hasta llegar a la superficie (Muzylo et al, 2009), lo cual es concebido como flujo de intercepción "Qi", y es obtenido mediante el parámetro "c".

El segundo reservorio es concerniente al suelo ("S"), donde el agua precipitada directamente puede tomar dos caminos dependiendo de la intensidad de ésta. De acuerdo al concepto de generación de escorrentía de Horton, si la lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo, ésta va a escurrir superficialmente ("Qd") hasta llegar al cauce (Horton, 1933). Este proceso conlleva la consideración de la ecuación y los parámetros de capacidad de infiltración tratados en el capítulo anterior ("fo", "fc" y "k"). El agua que penetra en las capas superiores del suelo (zona no saturada), no permanece estática, sigue moviéndose de forma lateral ("Qs"), contribuyendo al caudal del río o de forma vertical hasta las capas más profundas del suelo mediante el proceso de percolación ("Pc"), el cual contribuye a la recarga del acuífero. El volumen en ambos casos, se determina mediante un parámetro individual.

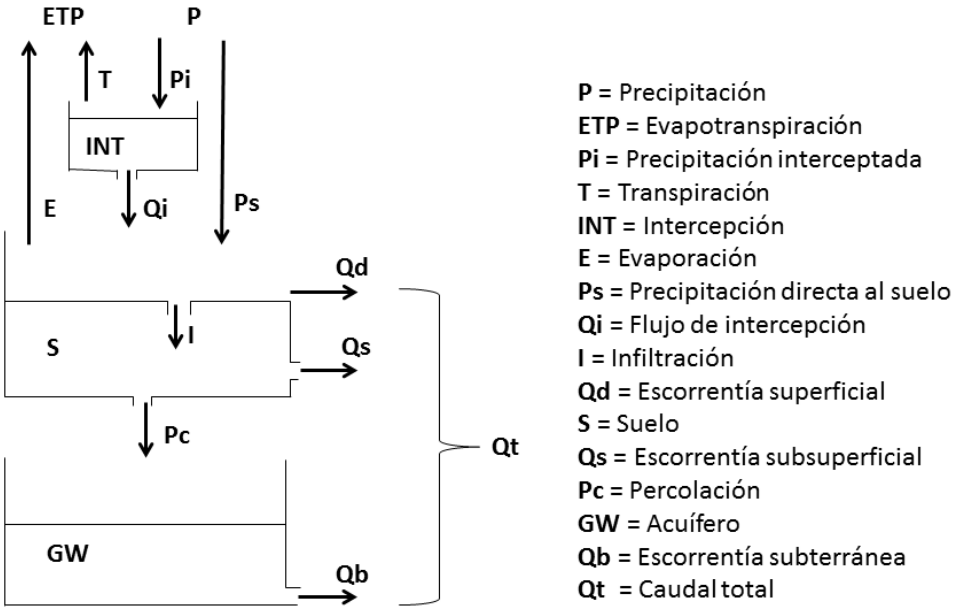


Figura 5. Modelo conceptual.
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

La zona de agua subterránea considerada como tercer reservorio (“GW”), almacena el agua de eventos previos de precipitación, por lo cual la presión hidráulica generada por la lluvia ingresada por percolación, empuja el agua más vieja hacia los lados, produciendo un flujo que posteriormente se convertirá en caudal (“Qb”). El cual se relaciona con el último parámetro considerado en el modelo numérico. La salida del modelo “Qt”, es entonces, determinada como la suma de los flujos generados a nivel superficial y subterráneos que llegan al cauce del río.

El valor inicial de los parámetros fue elegido arbitrariamente entre 0 y 1, a excepción de los tres considerados para la determinación de la capacidad de infiltración (Anexo 3), donde fueron utilizados los valores promedios obtenidos mediante el ajuste de la curvas según la ecuación de Horton de la etapa previa de la investigación.

Dada la falta de datos observados de caudal en la microcuenca río Tigre, para la validación de las simulaciones obtenidas con el modelo, se recurrió a una evaluación suave basada en el criterio de experto, con lo cual únicamente se consideran las proyecciones generadas por el modelo que sean posibles y aceptables en el sentido hidrológico (es decir aquellas que cumplieron con valores de caudal sobre los 0 mm). La forma de evaluación consiste en un análisis de sensibilidad, que valora el cambio en la salida del modelo producto de las modificaciones en el valor de los parámetros (San Isidro, 1998). La función SensRange de la librería FME, estima dicho efecto en determinadas variables de modelación, mediante la generación de valores aleatorios, para lo cual se utiliza la función Latinhyper de la misma librería, generándose un conjunto de valores para cada parámetro, 10.000 en este caso, según un muestreo de hipercubo latino dentro de un rango de valores establecidos.

Las variables de balance hídrico, resultado de la diferencia anual entre la precipitación, la evapotranspiración y escorrentía, la contribución promedio anual del agua subterránea a la generación del caudal del río, y los valores diarios de caudal fueron seleccionados como salidas del modelo.

De acuerdo a las sugerencias y conocimientos proporcionados por el Dr. Christian Birkel, se designaron los rangos para cada uno de los parámetros del modelo hidrológico (Tabla 3), entre 0,5 y 1 para los flujos correspondientes a la separación de la precipitación y la

evapotranspiración potencial entre la directa hacia el suelo y la interceptada y entre la transpirada o evaporada respectivamente.

Tabla 3. *Rangos de los parámetros del modelo hidrológico*

Parámetro	Mínimo	Máximo
a	0,5	1
b	0,5	1
c	0	1
d	0,1	1
g	0	1
h	0,0001	0,1

Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

El tercer parámetro, relativo al flujo de lluvia que escurre o gotea desde los arboles hasta llegar al suelo tiene un rango más amplio, al igual que el parámetro “g” el cual hace alusión al flujo de agua en zonas poco profundas del terreno que percola hacia el subsuelo. El parámetro “d”, con valores posibles entre 0,1 y 1, hace referencia a la escorrentía de las capas superficiales del suelo que constituye el segundo aporte o componente del caudal de los afluentes de la microcuenca. Finalmente, el parámetro con el rango de valores más reducido, “h”, manifiesta la cantidad de agua subterránea que contribuye a la generación de caudal en el sistema.

Una vez ejecutadas el total de corridas, se descartaron aquellas con valores menores a 20% o mayores a 80% en relación con el aporte subterráneo al año, balances hídricos anuales mayores a los 100 mm (negativos o positivos) y caudales negativos, ya que los afluentes considerados son permanentes durante todo el año. Las corridas o simulaciones que pasan los requisitos establecidos, fueron ploteadas en un gráfico, con los valores potenciales de caudal diario en el eje Y de las ordenadas por tiempo (días) en el eje X.

Con los sets de parámetros de las iteraciones que cumplen todos los criterios previamente establecidos, se estiman las cantidades correspondientes de recarga hídrica. De esta forma el modelo funciona como una presunción o hipótesis acerca de cómo responde o funciona la microcuenca en términos hidrológicos (Beven, 2011).

CAPÍTULO 2. DIAGNÓSTICO GEOAMBIENTAL

2.1. Caracterización meteorológica

Durante el período de análisis meteorológico considerado, desde el 09 de septiembre del 2016 hasta el 17 de septiembre del 2017, realizado en la microcuenca río Tigre, se obtuvieron un total de 17897 datos subdiarios, correspondientes a diferentes variables (temperatura, humedad, punto de rocío, velocidad y dirección del viento, índice de calor, presión barométrica, lluvia, radiación solar y ultravioleta, densidad del aire) medidas por las estaciones colocadas dentro y cerca del área en cuestión, con un porcentaje de datos faltantes de 0,18%.

Los resultados obtenidos (Tabla 4) muestran, ser correspondientes con las características climatológicas descritas para la región pacífica costarricense.

Tabla 4. *Estadísticos de las variables meteorológicas, microcuenca río Tigre, 2016-2017.*

	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)
Promedio	17,96	86,47	0,13	0,15
Desviación estándar	2,67	9,56	1,06	0,22
Mínimo	9,10	32	0	0
Máximo	27,10	100	44,70	0,97
Mediana	17,30	89	0	0,04

Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

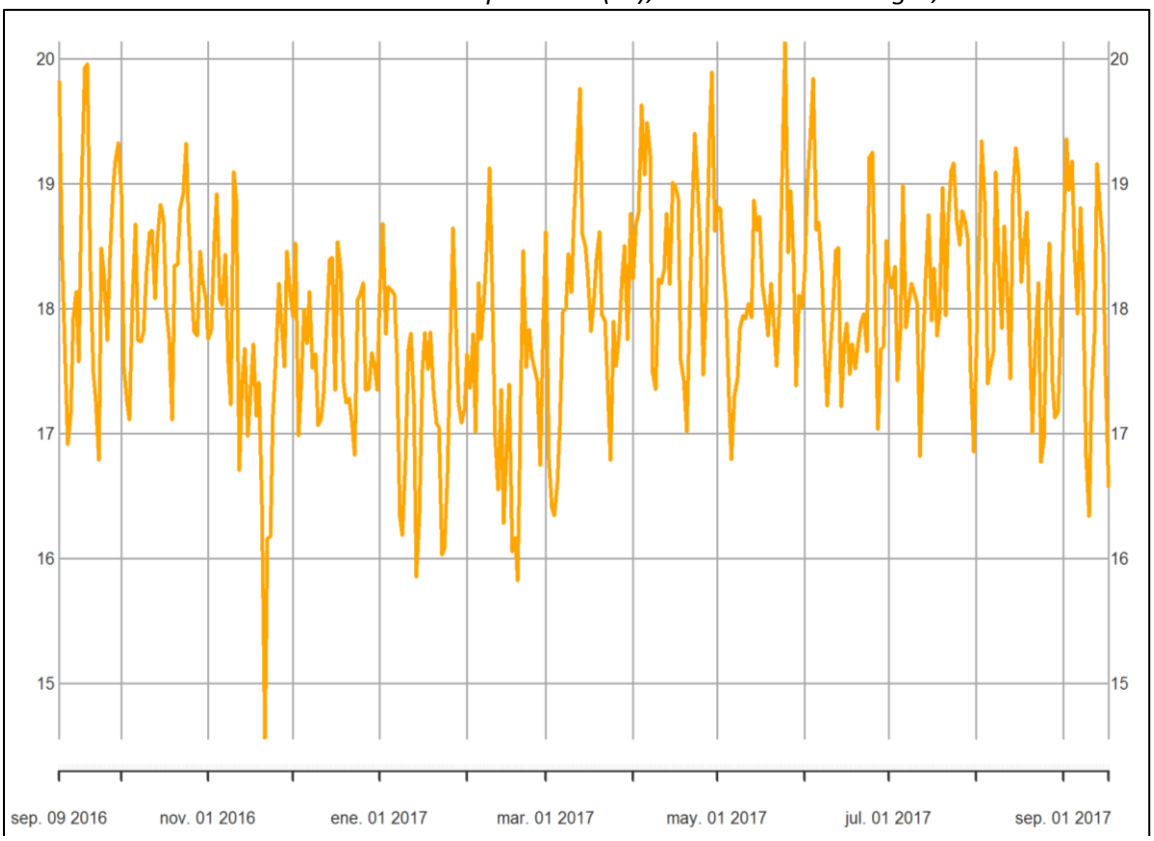
Cabe aclarar que del total de variables medidas por la estación son las cuatro consideradas en la tabla anterior las más relevantes para el estudio de la meteorología anual de la microcuenca río Tigre y por tanto son las únicas que se analizan a detalle.

De acuerdo a la ubicación geográfica del área de estudio, el régimen climático que rige es del pacífico, con características propias de la región central, la cual es afectada por alisios de las vertientes Caribe y Pacífico; la nubosidad y las precipitaciones son producidas por la entrada de alisios del noreste, los vientos del pacífico ecuatorial y la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (IMN, 2008).

2.1.1. Temperatura

Aunque el rango de la temperatura parece bastante amplio, la desviación estándar entre los valores es cercano a los 2°C (Tabla 4), y como cabría esperar de los países tropicales, donde no hay estacionalidad astronómica (primavera, verano, otoño, invierno), la variación diaria a lo largo del año es muy pequeña (Gráfico 1).

Gráfico 1. *Promedio diario de temperatura (°C), microcuenca río Tigre, 2016-2017*



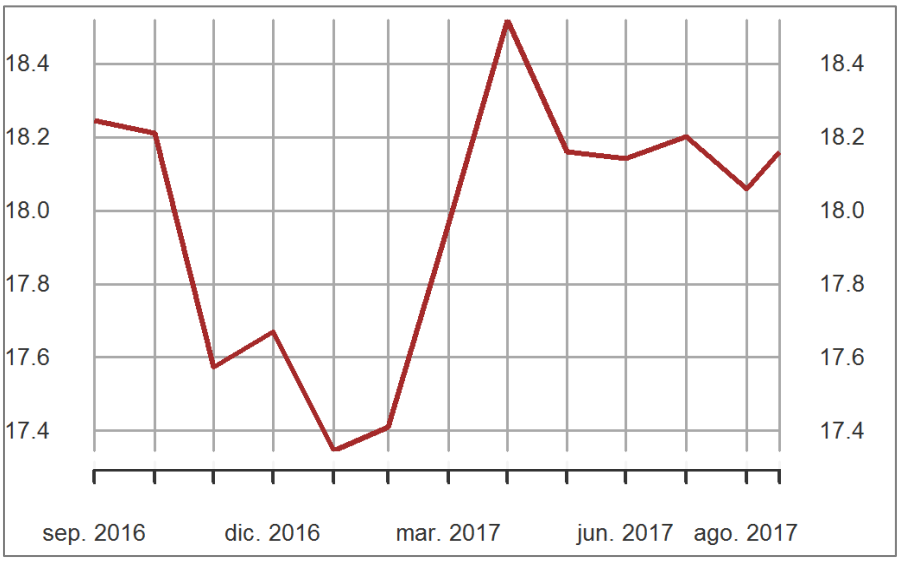
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

La localización geográfica de la microcuenca, le confiere características de zona montañosa, a la cual se le atribuye un clima frío (IMN, 2008), al que se deben las temperaturas por debajo de los 20°C durante prácticamente todo el año.

Aunado a lo anterior, durante los últimos meses del año 2016 se percibe una intensidad en los vientos alisios, fenómeno conocido popularmente como “vientos navideños” en el Pacífico Norte y Valle Central (Castillo, 2016); motivos a los cuales, se estima, corresponde el evento extraordinario presentado a mediados de noviembre 2016 y que prácticamente marca el inicio de un período de reducción en las temperaturas que se prolonga hasta marzo del 2017.

Los valores máximos de temperatura se presentaron a final de septiembre 2016 y cerca de junio. Sin embargo en términos mensuales el pico principal se presenta en abril (Gráfico 2), a partir del cual se da una reducción constante durante el mes; desde mayo hasta septiembre la diferencia en el valor de temperatura es menor de 0,2°C.

Gráfico 2. *Promedio mensual de temperatura (°C), microcuenca río Tigre, 2016 – 2017.*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

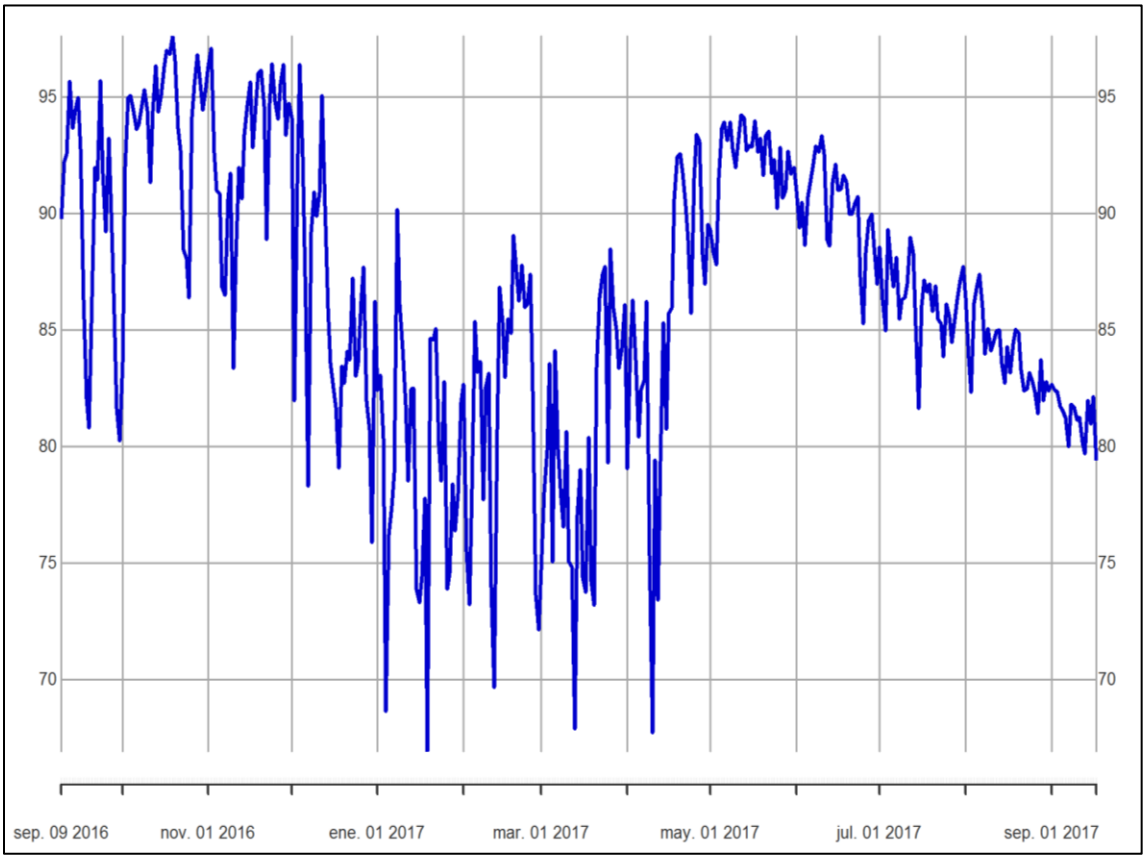
Enero de 2017 se muestra como el mes con los valores de temperatura más bajos, muy cercano al cual está febrero; se denota que la disminución es un proceso que empieza desde septiembre-octubre con una ligera inversión a partir de noviembre.

El aumento de la temperatura desde febrero es invariable y constante hasta alcanzar el pico máximo que da la transición a la estación lluviosa.

2.1.2. Humedad relativa

La humedad relativa, expresada como la razón entre el total de vapor de agua contenida en la atmósfera durante un tiempo específico y el máximo contenido que podría alcanzar multiplicado por cien (Fallas, 2001), exhibe una desviación mucho más grande (Tabla 4) que la temperatura, la cual se observa también en términos promediados diarios (Gráfico 3); coincidiendo con Fallas (2001), en esta región climática la humedad relativa anual se encuentra entre los 75-80 %.

Gráfico 3. *Promedio diario de humedad relativa (%), microcuenca río Tigre, 2016-2017*



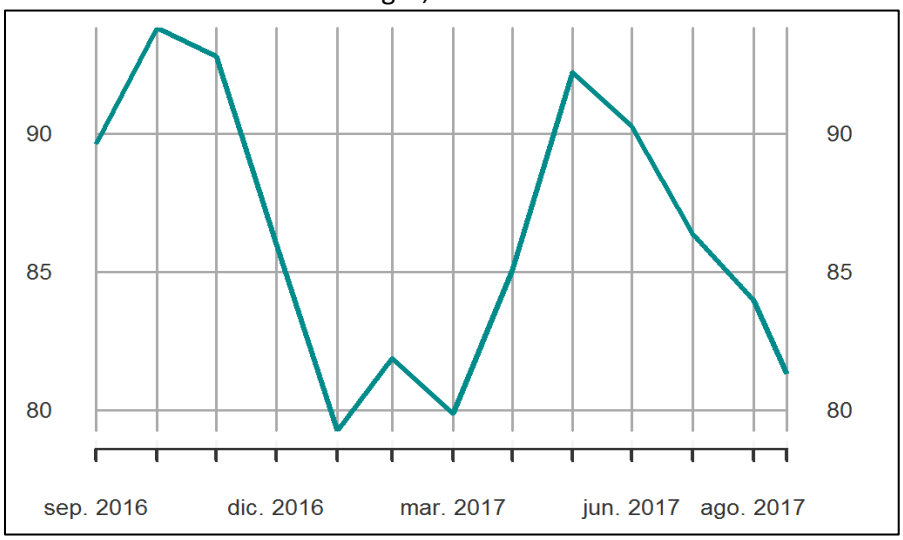
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

El vapor de agua contenido en la atmósfera estuvo cercano a alcanzar el máximo a finales del 2016, desde enero y hasta abril decae en casi una cuarta parte, condiciones asociadas a la estación seca de la vertiente pacifica que inicia en diciembre y se prolonga hasta marzo, siendo éste el mes más cálido y seco del año (IMN, 2008).

En el mes de mayo casi se restituye la humedad a los valores iniciales o máximos, sin embargo, no es perdurable y empieza una nueva recaída casi de forma lineal.

En el Gráfico 4 se aprecia mejor el comportamiento de la humedad durante el año meteorológico considerado; la forma de "W" que se manifiesta de la graficación de los promedios mensuales indica dos picos mínimos y dos picos máximos principales.

Gráfico 4. Promedio mensual de humedad relativa (%), microcuenca río Tigre, 2016-2017.



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

El primer pico máximo se dio en octubre, aunque la diferencia entre el valor promedio de este mes y el de noviembre es escasa, la reducción que inicia entonces se mantiene hasta alcanzar el principal valor mínimo en enero; el segundo mínimo se presenta dos meses después, en marzo, luego de un ligero aumento; desde marzo hasta mayo la humedad relativa aumenta de forma constante, siendo en mayo el segundo pico máximo, a partir del cual vuelve a decaer gradualmente.

2.1.3. Precipitación

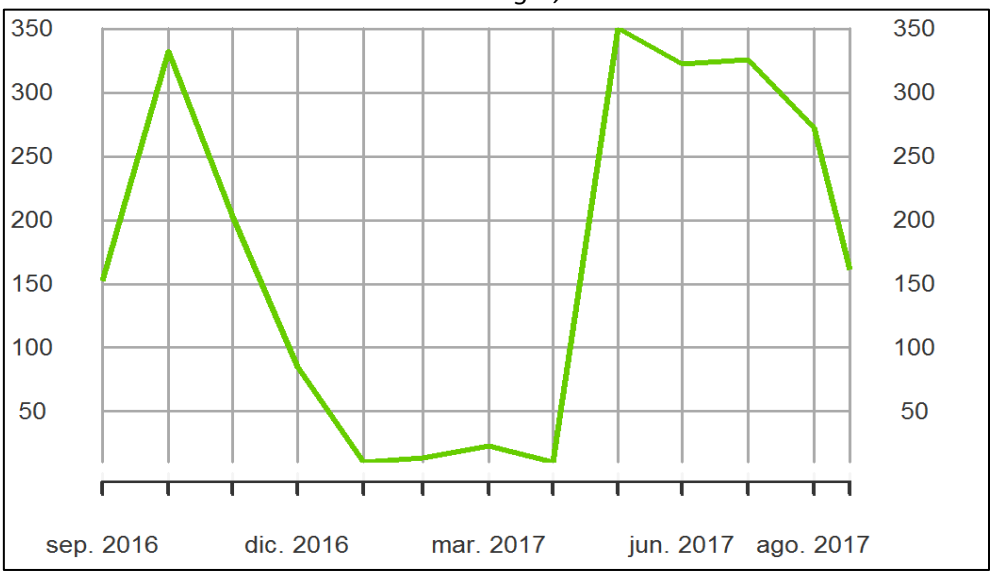
La precipitación sobre la región tropical está influenciada por fenómenos de escala variada, como son el Jet de bajo Nivel del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés), las piscinas de agua cálida (WHMP, por sus siglas en inglés), la Oscilación del sur "El Niño" (ENOS, por sus siglas en inglés), la temporada de huracanes, sistemas convectivos, la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y otros fenómenos que pueden interactuar conjuntamente (Amador et al, 2016)

En la vertiente pacífica tropical la temporada lluviosa extendida de mayo a octubre presenta máximos de lluvias en los meses de septiembre y octubre, muchos de los cuales están asociados a la influencia de sistemas de circulación ciclónica y las precipitaciones asociadas al posicionamiento de la Zona de Convergencia Intertropical sobre el país (IMN, 2008).

El régimen de lluvias de esta vertiente tiene un comportamiento bimodal, ya que durante los meses lluviosos se produce una disminución de las precipitaciones que se ve acompañado de vientos fuertes y reducciones en la humedad de la atmósfera, dicho fenómeno conocido con los nombres Midd Summer Drought (MSD), canícula o Veranillo (Alfaro, 2014) se presenta alrededor de julio y agosto, aunque suele variar de un año al otro, así como también es variable la duración y la intensidad del mismo (Ramírez, 1983).

En el año meteorológico analizado, se exhibe un comportamiento típico de la costa pacífica centroamericana (Gráfico 5), la reducción de las precipitaciones inicia en octubre 2016, pero la verdadera época seca se extendió desde enero hasta abril del 2017, a partir de la cual inició la estación lluviosa alcanzando la máxima cantidad de lluvias en mayo (350mm).

Gráfico 5. *Total mensual de precipitación (mm), microcuenca río Tigre, 2016-2017*



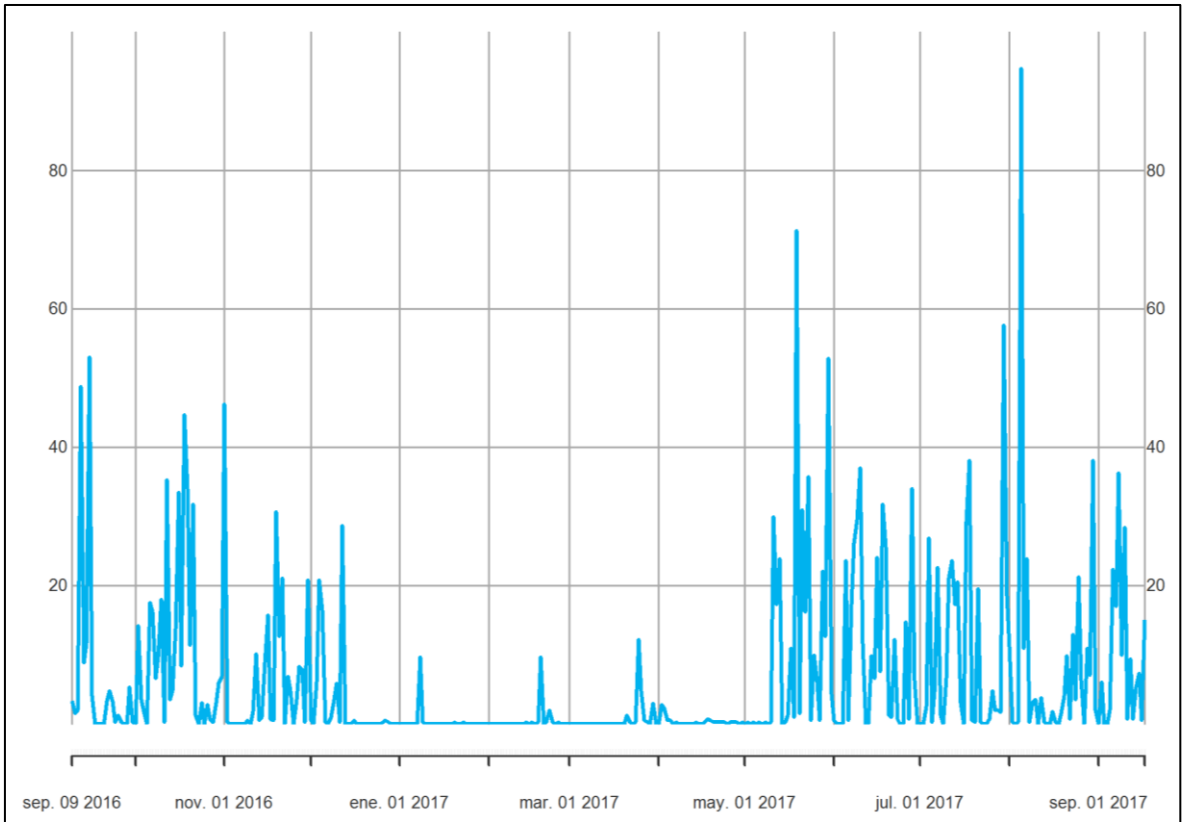
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

El receso en las precipitaciones asociado al MSD o veranillo de San Juan, nombre más popularizado en Costa Rica, debido a la ocurrencia de dicho fenómeno cerca del 23 de junio, fecha en la cual se celebra la fiesta de San Juan (Ramírez, 1983), es apenas evidente en el mes de junio; luego de este ligero descenso de las lluvias se alcanza el segundo pico máximo en julio, durante los meses posteriores las precipitaciones decayeron sustancialmente.

En el total diario de precipitaciones (Gráfico 6), es más fácil apreciar la entrada y finalización de la estación seca correspondiente a la vertiente pacifica costarricense, la cual se extendió

desde principios de diciembre hasta mayo. En la estación lluviosa del año 2017, aún a escala diaria, es difícil distinguir la ocurrencia del veranillo ya que se observa un período de reducción relativa de las lluvias entre junio y julio tomando en consideración los dos picos máximos evidenciados en mayo y agosto.

Gráfico 6. *Total diario de precipitación (mm), microcuenca río Tigre, 2016-2017*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

Dichos eventos extraordinarios en el año meteorológico considerado son atribuibles a la influencia de diversas tormentas tropicales, frentes fríos, el posicionamiento de la ZCIT y otros fenómenos meteorológicos que han propiciado las condiciones de nubosidad y precipitaciones intensas que imperaron sobre la región y gran parte del territorio costarricense durante el período en cuestión.

2.1.4. Evapotranspiración potencial

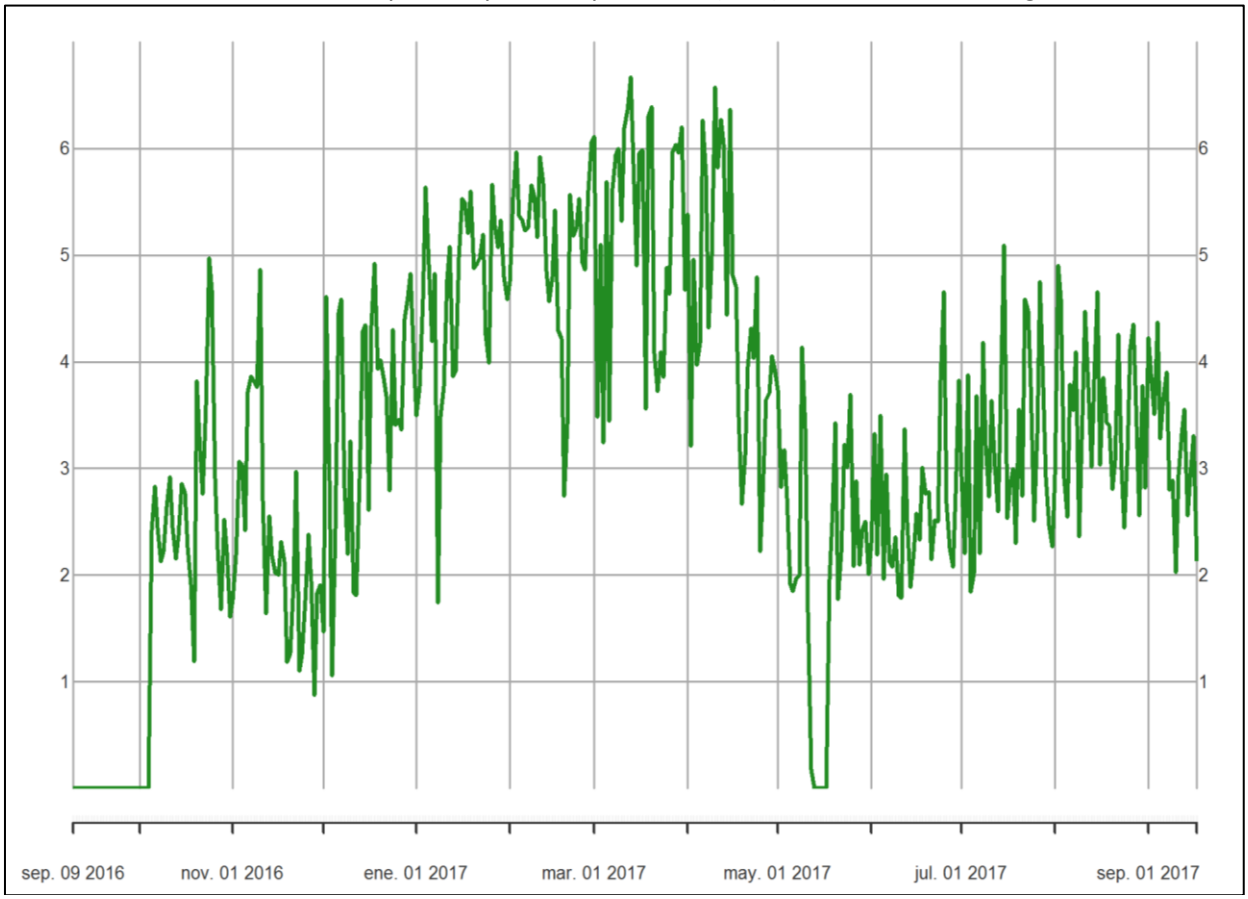
El calentamiento producto de la radiación solar excesiva sobre la región tropical genera zonas de convección donde las aguas oceánicas y la humedad arrastrada por los vientos alisios del norte y del sur de la franja ecuatorial se convierten en la fuente de la gran evaporación que se

da sobre estas latitudes, y las consecuentes precipitaciones abundantes (Laing y Evans, 2016), convirtiendo a la zona tropical en fuente y sumidero principal del vapor de agua atmosférico.

La evapotranspiración potencial, que contabiliza tanto la evaporación desde fuentes superficiales y la transpiración de las plantas, se estima en función de la energía, es decir la cantidad de radiación solar disponible para poner en funcionamiento el proceso de vaporización del agua de ambas fuentes, por lo cual es solo una medida potencial que siempre va a estar en limitada por el suministro de agua (Hartman, 2016).

Los problemas presentados con la estación complementaria y el piranómetro, ocasionaron que la variable de radiación tuviera mayor cantidad de datos faltantes que el resto (10.33%), lo cual se ve reflejado directamente en el cálculo de evapotranspiración potencial (ETP) especialmente durante el mes de septiembre 2016 y parte de mayo (Gráfico 7).

Gráfico 7. *Total diario de evapotranspiración potencial (mm), microcuenca río Tigre, 2016-2017*

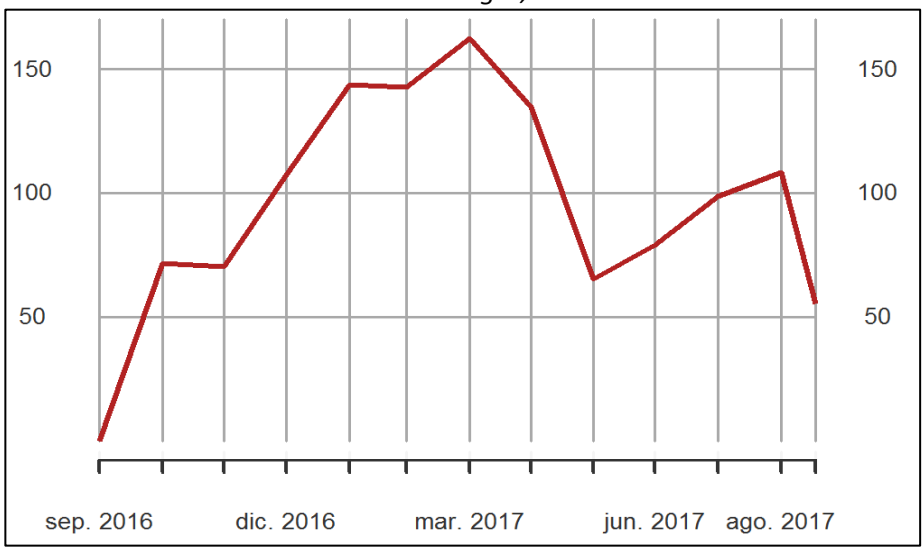


Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

A pesar de dichos faltantes, se puede evidenciar durante octubre y noviembre cierta estabilidad en los valores diarios, tendencia que cambia a partir de diciembre cuando los valores aumentan sostenidamente hasta su pico máximo a mediados de marzo; durante abril se obtienen valores semejantes y se observa otro valor máximo, que da lugar a reducciones bastante grandes en la ETP; desde mediados de mayo y hasta finalizar el período de análisis la variación diaria es entre 1-3 mm.

La reducción en la nubosidad durante los meses secos infiere mayores cantidades de radiación solar que alcanza la superficie y como consecuencia mayor evapotranspiración durante estos meses, situación que se observó en los totales mensuales de ETP (Gráfico 8), siendo durante la estación seca cuando la pérdida de agua hacia la atmosfera fue mayor.

Gráfico 8. *Total mensual de evapotranspiración potencial (mm), microcuenca río Tigre, 2016-2017*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

Empezando desde octubre (ya que el mes de septiembre tiene muchos datos faltantes) y hasta el mes de marzo, donde se presentó el pico máximo, la ETP muestra un comportamiento básico tendiente al incremento, luego de dos meses de disminución, en mayo, vuelve a aumentar la evapotranspiración hasta septiembre donde se invierte de nuevo el comportamiento.

2.2. Caracterización de la geología regional

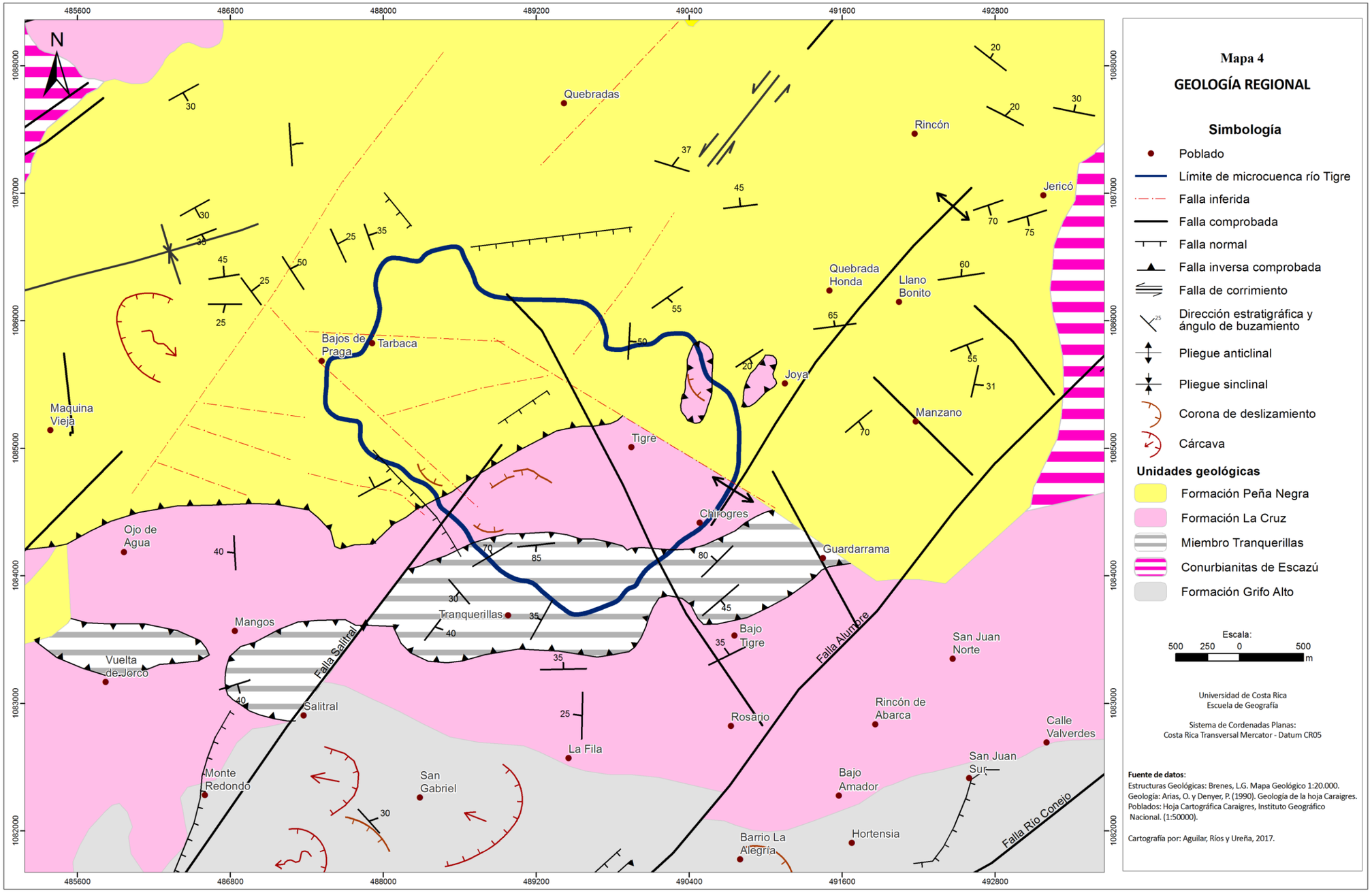
La geología en la que se encuentra inscrita la microcuenca de estudio, es muy diversa y compleja, ya que en ella intervinieron una serie importante de elementos geológicos, asociados a la Cordillera de Talamanca, de la cual la zona de estudio forma parte, caracterizada por ser la más extensa y alta del país, y originada en su gran mayoría por tectonismo. En la región que se inscribe la microcuenca es habitual encontrar afloramientos rocosos y pendientes empinadas con escarpes y acantilados.

Según lo mencionan Barquero y Ellenberg (1983) ésta cordillera presenta pendientes muy inclinadas con movimientos tectónicos intensos, además los ríos y quebradas son cortos, con grandes inclinaciones y cambios significativos en su caudal. A nivel litológico, se describe la zona como de alta meteorización, debido a las características físico-climáticas predominantes. En la microcuenca, se evidencian grandes afloramientos litológicos afectados por el proceso de meteorización química, biológica y física (Figura 6).

Figura 6. Roca madre meteorizada perteneciente a la formación La Cruz, ubicada en la comunidad del Tigre.

Tal como se expresa en la (Figura 6), la roca madre se ve altamente fragmentada por el proceso de meteorización química, precisamente por la oxidación de la roca, que se produce cuando el oxígeno se combina con el hierro para formar óxido ferroso, evidencia de esto son las tonalidades rojizas, ocres o parduzcas generadas por la oxidación del hierro presentes en la formación la Cruz.

Tanto las fuertes pendientes como la sismicidad que caracterizada a la Cordillera de Talamanca, se evidencian dentro de la microcuenca río Tigre, dando pie a la presencia de fallas, pliegues y deslizamientos (Mapa 4).


Mapa 4
GEOLOGÍA REGIONAL
Simbología
Poblado
Límite de microcuenca río Tigre
Falla inferida
Falla comprobada
Falla normal
Falla inversa comprobada
Falla de corrimiento
Dirección estratigráfica y ángulo de buzamiento
Pliegue anticlinal
Pliegue sinclinal
Corona de deslizamiento
Cárcava
Unidades geológicas
Formación Peña Negra
Formación La Cruz
Miembro Tranquerillas
Conurbianitas de Escazú
Formación Grifo Alto
Escala:
500 250 0 500
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Estructuras Geológicas: Brenes, L.G. Mapa Geológico 1:20.000.
Geología: Arias, O. y Denyer, P. (1990). Geología de la hoja Caraigres.
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
Cartografía por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
485600
486800
488000
489200
490400
491600
492800
1088000
1087000
1086000
1085000
1084000
1083000
1082000
Quebradas
Rincón
Jericó
Quebrada Honda
Llano Bonito
Bajos de Praga
Tarbaca
Joya
Manzano
Maquina Vieja
Tigre
Chirogres
Guardarrama
Ojo de Agua
Tranquerillas
Mangos
Bajo Tigre
Falla Alumbre
San Juan Norte
Vuelta de Jorco
Falla Salitral
Salitral
Rosario
Rincón de Abarca
Calle Valverdes
La Fila
San Juan Sur
Monte Redondo
San Gabriel
Bajo Amador
Hortensia
Barrio La Alegría
Falla Río Conejo

2.2.1. Formaciones geológicas

A nivel de la región se puede denotar la injerencia de dos grandes formaciones geológicas como lo son la formación Peña Negra, y La Cruz; además de la presencia del miembro Tranquerillas que interviene en la parte sur de la microcuenca. Materiales que constituyen dichas unidades influyen en la recarga hídrica de la microcuenca.

Las formaciones constituyen la base de los procesos geológicos, además de definir muchas de las características del relieve y la composición del suelo. De esta manera es factible interpretar el comportamiento que va a tomar el recurso hídrico en condiciones determinadas, especialmente en relación con las circulaciones a nivel superficial y subterráneo.

La formación Peña Negra se ubica al norte del área de estudio y de acuerdo a su composición de areniscas, lutitas y tobas su capacidad de recarga es importante, al igual que el miembro Tranquerrillas ubicado en la parte sur de la microcuenca. La formación la Cruz ubicada en la parte central de la microcuenca y constituida por basaltos y andesitas no presenta puntos importantes de recarga estos por las características impermeables de estos materiales.

En cuanto a las proporciones que mantienen las formaciones geológicas a nivel de la microcuenca resultan los siguientes datos: la formación Peña Negra con 60% del área total de la microcuenca, ubicada en la parte norte y sobrepuesta a la formación La Cruz que ocupa un 29% de la zona de estudio, por último, el miembro Tranquerillas que subyace bajo la formación La Cruz y ocupa un 11% del total del área de estudio al sur de la microcuenca.

2.2.1.1. Formación Peña Negra

Según Vargas y Mora (1999) la Formación Peña Negra, está constituida por tres unidades. La unidad inferior, conformada por areniscas, medias y finas, lutitas, intercalaciones de guijarros, estratos de caliza y areniscas con mucha influencia volcánica. Esta formación se ubica al norte y este de la microcuenca (Mapa 4), ocupando más del 50% del área de estudio y de acuerdo a su composición litológica su capacidad de recarga hídrica es importante. Se muestran rocas de origen sedimentario e ígneo (Figura 7) que debido a los procesos dinámicos tanto geológicos como hídricos, han dado origen a rocas metamórficas, las cuales han dado lugar a materiales como arcillas, arenas y limos.

Figura 7. Material transportado por la quebrada Tarbaca, se pueden notar rocas origen sedimentario e ígneo correspondientes a la formación Peña Negra.

Las rocas ígneas y sedimentarias que se muestran en la (Figura 7), son evidencia de la litología que compone la formación Peña Negra, materiales que por sus características permeables facilitan la recarga hídrica en la parte norte de la microcuenca, esta zona es donde se ubican la mayoría de áreas protegidas y captaciones de la ASADA.

2.2.1.2. Formación La Cruz

Según Denyer y Arias (como se citó en Sojo, Denyer, Gazel y Alvarado, 2017) esta unidad geológica representa la cobertura volcánica concordante de la cuenca Candelaria y que consecuentemente se deformó de la misma manera que la secuencia sedimentaria. Está constituida por basaltos, andesitas y tobas. Taludes del área de estudio, dejan expuesta la litología presente (Figura 8), por la acción del medio o por factores antropogénicos.

Figura 8. Talud donde se muestra fragmentos de andesita en una matriz sedimentaria.

El alto nivel tectónico de la región fragmentó la roca madre de origen volcánico y permitió el proceso de sedimentación, generando una matriz limosa de tonalidades oscuras asociado al origen volcánico de la formación La Cruz.

En relación con la recarga hídrica los tipos de roca que predominan en esta formación no son potenciadores de la recarga, ya que tanto el basalto como la andesita poseen características impermeables, aun así, por su rigidez tienden a agrietarse y generar fallamiento que de cierta forma contribuye a la recarga de acuíferos.

2.2.1.3. Miembro Tranquerillas (Oligoceno)

Este miembro está constituido por una secuencia interestratificada de areniscas, tobas, vulcaneritas, conglomerados y brechas finas. Los restos muestran evidencias de desgaste, lo cual indica que sufrieron transporte (Aguilar, 1984). De acuerdo con Alán (citado en Aguilar, 1984), se extiende desde la quebrada Tarbaca hasta las cercanías de Vuelta de Jorco en Aserrí.

El Miembro Tranquerillas se ubica en la parte sur de la microcuenca (Mapa 4), justo en la unión entre el río Tigre y la quebrada Tarbaca y el comienzo del río Caraigres. Su constitución de rocas permeables tales como areniscas, tobas, y vulcaneritas intervienen positivamente en el proceso de infiltración. Muy cerca de la escuela de la comunidad de Tranquerillas, se encuentra un tajo en desuso (Figura 9) donde se puede ver la litología expuesta y la interestratificación de la roca madre.

Figura 9. Talud donde se aprecia el afloramiento del miembro Tranquerillas, y se resaltan sus estratos bien definidos.

Esta formación contempla el menor porcentaje del área de estudio y además la menos explotada por parte de la ASADA, sus principales materiales son areniscas, brechas, tobas y

conglomerados con propiedades permeables representan una oportunidad a futuro para el aprovechamiento del recurso hídrico por parte de ASADA.

2.2.2. Estructuras geológicas de la región

Las estructuras geológicas corresponden a las relaciones entre las rocas existentes en las formaciones geológicas y como estas conforman la definición del paisaje geomorfológico. Según Torres (2015) las estructuras geológicas presentan características geométricas distintivas y otros rasgos característicos de los que sobresalen: la forma, el tamaño, sus límites, sus relaciones, su orientación, el tipo de material, su distribución geográfica, entre otras.

En la microcuenca río Tigre se pueden identificar cuatros fallas inferidas; dos de ellas paralelas en sentido noroeste – sureste, con una longitud de 3km, extendiéndose ambas fuera de los límites del área de estudio. Las otras dos fallas inferidas se ubican en la parte oeste de la microcuenca con una de longitud de 1,5km. La relación entre la ubicación de las fallas y el relieve es evidente, como se puede en los cauces de los ríos que drenan la microcuenca. Tanto el cauce del río Tigre como el de la quebrada Tarbaca coinciden en ciertas zonas con las fallas que atraviesan la zona de noroeste - sureste.

Se observan dos fallas comprobadas principales, la parte norte de la falla Salitral, una de las principales de la zona, con un historial sísmico importante, una falla que va desde la comunidad del Rosario y corta la cuenca en sentido sureste-noroeste pasando por la comunidad del Tigre. Además, la falla Alumbre, que pasa cerca del flaco sureste de la microcuenca siendo intersecada por la falla que comienza en el Rosario.

En la microcuenca se observa una falla normal en el centro de la cuenca con una longitud de 475m, ubicada sobre la divisoria de aguas entre el rio Tigre y la quebrada Tarbaca. Fuera de la microcuenca en la parte norte se encuentra una falla normal importante de una longitud de 1km. La formación La Cruz que limita al norte con la formación Peña Negra y que rodea al miembro Tranquerillas tiene en todos sus límites fallas inversas (Mapa 4). Lo que indica que esta formación esta sobrepuesta con respecto a sus formaciones vecinas, ya que es esta la que sube con respecto a las otras.

La microcuenca presenta pliegues alticlinales y sinclinales (Figura 10), el primero es arqueado hacia arriba y cada flanco se aleja del centro del pliegue en donde se ubican las rocas antiguas; y los anticlinales (arqueadas hacia abajo) los flancos se inclinan hacia adentro en una dirección al eje del pliegue (Rojas, 2006). El anticlinal más importante que se observa en la zona, se ubica en el flanco este de la microcuenca comprendiendo desde la comunidad de Chirogres hasta cerca de la comunidad de Jericó. El pliegue sinclinal se ubica en el flanco noroeste de la microcuenca mostrando como las fuerzas de compresión hacen que la corteza se arquee hacia abajo.

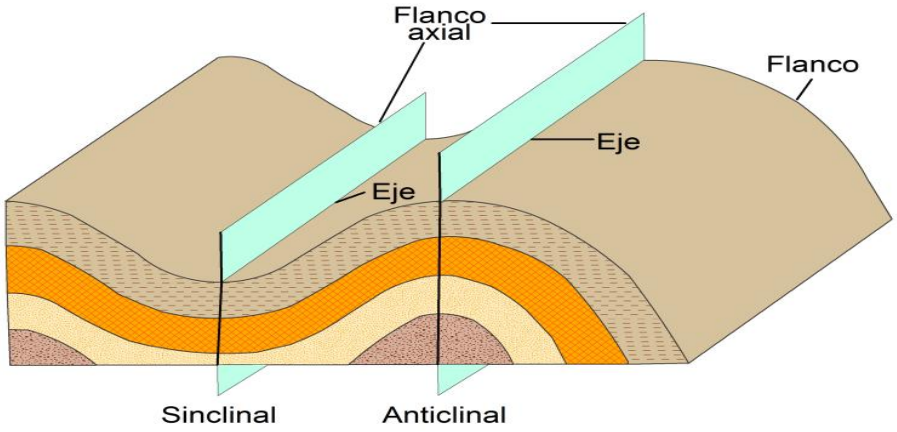


Figura 10. Se muestra el comportamiento de un pliegue alticlinal y sinclinal según sus flancos.
Fuente: Monroe, Wicander y Pozo, 2008

Por motivos relacionados con el tipo de pendientes presentes en la zona, la alta sismicidad, el tectonismo, clima, y uso de la tierra, se pueden observar gran cantidad de deslizamientos y cárcavas asociadas a la acción de la lluvia y las altas pendientes (Mapa 4). El tipo de suelo de la zona también propicia la formación de estas estructuras que según su grado de afectación generan un tipo de erosión denominada erosión remontante que forma un ensanchamiento de las cuencas.

2.3. Caracterización de la geomorfología regional

La geomorfología incluye los factores y procesos que intervienen en el origen de las geoformas que constituyen el paisaje. Los factores que participan en la constitución del relieve terrestre se pueden definir como naturales y antrópicos; y los procesos se van desarrollando con el paso del tiempo.

En la región donde se inscribe la microcuenca interactúan dos unidades geomorfológicas (Mapa 5) que son la cordillera de Talamanca con un origen tectónico y erosivo ocupando un 96,4% del área total de estudio y el Macizo de Escazú con el restante 3,6% con formas generadas por la acción intrusiva.

En la microcuenca se observa claramente la influencia tanto de la geomorfología estructural por medio de la importante actividad geológica que ha dado paso a las estribaciones asociadas a la actividad tectónica de la Cordillera de Talamanca conformando valles, cerros y montañas (Figura 11), y la influencia de la geomorfología climática debido a agentes atmosféricos como la precipitación, el viento, y la temperatura que aunado a las altas pendientes propician la erosión (Figura 12).

Figura 11. Conformación geomorfológica producto de la actividad tectónica y erosiva de la cordillera de Talamanca.

Figura 12. Acción de la lluvia, pendiente y tipo de suelo que dio paso a un fuerte proceso erosivo.

La geomorfología cuenta prioritariamente con el factor geológico que explica la disposición de los materiales. Las estructuras derivadas de la tectónica y de la litología configuran con frecuencia los volúmenes del relieve de un modo más o menos directo (Duque, 2017).

Una vez denotada la injerencia del factor geológico en la morfogénesis, se debe incorporar el efecto del factor climático que es el encargado de ejercer el proceso modelador de la superficie de la corteza terrestre. Esto se da por medio de fenómenos como la lluvia, temperatura y viento que con su influencia van definiendo las geoformas del relieve, es así que van resultando zonas de mayor y menor infiltración también asociadas al tipo de suelo y roca presentes.

Por medio de estos dos grandes agentes, como lo son la geología y el clima, se da origen a la geomorfología propia de una región y ésta es de importancia para la vida ya que sobre ella se desarrollará una determinada actividad antrópica asociada a las características propias de la zona (Figura 13).

Figura 13. Interacción de la actividad agrícola y urbana con la conformación del relieve en la comunidad de Tranquerillas.

Es importante denotar por otra parte la repercusión que tienen los tipos de materiales que constituyen el relieve, aspectos como la composición de la roca y el suelo aunado a la pendiente conforman elementos determinantes en velocidad en la que el relieve se va ir transformando.

La geomorfología es un elemento fundamental a la hora de establecer un asentamiento de población, se determinan zonas estables a nivel de suelos, con pendientes planas y lejos de ríos y quebradas. Por otro lado (Figura 13) las actividades agrícolas se adaptan a zonas de mayor pendiente generando repercusiones a nivel ambiental por efectos de la erosión.

El ser humano constituye un elemento adicional y de gran peso en la transformación del relieve, ya que su impacto a diferencia de los demás seres vivos tiene una huella realmente considerable y muchas veces negativa (Figura 14).

Figura 14. Alteración del relieve por la apertura de una trocha para la extracción maderera en la parte alta de la microcuenca, Tarbaca. .

El área de estudio cuenta con dos ejes modeladores hídricos principales que son el río Tigre y la quebrada Tarbaca además de los afluentes que conforman la red de drenaje. Según Flórez (2003) las partes altas de la cuenca reciben el agua de lluvia, la concentran, y por escurrimiento y disección el caudal y los sedimentos van a los ejes de drenaje.

En las partes de altas pendientes el agua alcanza gran velocidad provocando la erosión en el fondo del lecho del río, lo cual a su vez genera valles en forma de V, como se puede apreciar en la trayectoria del río Tigre y quebrada Tarbaca (Figura 15).

Figura 15. Valle en V con uso ganadero que propicia la erosión remontante.

Otra expresión de la alteración del relieve por la influencia del agua son las cárcavas, las cuales se producen por torrentes intermitentes de agua asociados a fuertes precipitaciones que socavan terrenos blandos (Figura 17). Los taludes asociados a estos valles enfrentan diferentes procesos erosivos, provocando inestabilidad y deslizamientos en las laderas (Figura 16) (Mapa 5).

Mapa 5
GEOMORFOLOGÍA REGIONAL
MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Poblado
Red hídrica
Límite distrital
Límite microcuenca
Estructuras geomorfológicas
Divisoria de aguas
Corona de deslizamiento
Cárcava
Talud
Valle en V
Relleno Local
Unidades geomorfológicas
Cordillera de Talamanca
Macizo de Escazú
Serranía de fuerte pendiente
Escala:
500 250 0 500
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Estructuras geomorfológicas: Bergoeing y Brenes, 2017.
Geomorfología: Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria, 2015.
Red hídrical: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularizción del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007.
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional.
División territorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005.
Cartografía por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
Salitrillos
Quebrada Honda
QUEBRADA HONDA
Tarbaca
Bajos de Praga
Tarbaca
Río Tigre
JOYA
Tigre
Chirogres
Río Tarbaca
Quebrada Tarbaca
GUARDARRAMA
Rosario
San Gabriel
Vuelta de Jorco
Tranquerillas
MANGOS
BAJO TIGRE
487000
487700
488400
489100
489800
490500
491200
1087000
1086500
1086000
1085500
1085000
1084500
1084000
1083500

Figura 16. Nótese un deslizamiento en la vertiente sur de la quebrada Tarbaca producto de las altas pendientes e inestabilidad de los suelos.

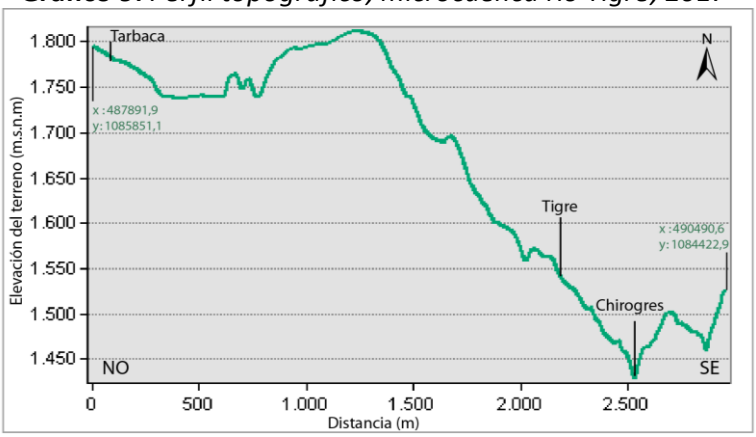
Figura 17. Obsérvese la cárcava generada por un torrente que desemboca en la quebrada Tarbaca.

Todas estas estructuras geomorfológicas están asociadas al mayor sistema montañoso como lo es la cordillera de Talamanca, la cual constituye la unidad geomorfológica sobre la cual se encuentra inmersa la microcuenca.

2.4. Caracterización topográfica

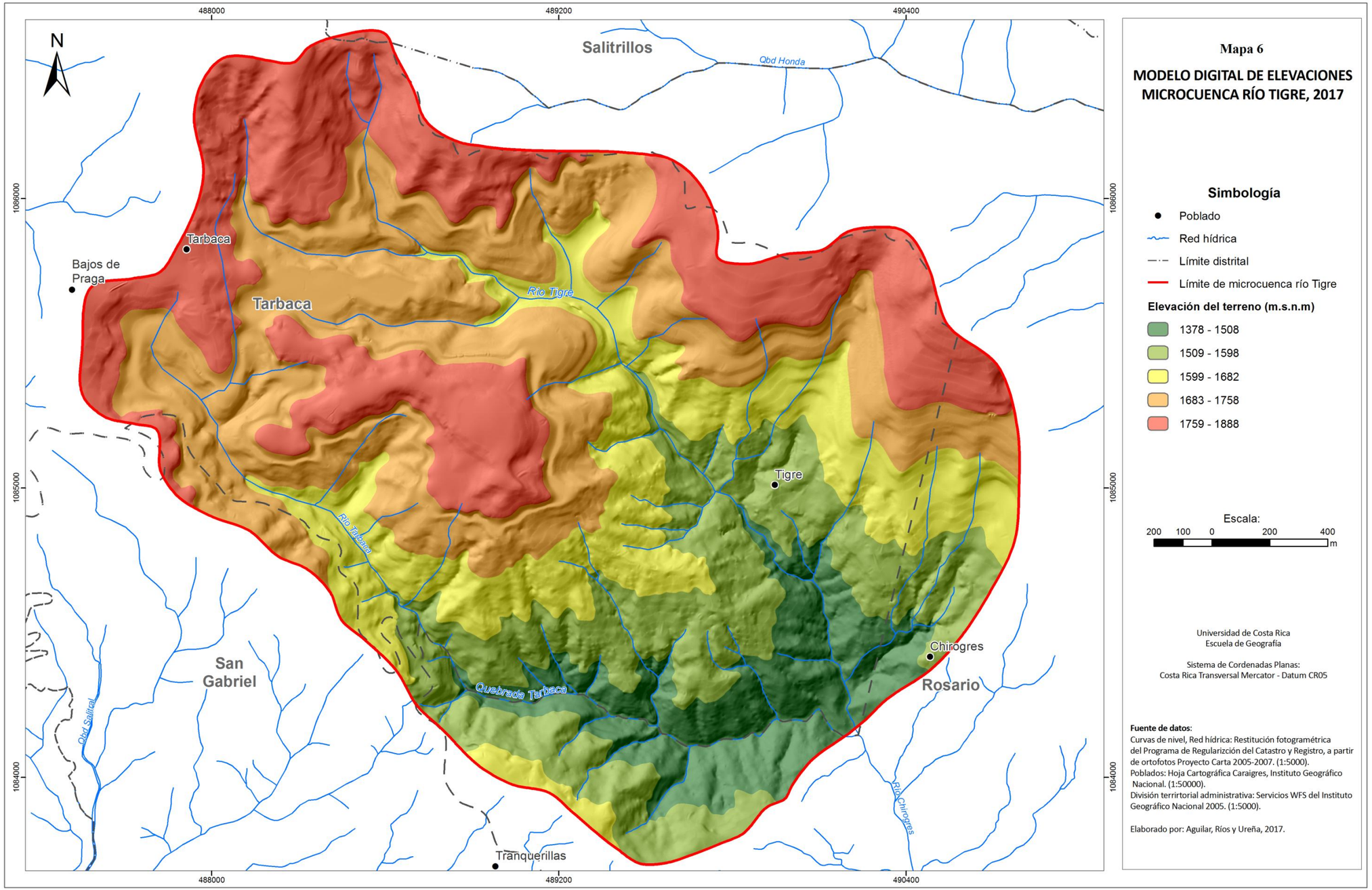
La microcuenca presenta una topografía que da forma a las montañas y laderas que a su vez son resultado de las estribaciones de la Cordillera de Talamanca. Presenta partes onduladas y planas que forman pequeños valles cuyas laderas están regadas por riachuelos (Mapa 6). La distribución espacial de la altitud varía entre los 1.300 y los 1.800 metros (Gráfico 9).

Gráfico 9. *Perfil topográfico, microcuenca río Tigre, 2017*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

Del perfil topográfico resultante se puede designar el área de estudio como una microcuenca en etapa juvenil, donde el ciclo erosivo permanece en constante actividad (Strahler, 1957), es decir se trata de una microcuenca geológicamente joven, donde los procesos de deformación tienen poco tiempo trabajando sobre el terreno (Davis, 1899).


Mapa 6
MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES
MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Poblado
Red hídrica
Límite distrital
Límite de microcuenca río Tigre
Elevación del terreno (m.s.n.m)
1378 - 1508
1509 - 1598
1599 - 1682
1683 - 1758
1759 - 1888
Escala:
200 100 0 200 400
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Curvas de nivel, Red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000).
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División territorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
488000
489200
490400
1086000
1085000
1084000
Salitrillos
Qbd Honda
Tarbaca
Bajos de Praga
Tarbaca
Río Tigre
Tigre
Río Tarbaca
San Gabriel
Qbd Salitral
Quebrada Tarbaca
Chirogres
Rosario
Río Chirogres
Tranquerillas

La diferencia altitudinal ronda en los 500 m.s.n.m., sin embargo, define un relieve significativo favorable a la génesis y activación de procesos erosivos y de transporte de materiales. Mostrándose las mayores elevaciones (1.700 – 1.800 m.s.n.m.) en el centro, este y noroeste de la microcuenca, correspondiente a la zona de Tarbaca cubriendo un 55% del área.

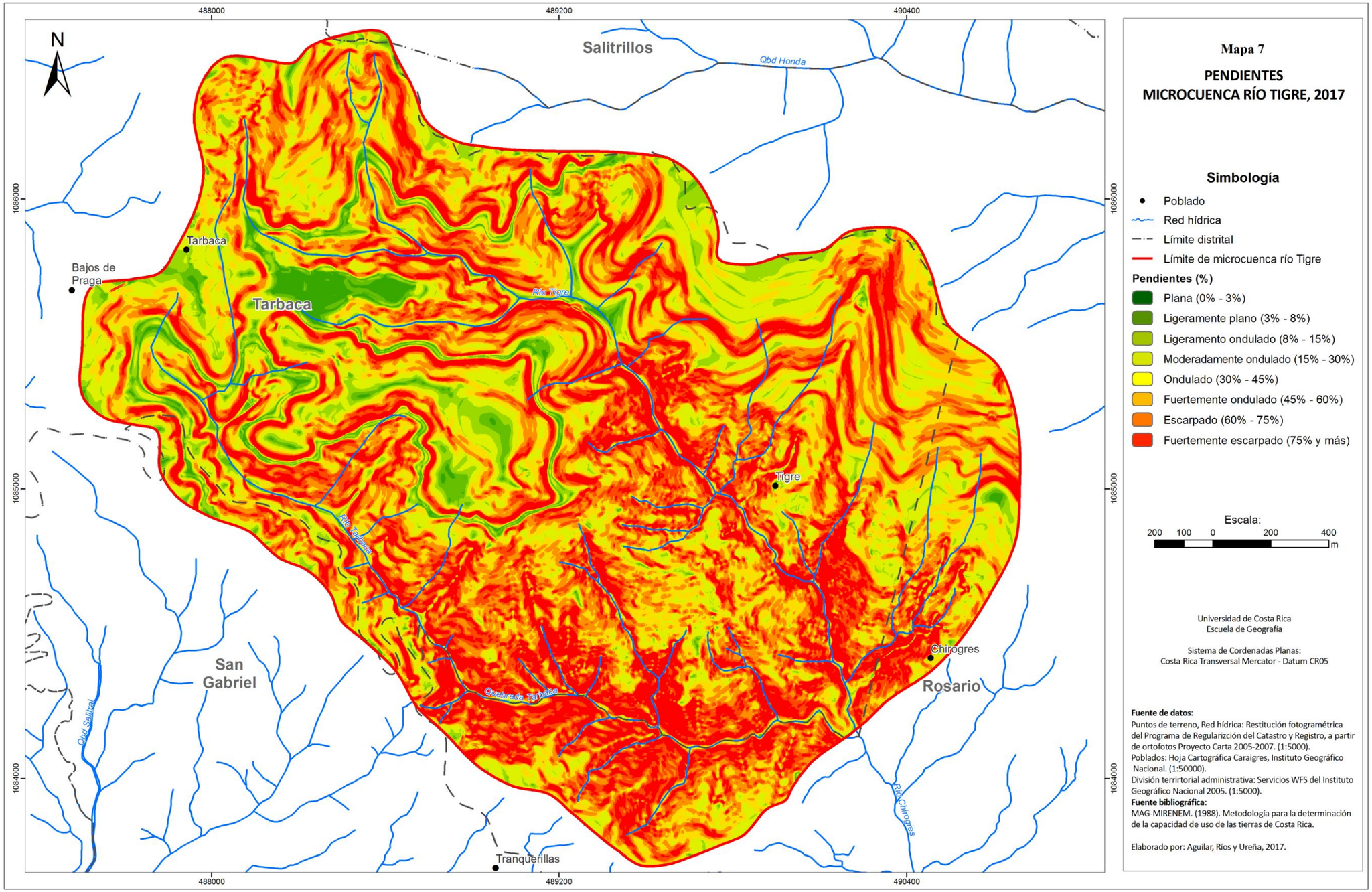
Tal como se observa (Mapa 6) en los poblados de Chirogres y El Tigre las elevaciones están entre los 1.500 m.s.n.m. Mientras que elevaciones medias (1.600 m.s.n.m.) se presentan en la parte central, suroeste y este.

La conformación del relieve y la clasificación de pendientes se asocian con el proceso de infiltración debido a que entre mayor sean las pendientes se propicia o atenúa la escorrentía superficial y la erosión, siendo esta última una variable que provoca pérdida del material que conforma el suelo y la escorrentía representa dentro del ciclo hidrológico una de los factores de pérdida de agua.

Las pendientes planas permiten que el agua de lluvia permanezca más tiempo en la superficie, tal como lo menciona Lobos (2015) la pendiente determina el tiempo de contacto del agua con la superficie del suelo. Lo que su vez contribuye a la infiltración de agua en el suelo, mientras que las pendientes inclinadas facilitan la escorrentía reduciendo la cantidad de agua que podría infiltrarse (Donis, 2015).

Las pendientes correspondientes a las características morfológicas definen la microcuenca dentro de las categorías de pendientes moderadamente onduladas hasta fuertemente escarpadas (15% hasta mayores a 75%). Mostrando muy poca presencia de sectores ligeramente planos. Consecuencia de tratarse de un sector montañoso de relieve abrupto que propicia tales pendientes.

Sobresalen los sectores fuertemente ondulados, escarpados y fuertemente escarpados, en el 54,2% de la microcuenca (Mapa 7). Lo cual sitúa la microcuenca con una posibilidad de recarga hídrica moderada.

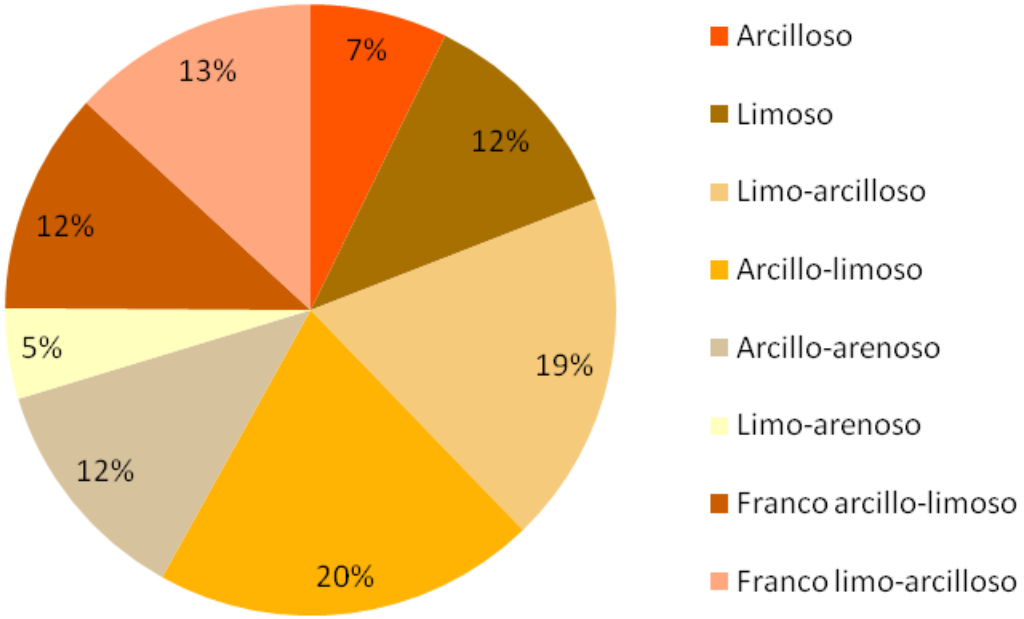

Mapa 7
PENDIENTES
MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Poblado
Red hídrica
Límite distrital
Límite de microcuenca río Tigre
Pendientes (%)
Plana (0% - 3%)
Ligeramente plano (3% - 8%)
Ligeramento ondulado (8% - 15%)
Moderadamente ondulado (15% - 30%)
Ondulado (30% - 45%)
Fuertemente ondulado (45% - 60%)
Escarpado (60% - 75%)
Fuertemente escarpado (75% y más)
Escala:
200 100 0 200 400
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Puntos de terreno, Red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000).
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Fuente bibliográfica:
MAG-MIRENEM. (1988). Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica.
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
Salitrillos
Qbd Honda
Tarbaca
Bajos de Praga
Tarbaca
Río Tigre
Tigre
Río Tabaca
San Gabriel
Qbd Salitral
Quebrada Tarbaca
Chirogres
Rosario
Río Chirogres
Tranquerillas
488000
489200
490400
1086000
1085000
1084000

2.5. Caracterización geopedológica

La capacidad de retención de un suelo depende de la composición de partículas de arenas, limos y arcillas, lo cual está ligado con la capacidad de infiltración del agua, ya que permite reconocer la permeabilidad y compactación del suelo.

Los resultados demuestran que en la microcuenca prevalecen las clases texturales arcillo-limosa (20%) y limo-arcillosa (19%); seguido por las clases limosa, arcillo-arenosa, franco arcillo-limosa y franco limo-arcillosa (13%). Se muestra abundancia de limos y arcillas en las diferentes clases (Gráfico 10).

Gráfico 10. *Clasificación de suelos por textura, microcuenca río Tigre, 2017.*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

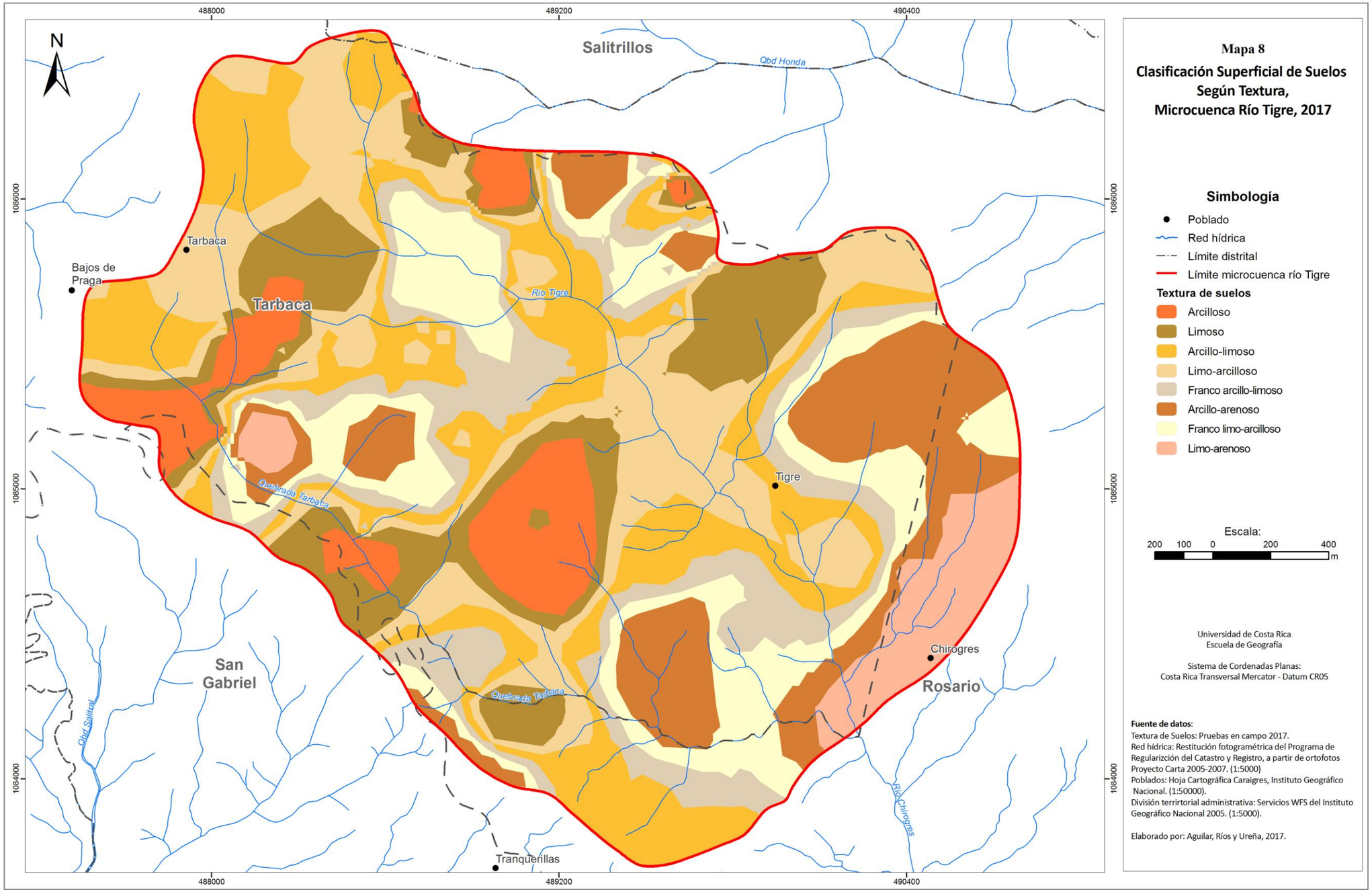
Las arcillas (Mapa 8) ocupan un área de 40,4 ha, las arcillas corresponden a las partículas más finas por lo que este tipo de suelos se caracterizan por ser pesados. La textura arcillosa se caracteriza por la plasticidad que presenta, ya que por su composición permitieron formar plastas largas siendo estas de entre 9 y 17 cm (Figura 18). La adhesión que presentó este tipo de suelo se clasificó entre alta y muy alta.

Figura 18. Obsérvese a la izquierda una plasta de 15 cm de largo y a la derecha un perfil (30cm) del cual del cual se obtuvo la muestra de suelo con una coloración de tipo Amarillento (Yellowish) de acuerdo al sistema de color de Munsell (7(Intensidad)/6 (Pureza), (Matiz 10YR).

Los suelos de textura limosa ocupan un área de 65,7 ha. Presentaron plastas de 8-9 cm (Figura 19) de largo, una adhesión relativamente baja y coloraciones de cafés a grises. Estos se caracterizan por la presencia de partículas que son muy suaves al tacto.

Figura 19. Obsérvese una plasta de 8cm de largo con una coloración Gris Pardusco (brownish gray) de acuerdo al sistema de color de Munsell (4(Intensidad)/2 (Pureza), (Matiz 10YR).

Este tipo de texturas suelen formar suelos compactos, sin embargo no al nivel de los arcillosos, la mayoría de este tipo de suelos es producto de la sedimentación de materiales finos arrastrados por el agua o el viento (Angelone y Garibay, 2014).


Mapa 8
Clasificación Superficial de Suelos Según Textura, Microcuenca Río Tigre, 2017
Simbología
Poblado
Red hídrica
Límite distrital
Límite microcuenca río Tigre
Textura de suelos
Arcilloso
Limoso
Arcillo-limoso
Limo-arcilloso
Franco arcillo-limoso
Arcillo-arenoso
Franco limo-arcilloso
Limo-arenoso
Escala:
200 100 0 200 400
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Textura de Suelos: Pruebas en campo 2017.
Red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
Salitrillos
Qbd Honda
Tarbaca
Bajos de Praga
Tarbaca
Rio Tigre
Quebrada Tarbaca
Tigre
Chirogres
Rosario
San Gabriel
Qbd Salitral
Quebrada Tarbaca
Rio Chirogres
Tranquerillas
488000
489200
490400
1086000
1085000
1084000

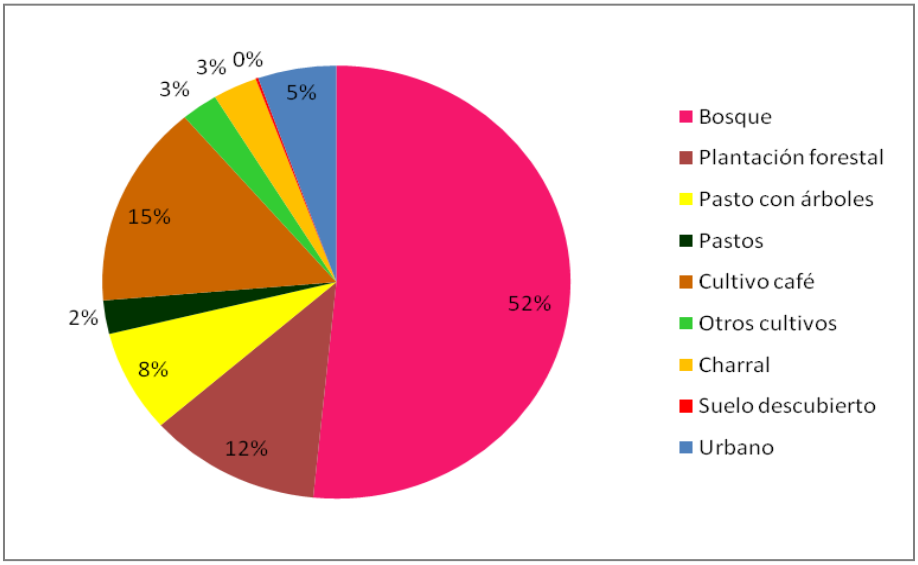
Los suelos de tipo arcillo-limosos (112,9 ha) y los limo-arcillosos (104 ha) se encuentran distribuidos por toda la microcuenca. Los suelos franco arcillo-limosos y franco limo-arcillosos ocupan 65,4 y 73 ha respectivamente de la microcuenca. Lo que permite reconocer que la microcuenca río Tigre se caracteriza por la presencia de suelos de textura fina, colocándose en la familia de suelos pesados, los cuales propician una disminución en la infiltración.

A nivel de órdenes de suelo el área de estudio presenta suelos ultisoles, estos pertenecen a los suelos más meteorizados y viejos del país (Cordillera de Talamanca). Los ultisoles se desarrollan sobre suelos ondulados y fuertemente ondulados de origen volcánico andesítico-basáltico, coluvial y sedimentario marino. Se caracterizan por ser suelos profundos con texturas de finas a muy finas (Chinchilla, Mata y Alvarado, 2011).

2.6. Uso actual de la tierra

Las coberturas terrestres que conforman la microcuenca son, la cobertura boscosa (52%), plantación forestal (12%), vegetación de tipo natural no forestal como zonas de charrales (3%), pastos (2%) y pastos con árboles (8%), estos dos últimos relacionados con la actividad agropecuaria. La actividad agrícola que sobresale es el cultivo de café (15%), pero se presentan además cultivos rotativos anuales como los frijoles, maíz, caña y cítricos (3%). Se evidencio también la existencia de zonas sin vegetación, relacionadas con la actividad urbana (5%): infraestructuras, caminos y suelos descubiertos (Gráfico 11).

Gráfico 11. *Uso de la tierra, microcuenca río Tigre, 2017.*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

El mayor porcentaje de uso está dado por el bosque (Figura 20) cuyas tierras se extienden por 288 ha dotadas de árboles de una altura mayor a los 5m y una cobertura de dosel superior al 10%.

Figura 20. Cobertura boscosa en ladera norte de la quebrada Tarbaca.

Se presentan bosques de tipo primario (Figura 21), es decir que ha sido generado de manera natural y cuyos procesos ecológicos no han sido alterados de manera significativa, y secundario (Figura 22) los cuales han llevado a un proceso de recuperación por regeneración natural (Evaluación de los recursos forestales mundiales, 2010).

Figura 21. En su interior se encuentran nacientes y captaciones de la ASADA.

Figura 22. Recuperado mediante labor de la comunidad y la ASADA, anteriormente era un potrero.

En elevaciones de 1.800 msnm se presentan bosques con características de ambientes más húmedos cubiertos por neblina (Figura 23), lo cual produce una reducción de la radiación solar y por ende en la evapotranspiración. Este tipo de cobertura tiene gran abundancia de helechos y musgos, así como de epífitas que viven en otras plantas y árboles.

Figura 23. Obsérvese el bosque en condiciones húmedas con la presencia de niebla y plantas epífitas en las partes altas los árboles. Bosque presente en la zona norte de la microcuenca.

El tercer gran uso presente en la microcuenca son las plantaciones forestales (Figura 24), es decir aquellos ecosistemas constituidos por la intervención humana, cuyo objetivo principal ha sido la producción de madera (ciprés).

Figura 24. Obsérvese una plantación forestal de alta densidad, sector noroeste de la microcuenca.

La extracción de madera debe realizarse mediante técnicas que evite la degradación del suelo, utilizando la tala selectiva para evitar la erosión del suelo, sin embargo hay evidencia que esto no se ha dado de ese modo (Figura 25) así como también la introducción de maquinaría para la extracción de estos productos ha provocado un fuerte impacto (Figura 26).

Figura 25. Parche de suelo descubierto (polígono color amarillo) producto de la tala rasa.

Figura 26. Nótese los cortes de camino creados para el acceso de maquinaria pesada, lo cual provoca inestabilidad en las laderas (flecha amarilla).

La cobertura de pastos y pastos con árboles (Figura 27) está relacionada con la actividad ganadera, la cual se lleva a cabo de manera extensiva; a pesar de que no es la actividad predominante ocupa un área total de 56,4 ha.

Figura 27. Pastos con presencia de árboles dispersos ubicado en el sector sur de la microcuenca.

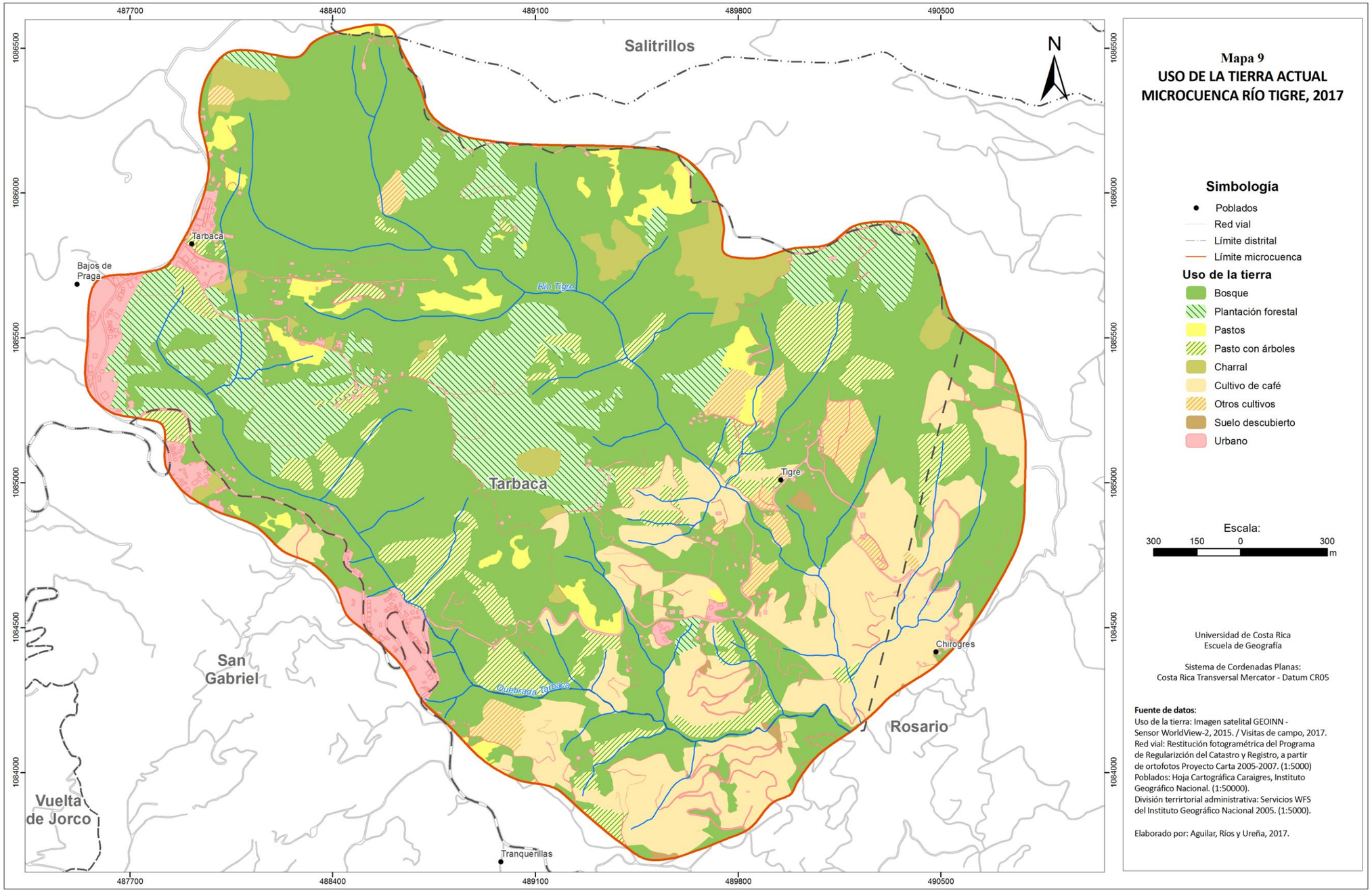
Mientras que los charrales presentes corresponden a zonas de fincas que se encuentran en descanso, es decir, que no han sido sembradas o bien el ganado ha sido retirado, además la vegetación que se presenta ha nacido por regeneración natural, en las cuales abundan las plantas espinosas y arbustivas con poca presencia de árboles (Figura 28).

Figura 28. Charral producto del abandono de un área de portero, ubicado en sector este de la microcuenca y cuyas plantas alcanzan hasta 1,5 m de altura.

La actividad agrícola se enfoca en el cultivo del café (Figura 29) ocupando 84,3 ha. Destacan entre las técnicas de cultivo los cafetales con sombra de musáceas y cítricos, lo cual se asocia con un doble propósito así como un adecuado manejo y aprovechamiento del suelo.

Figura 29. Nótese laderas del sector sur de la microcuenca con cultivo de café.

A pesar de que en muchas de las zonas se le da un buen manejo en otros casos las siembras se dan muy cerca de las quebradas o bien se han utilizado técnicas como la preparación de terrenos mediante la quema y se ha sustituido el bosque por este tipo de cultivos. Por otra parte, los cultivos de frijol, maíz, cítricos y caña se presentan en menor proporción que el café, ocupando 14,2 ha del total de la microcuenca, sin ningún patrón de distribución (Mapa 9).


Mapa 9
USO DE LA TIERRA ACTUAL
MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Poblados
Red vial
Límite distrital
Límite microcuenca
Uso de la tierra
Bosque
Plantación forestal
Pastos
Pasto con árboles
Charral
Cultivo de café
Otros cultivos
Suelo descubierto
Urbano
Escala:
300 150 0 300
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Uso de la tierra: Imagen satelital GEOINN - Sensor WorldView-2, 2015. / Visitas de campo, 2017.
Red vial: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
Salitrillos
Tarbaca
Bajos de Praga
Río Tigre
Tigre
Chirogres
Quebrada Tarbaca
San Gabriel
Rosario
Vuelta de Jorco
Tranquerillas
487700
488400
489100
489800
490500
1086500
1086000
1085500
1085000
1084500
1084000

Tal como se observa en el Mapa 9 el bosque se encuentra disperso por toda la microcuenca al igual que los pastos, mientras que las plantaciones forestales se concentran en la parte media. El cultivo de café se ubica principalmente al sur y sureste del área de estudio.

En vista que un buen porcentaje del área de estudio está cubierto por bosque influye positivamente en el proceso de infiltración del agua, así como también le propicia a la ASADA conservar su calidad. En el caso de las actividades agropecuarias se requiere desarrollar buenos métodos de manejo y conservación del suelo. De no ser así incrementan la escorrentía, los procesos erosivos y la compactación del suelo, lo que reduce significativamente la capacidad de infiltración y por ende la recarga hídrica.

2.7. Caracterización hidrográfica

Dado el énfasis de la investigación sobre el río Tigre y la quebrada Tarbaca, fuentes utilizadas por la ASADA de San Gabriel para el abastecimiento de agua potable a la población usuaria; la definición del punto de salida o el cierre de la microcuenca se efectuó en la confluencia de ambos cauces, que además marca el inicio del río Chirogres, del cual ambos son tributarios (Mapa 10).

2.7.1. Parámetros morfométricos

La superficie total delimitada según el punto de cierre considerado es de 5.55 km^2, mientras el perímetro en el que se comprende esta superficie es de 9.90 km (Tabla 5).

Tabla 5. *Parámetros morfométricos, microcuenca río Tigre*

Parámetros morfométricos	Valor	Unidades
Área	5,55	Km^2
Perímetro	9,90	Km
Índice de compacidad	1,18	
Índice de rugosidad del terreno	8,03	%
Índice topográfico de humedad	8,56	
Orden de la red hídrica	4	
Longitud de los cauces	21,41	km
Densidad de drenaje	4,04	Km/km2
Longitud del cauce principal	3,43	km
Pendiente media de los cauces	11,76	%

Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

Ambos parámetros dan como resultado un índice de compacidad de 1,18, lo cual siguiendo las categorías establecidas por la FAO confiere a la microcuenca río Tigre una forma casi

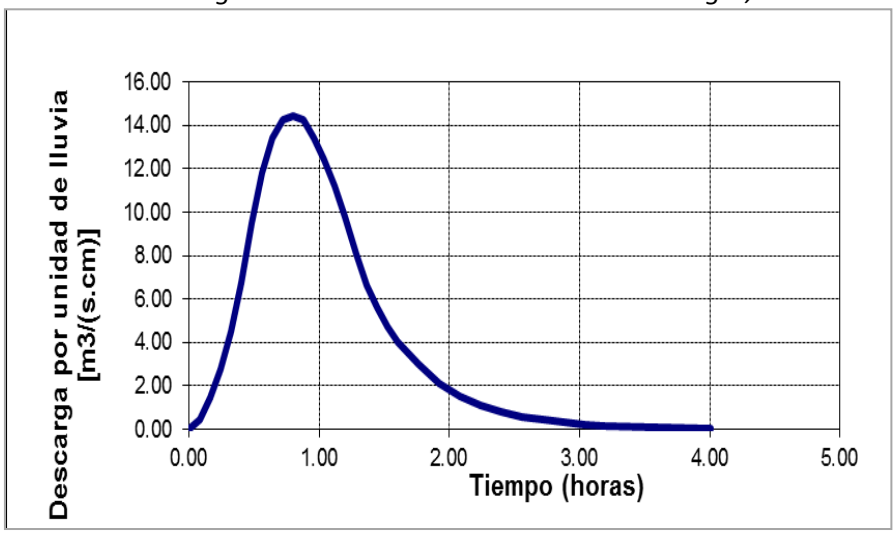
redonda u oval redonda (FAO, 1985 citado en CORTOLIMA, s.f.), clasificada como la más cercana a una circunferencia.

Las cuencas con este tipo de forma, presentan tiempos de concentración más reducidos respecto a las cuencas alargadas, lo cual está relacionado con la distancia similar desde cualquier punto de las divisorias hasta la confluencia de las aguas o cauce principal (Pesce, s.f.). La respuesta a caudales altos tiende a ser más concreta en estos casos, presentándose un hidrograma definido (de Matauco, 2004).

El cálculo de tiempo de concentración (Tc) da validez a la información anterior, con un resultado obtenido de 21 minutos (0,36 horas). La lluvia precipitada se tarda menos de media hora en llegar al sitio de descarga o punto de cierre de la cuenca en cuestión (Núñez, 2001).

Las variables morfométricas de forma y topografía de la microcuenca en cuestión, fueron consideradas para el establecimiento del hidrograma unitario (Gráfico 12). El método sintético derivado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS) representa la respuesta volumétrica del caudal en la cuenca como respuesta a una precipitación uniformemente distribuida sobre toda la superficie de 1 cm por hora (Ibáñez, s.f).

Gráfico 12. *Hidrograma unitario de la microcuenca río Tigre, 2016-2017*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

A raíz del modelo digital de elevación de la microcuenca, fueron determinados valores de índice de rugosidad del terreno de entre 0 y 49 % (0 – 16 m), encontrándose los valores

máximos en las laderas y en el fondo del cauce; el promedio para la microcuenca es de 8,03% (4,56 m). Lo cual es relativo a la sinuosidad de la superficie, y está íntimamente relacionado con la pendiente, siendo las zonas con mayor variación respecto a la media las más irregulares (Leiva, 2012).

Por su parte, para el índice topográfico de humedad (TWI) se distinguieron desde valores bajos (de cero y negativos) en el punto más alto de las divisorias de aguas y en las regiones de mayor elevación (sobre los 1.800 m.s.n.m.) y baja pendiente; áreas de producción de flujo de escorrentía (Ballerine, s.f). Mientras los valores más altos (12-21) se localizaron en los cauces de los ríos siendo en estos sectores donde existe mayor susceptibilidad a la saturación. El promedio para toda el área de estudio es de 8,56.

La configuración de la red hídrica del área de estudio está compuesta por 4 órdenes (Mapa 10), los cuales presentan una longitud total de 21,41km. La densidad de drenaje obtenida es alta, 4,04 Km/km^2 (Delgadillo y Páez, 2008 citado en Pinochet, 2013), lo cual siguiendo la base formulada por Horton, indica una evacuación de aguas en poco tiempo, y por lo tanto su respuesta ante un evento extremo es rápida (Gaspari *et al*., 2012).

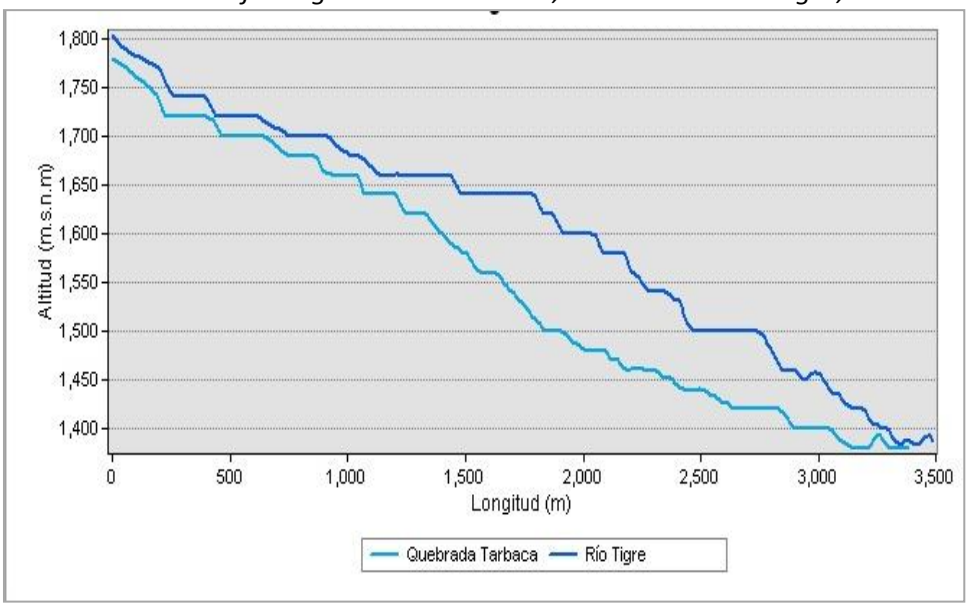
Dicha red esta predominada por los dos tributarios del río Chirogres, los cuales son de orden 3 y tienen longitudes parecidas. La longitud promedio de los cauces es de 3,43km, siendo el río Tigre el que presenta una extensión de 3,48km, sobrepasando por 10 metros a la quebrada Tarbaca, que se prolonga por 3,38km.

La relación existente entre la longitud de estos afluentes y la altitud del terreno en la microcuenca, analizada mediante un perfil longitudinal (Gráfico 13), ha sido antiguamente usada como indicador geomorfológico y tectónico. De acuerdo a esta visualización grafica se atribuye un estado de equilibrio a aquellos ríos con perfiles cóncavos, mientras los tramos con rupturas fuertes de la pendiente obedecen a forzamientos de tipo tectónico o a la litología del terreno (Capó y García, 2014).

Para el caso que acomete a esta investigación, en ambos ríos, durante los primeros 1.500 metros se observan discontinuidades comunes en el perfil; a partir de este punto la quebrada Tarbaca sigue sin mucho cambio hasta que desemboca en el río Chirogres. El comportamiento

observado en el río Tigre es diferente, ya que a la mitad del recorrido total, la pendiente evidenciada es más pronunciada, encontrándose muchos desequilibrios en su trayecto.

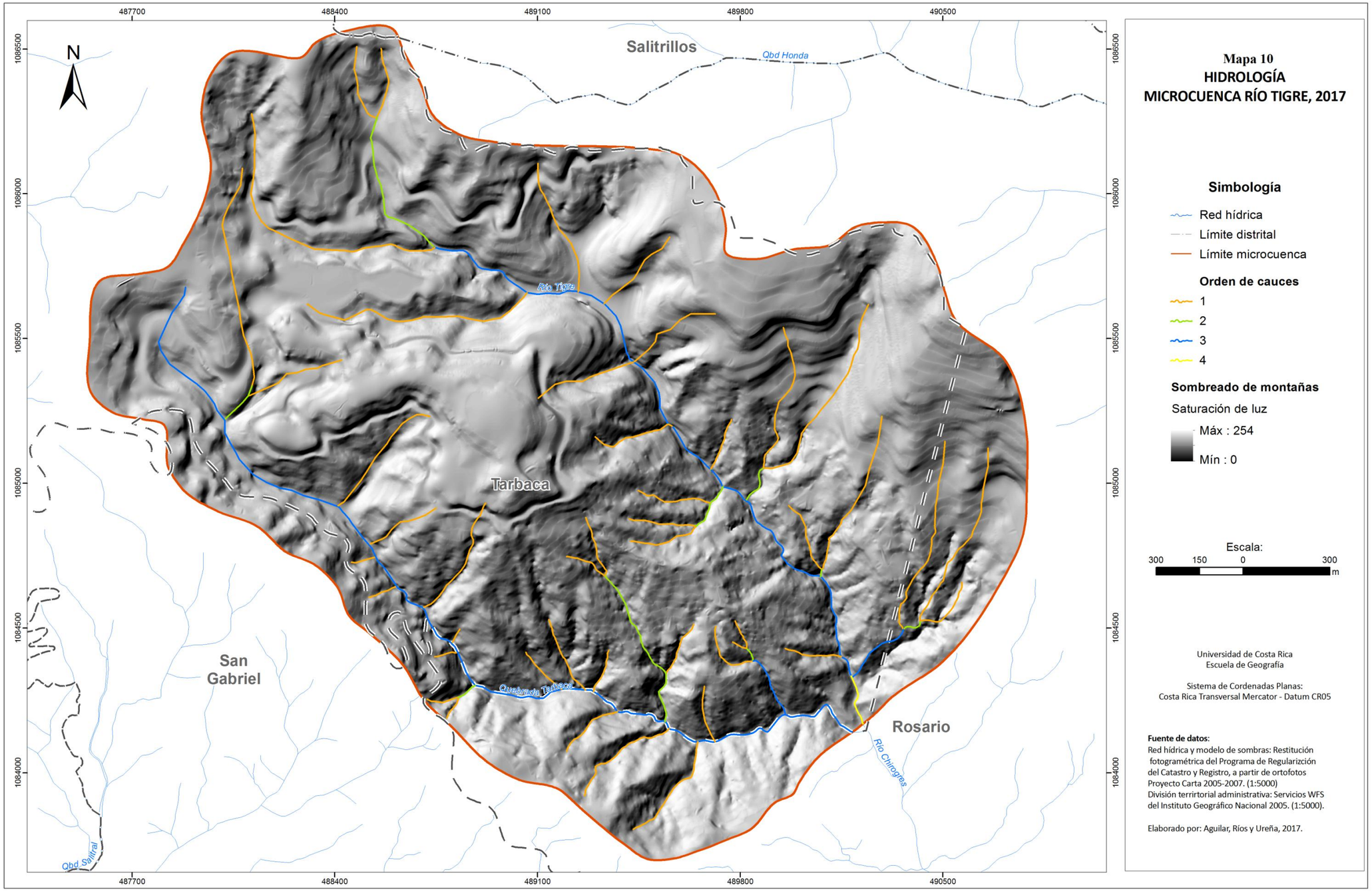
Gráfico 13. *Perfil longitudinal de los ríos, microcuenca río Tigre, 2017*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

Es, sin embargo, reconocido que la pendiente de ambos cauces presenta valores muy parecidos, esto determinado como la razón de la diferencia altitudinal entre la longitud del cauce, obteniéndose un valor promedio de 11,7% (0,117m/m) en el río Tigre y 11,83% (0,118m/m) en la quebrada Tarbaca, lo cual los califica como cauces accidentados (Heras, 1976 citado en Becerra Soriano, 2007), indicativo del poder erosivo y de arrastre (CORTOLIMA, s.f) de ambos ríos.

Las propiedades morfométricas destacadas para la microcuenca río Tigre, da indicaciones sobre el comportamiento hidrológico de la misma, debido a la forma presentada y la configuración topográfica accidentada se manifiesta una respuesta direccionada en mayor medida al escurrimiento superficial con potencial de generación de altos volúmenes de caudal, a rápida velocidad. Además de elementos topográficos que dan lugar a retenciones de agua a nivel del terreno, lo cual es propicio para la infiltración durante los eventos de precipitación y posteriormente a la recarga acuífera.

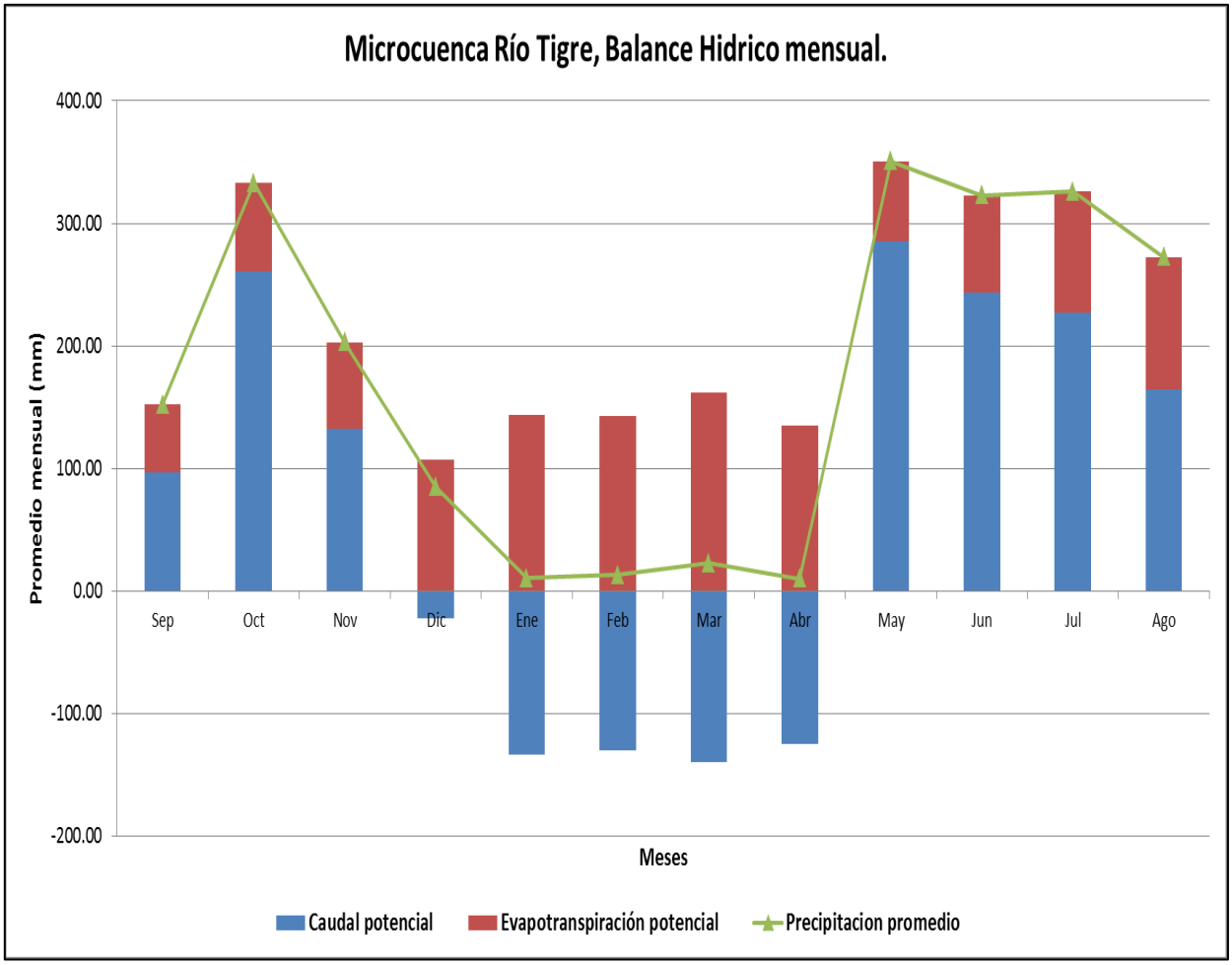

Mapa 10
HIDROLOGÍA
MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Red hídrica
Límite distrital
Límite microcuenca
Orden de cauces
1
2
3
4
Sombreado de montañas
Saturación de luz
Máx : 254
Mín : 0
Escala:
300 150 0 300
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Red hídrica y modelo de sombras: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
Salitrillos
Qbd Honda
Río Tigre
Tarbaca
San Gabriel
Quebrada Tarbaca
Rosario
Río Chirogres
Qbd Salitral
487700
488400
489100
489800
490500
1086500
1086000
1085500
1085000
1084500
1084000

2.7.2. Balance hídrico mensual

Durante el período analizado (septiembre 2016 – agosto 2017), las altas cantidades de precipitación caída sobre la microcuenca río Tigre logran solventar las pérdidas del sistema en la mayor parte del año.

El balance hídrico general entre las entradas (precipitación) y las salidas (evapotranspiración y escorrentía) es cerrado durante los meses lluviosos (Gráfico 14), durante los cuales los volúmenes de caudal posibles son mucho más importantes que la evapotranspiración potencial, atribuible a la nubosidad presente durante el período en cuestión.

Gráfico 14. *Balance hídrico mensual de la microcuenca río Tigre (septiembre 2016-agosto 2017).*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

Los dos componentes de salida son estimados en términos potenciales, es decir, lo que podría obtenerse o extraerse del sistema en condiciones de disponibilidad del recurso – en este caso del agua -, estableciéndose que durante los meses de mayo a noviembre la lluvia es suficiente para suplir las demandas de vapor de agua de la atmósfera y generar volúmenes de caudal altos.

Para el período lluvioso se estiman valores acumulados mensuales de precipitación cercanos a los 250 mm, los cuales se verían distribuidos en salidas de la microcuenca, de aproximadamente 70 mm en forma gaseosa, con cantidades menores en el mes de mayo y septiembre, y mayores en julio y agosto. El resto de la lluvia recibida se convertiría en caudales, con un rango entre 95 y 285 mm.

Durante los meses respectivos a la estación seca de la vertiente pacífica, consecuente con la gran radiación solar recibida en las zonas tropicales, se estiman valores potenciales de evapotranspiración más altos, por lo cual se conciben mayores déficits en estos meses.

Desde enero hasta abril el rango de evapotranspiración potencial es de 134 a 162 mm, en contraposición con cantidades de precipitación que no superan los 23 mm, insuficientes para solventar la demanda atmosférica, y motivo principal del desequilibrio estimado en el sistema hidrológico del área de estudio.

En el mes de diciembre el déficit es más pequeño, a pesar de la reducción en la cantidad de precipitación mensual (84 mm), se logra suplir en gran medida la demanda de la atmósfera de 107 mm.

Durante la época de faltante de lluvias, el caudal utilizado por la ASADA es suministrado por los depósitos subterráneos, de ahí la gran importancia de reconocer el potencial de recarga hídrica que se puede alcanzar en la microcuenca.

En términos anuales, el caudal potencial (860 mm), es superado por la evapotranspiración potencial (1.240 mm) y por la precipitación total anual (2.100 mm).

2.8. Caracterización demográfica

La microcuenca río Tigre la comprenden sectores de los distritos Tarbaca, San Gabriel y Rosario los dos primeros pertenecen al cantón Aserrí y el tercero a Desamparados. El mayor porcentaje de su área lo comprende Tarbaca (83%), seguido por Rosario (15%) y de último San Gabriel (2%).

La población que habita la cuenca es de 1.406 personas, donde 725 son hombres y 681 mujeres (INEC, 2011) (Tabla 6), de acuerdo a las estimaciones de población total, número de viviendas ocupadas por distrito y el número de edificaciones dentro de la microcuenca. La densidad de población es de 253 hab/km^2.

Tabla 6. *Población por sexo y distrito en la microcuenca río Tigre, 2011.*

Distrito	Hombre	Mujer	Total
Tarbaca	558	512	1.070
San Gabriel	98,6	99,5	198
Rosario	68,13	69,28	137
TOTAL	**725**	**681**	**1.406**

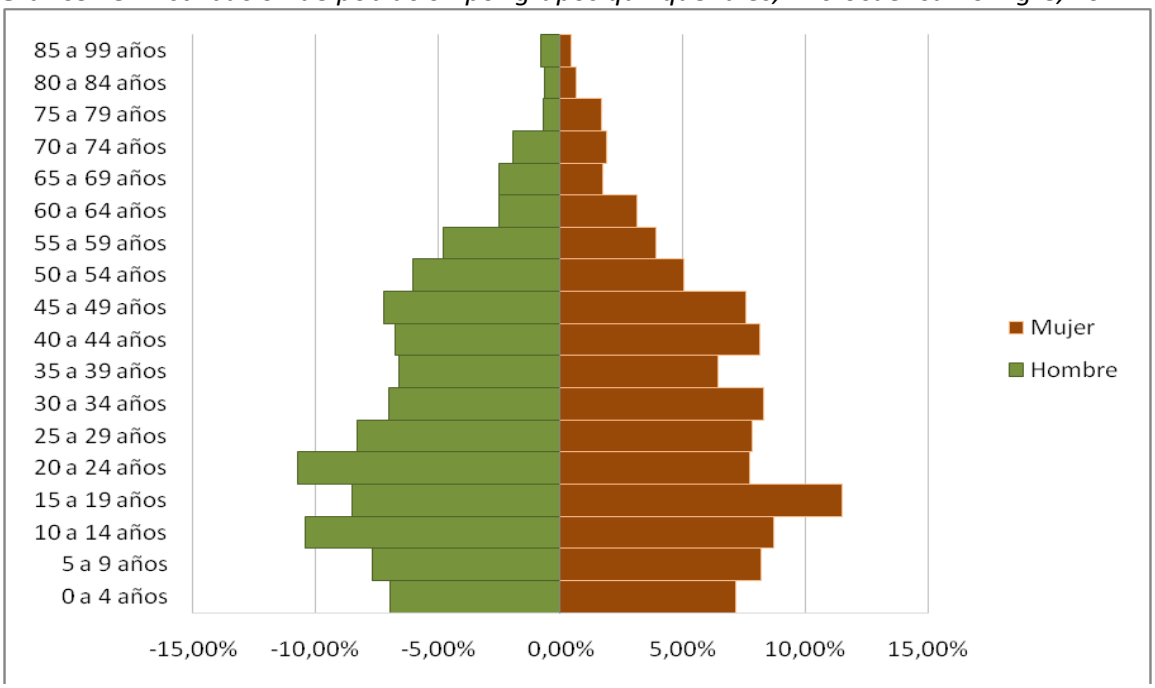
Fuente: INEC, X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda, 2011.
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

La población total de Tarbaca en la microcuenca representa un 74% del total del distrito (1.446 personas), por su parte de la población total del Rosario (3.088) el 4,45% se ubica en el área de estudio, y un 3,27% de la población total de San Gabriel (6.061) está dentro de la microcuenca.

Por lo tanto, los 1.406 pobladores de la microcuenca operan como actores directos ya que sus actividades impactan directamente el recurso hídrico. También se tienen un total de 1.540 actores indirectos, los cuales son abonados (pagan por el servicio de agua que administra la ASADA) pero no habitan dentro del área de estudio. La población que habita la microcuenca tiene la mayor responsabilidad en el tratamiento del recurso hídrico ya que sus actividades impactan directamente sobre el ecosistema.

El mayor porcentaje de población se presenta en las edades entre los 10 y 25 años conformando la base de la pirámide (Gráfico 15), mientras que se presenta una disminución de la población a partir de los 75 años.

Gráfico 15. *Distribución de población por grupos quinquenales, microcuenca río Tigre, 2017.*



Fuente: INEC, X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda, 2011.
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

La Asada de San Gabriel administra dos sistemas que incluyen plantas de potabilización de aguas en cada uno de ellos. La más grande es la que se alimenta del río Tigre y tiene una capacidad de 15 litros por segundo (Murillo, 2014), con lo que surte a 1.416 abonados de la comunidad de San Gabriel (ASADA San Gabriel, 2017). La segunda planta recibe el agua de la quebrada Tarbaca y su capacidad es de 5 litros por segundo (Murillo, 2014), que se utiliza para abastecer a 390 usuarios del sector de Tranquerillas (ASADA San Gabriel, 2017).

Entre la población abonada se encuentran casas de habitación, empresas privadas, instituciones de gobierno, iglesias y escuelas. La planta Tarbaca suministra agua a 385 hogares y 5 edificaciones incluidas empresas privadas e instituciones gubernamentales. La planta Las Brisas provee agua a 1.371 construcciones incluidos hogares y escuelas, y 45 construcciones correspondientes a empresas privadas, iglesias e instituciones de gobierno (ASADA San Gabriel, 2017).

La población abastecida en promedio es de 7.224 habitantes para el año 2017. En vista que el valor promedio para consumo humano es de 180 l/d por persona (Rueda, 2016). Se tiene que la población abastecida por la ASADA San Gabriel consume un total de 1.300.320 l/d.

2.8.1. Relación ASADA, ambiente y población

De acuerdo a las proyecciones de población del INEC (2014), para el año 2025 la población en los distritos Tarbaca, San Gabriel y Rosario tendrá un incremento de 2.111 habitantes. Considerando que tal incremento sucederá de manera proporcional, se estima que para la microcuenca río Tigre el aumento poblacional será de 419 habitantes. Distribuidos de la siguiente manera: 200 habitantes para el distrito Tarbaca, 184 para San Gabriel y 35 para Rosario. Es decir la población total que habitará la microcuenca para el año 2025 será de 1.827 habitantes (Tabla 7).

Tabla 7. *Población total proyectada para el año 2025 en la microcuenca río Tigre*

Distritos	Población total
Tarbaca	1.255
San Gabriel	399
Rosario	173
TOTAL	**1.827**

Fuente: INEC, 2014.
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

La microcuenca verá aumentada su población en un 14,5%, lo cual a su vez representa un aumento en los efectos directos sobre el entorno ambiental, social y económico. Es decir, se generará una expansión del desarrollo urbanístico de la zona, lo cual puede traer consigo una disminución de las áreas boscosas, incremento de la contaminación de las fuentes de agua y un impacto directo en el manejo de los suelos, produciendo una disminución de la recarga hídrica.

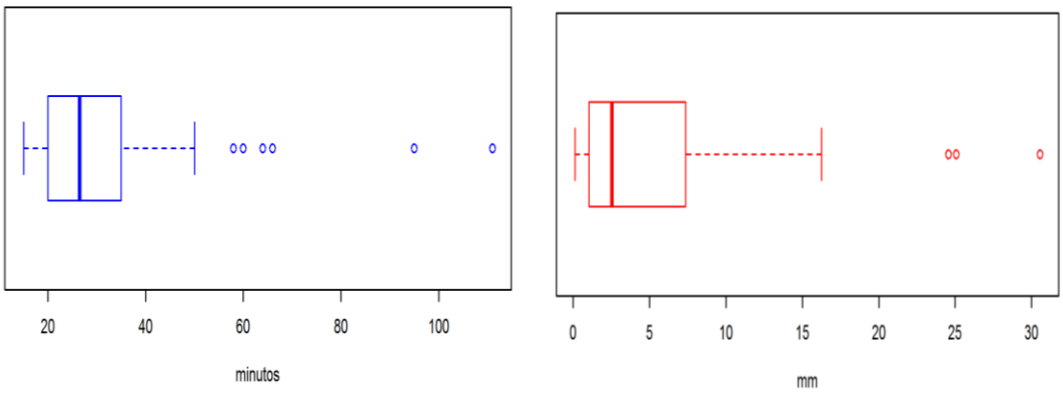
La ASADA suministró de agua potable a 1.540 abonados para el año 2014 (Murillo, 2014), para el año 2017 el número de abonados incrementó a 1.806; es decir hubo un aumento de 266 abonados (ASADA San Gabriel, 2017). Si se considera un aumento similar para los próximos años para el 2025 se podría esperar que su número de abonados aumente a 2.600, lo que implica que la ASADA disponga de agua suficiente y recursos técnicos para asumir tal incremento.

CAPÍTULO 3. INFILTRACIÓN EN LA MICROCUENCA

3.1. Particularidades de las pruebas realizadas

El tiempo mínimo de registro, a pesar de las ligeras o nulas variaciones en el nivel de agua, fue de 15 minutos, determinado como extensión necesaria para lograr visualizar la formación de la curva de infiltración. En el 50 % de las pruebas efectuadas, la tasa de infiltración constante, meta indispensable para finalizar la medición, se alcanzó entre los 20 y los 35 minutos (Gráfico 16, izquierda).

Gráfico 16. *Pruebas de infiltración, microcuenca río Tigre 2017.*



Los diagramas de cajas indican la duración (izquierda) y el total infiltrado (derecha) registrado en las pruebas de infiltración realizadas.

Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

Las duraciones mayores a los 55 minutos son consideradas atípicas respecto al conjunto de datos restantes; la gran mayoría de éstas tuvieron un período cercano a los 60 minutos, por lo cual su variación no es tan relevante respecto al resto de las pruebas registradas. Los casos extremos son presentados por dos pruebas con una duración de 95 minutos, y otra de 111 minutos, siendo la máxima extensión registrada.

Cabe destacar que en dos de estos casos extraordinarios las pruebas se efectuaron en las laderas cercanas al río Tigre, indicador del alto potencial de almacenamiento de agua del sector específico.

En lo respectivo al total infiltrado, en la mitad de las pruebas ingresaron cantidades inferiores a los 2,5 mm (Gráfico 16, derecha), volúmenes concernientes a suelos compactados y de

textura arcillosa en que se efectuó la prueba, además de contenidos de humedad precedente producto de precipitaciones caídas durante los días previos, también pudo estar relacionada con esta baja cantidad de agua infiltrada.

Las pruebas con infiltraciones atípicas o mayores a los 16 mm se presentaron en 4 ocasiones, dos de las cuales coincidieron con las duraciones de 95 minutos o más. Sin embargo, los dos valores más extremos, de 25 y 30 mm infiltrados, se obtuvieron en pruebas con duraciones de 58 y 64 minutos respectivamente.

La relación entre la duración y el potencial de infiltración de las pruebas efectuadas es significativa en los casos con valores más bajos, es decir, las pruebas con menores cantidades infiltradas tuvieron bajas duraciones. En el resto de los casos hay baja correspondencia entre la extensión y el agua ingresada en el suelo. La correlación de 0,56, de acuerdo al coeficiente de determinación (R^2), pone de manifiesto la variabilidad evidenciada durante las giras realizadas al área de estudio.

3.2. Caracterización de la tasa de infiltración

La amplitud de variación de la tasa inicial o tasa máxima de infiltración es la más grande, fueron estimados desde valores mínimos de 1.134 mm/h hasta extremos de 136 mm/h, lo cual evidencia una desviación estándar, o dispersión del conjunto de las 80 pruebas, mayor a los 30 mm/h respecto a la media (12,6 mm/h).

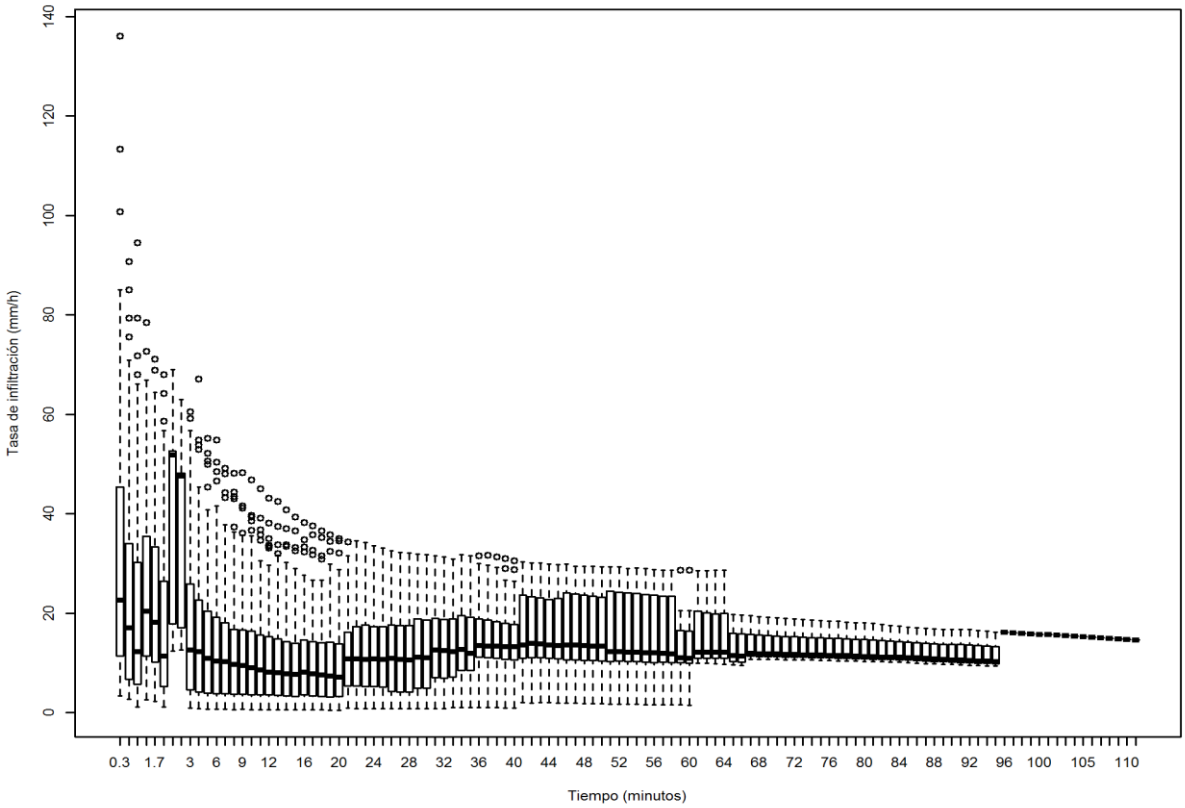
El descenso en la tasa de infiltración es proporcional al avance del tiempo, sin embargo, durante los primeros tres minutos son visualizadas grandes variaciones en el conjunto de datos considerados (Gráfico 17).

A partir de los 4 y hasta cerca de los 20 minutos es notable el continuo descenso de las tasas respectivas a cada prueba, con el pasar de los minutos y el alcance de la estabilización o tasa constante, para las pruebas con duraciones próximas a este período de tiempo y tasas de infiltración constantes promedio cercanas a los 10 mm/h.

Pasados los 20 minutos, el rango se vuelve más estrecho, producto de la reducción en la cantidad de pruebas consideradas, presentado un valor medio más alto, y donde los valores atípicos prácticamente desaparecen.

Después de los 68 minutos, la variación es representativa de únicamente 3 pruebas y a partir de los 95 minutos es atribuible a una única prueba, razón por la cual el gráfico de caja se presenta como un cuadro negro.

Gráfico 17. *Tasa de infiltración por lapso de tiempo, microcuenca río Tigre, 2017*



El gráfico presenta el rango de variación (boxplot) de la tasa de infiltración de las 80 pruebas respecto a cada paso de tiempo en el que se realizó la medición.
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

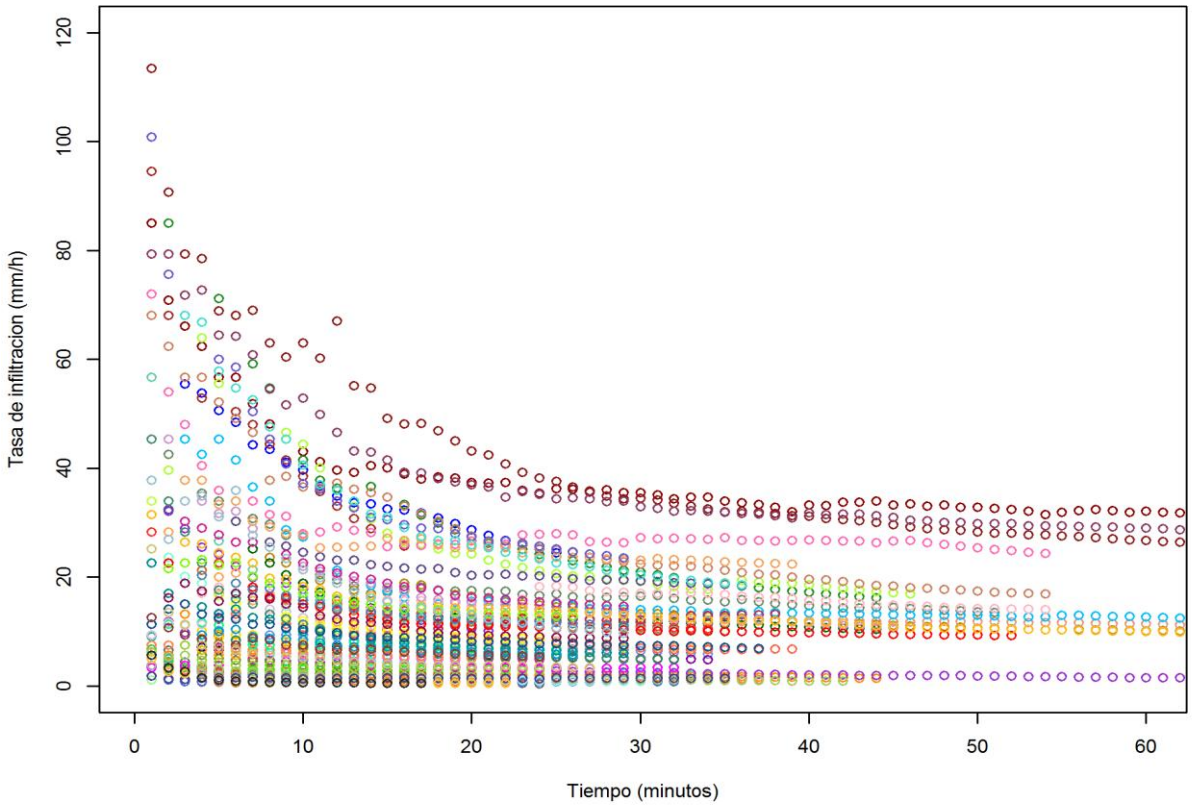
A pesar de todas las variabilidades descritas anteriormente, el resultado final generado por los datos individuales de cada prueba, muestra el comportamiento típico descrito por Horton y los demás autores después de éste, que han estudiado el proceso de infiltración. En todos los casos, se inicia con una tasa máxima que va disminuyendo conforme pasan los minutos, hasta alcanzar una velocidad de ingreso constante o en equilibrio.

Sin embargo, la curva de infiltración obtenida, en algunos casos, no muestra el descenso continuo de la velocidad que fue delineado como la curva típica de infiltración. Se denotan algunas fluctuaciones en la parábola exponencial que se genera por los datos, sobre todo al

principio de los registros, lo cual es evidenciado debido al corto lapso de tiempo entre mediciones (de 1 minuto o menos).

El Gráfico 18, recopila las 80 curvas de infiltración correspondientes a las pruebas realizadas en campo; a pesar de atribuírseles tonalidades y colores distintos, la sobreposición causada por tasas de infiltración similares o iguales y la aglomeración de muchas de las pruebas en velocidades de ingreso bajos, por debajo de los 20 mm/h, no permite diferenciarlas con claridad.

Gráfico 18. *Tasa de infiltración (mm/h), microcuenca río Tigre, 2017*



El gráfico presenta la curva de infiltración generada por los datos medidos en cada prueba (cada color representa una sola prueba).
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

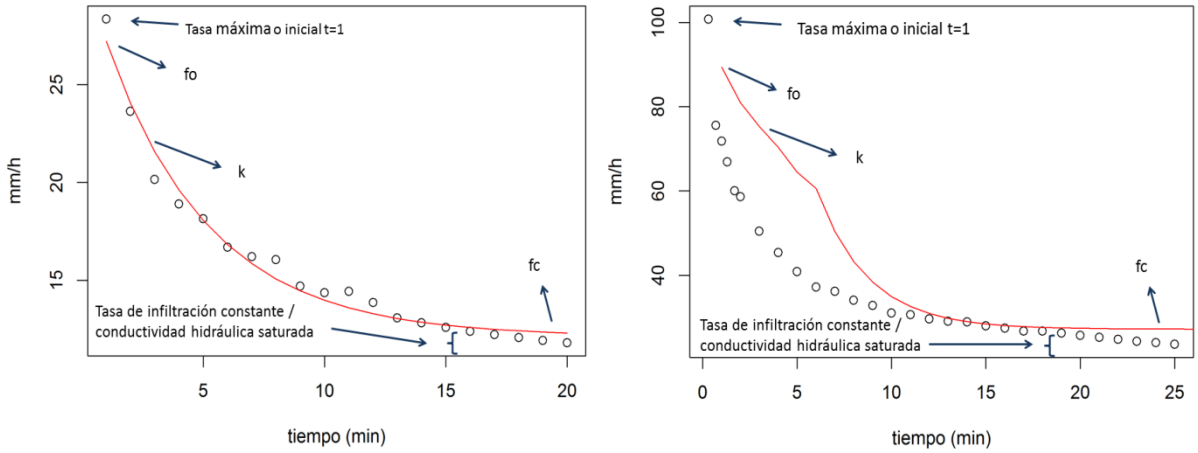
No obstante, en todas las pruebas realizadas se observa un comportamiento de descenso continuo en la infiltración al principio de los registros, y la finalización del proceso en una curva aplanada que evidencia la constancia en el ingreso de agua y es representativa de la conductividad hidráulica bajo condiciones saturadas del sitio de muestreo específico.

3.1. Caracterización de la capacidad de infiltración

Con el modelo de Horton, cada prueba, de forma particular, fue ajustada a una línea de tendencia que representa "el declive de la infiltración con el tiempo" *(*Alvarado y Barahona, 2017, p.26), y es simbólica de la capacidad de infiltración.

La integración de la ecuación de ajuste a los datos observados es prácticamente la misma que la generada por la tasa de infiltración medida en campo en algunos casos (Gráfico 19, izquierda), mientras que en otras pruebas el ajuste se desvía bastante de los valores obtenidos mediante el infiltrómetro de doble anillo.

Gráfico 19. *Ejemplos curvas de ajuste de los datos*, microcuenca río Tigre, 2017



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

Dicha variación suele ser mejor exhibida durante los primeros registros, correspondientes al descenso de la infiltración, es decir, la pendiente de la curva (Gráfico 19, derecha). El valor correspondiente a la capacidad de infiltración inicial "fo", es menor a la velocidad de ingreso inicial medida en campo en la mayoría de las pruebas.

La dispersión de los datos estimados de "fo" se reduce ligeramente con respecto a la tasa máxima medida en campo y considerada en párrafos previos, lo mismo ocurre con el rango o amplitud evidenciada, desde un valor mínimo de 1.199 mm/h hasta un valor máximo de 138.550 mm/h (Tabla 8).

La capacidad de infiltración final o en equilibrio “fc”, no presenta variaciones tan grandes con respecto a la conductividad hidráulica saturada o tasa de infiltración constante de los datos observados en campo. El valor medio presentado para el ingreso de entrada constante del agua en el suelo fue de 6,49 mm/h.

Tabla 8. *Estadística de los parámetros de capacidad de infiltración*

	fc	fo	k
Promedio	8,687	29,479	0,427
Desviación estándar	8,084	28,453	0,464
Mínimo	-1,100	1,199	0,010
Máximo	30.659	138.550	2.114
Mediana	6,490	19,922	0,223

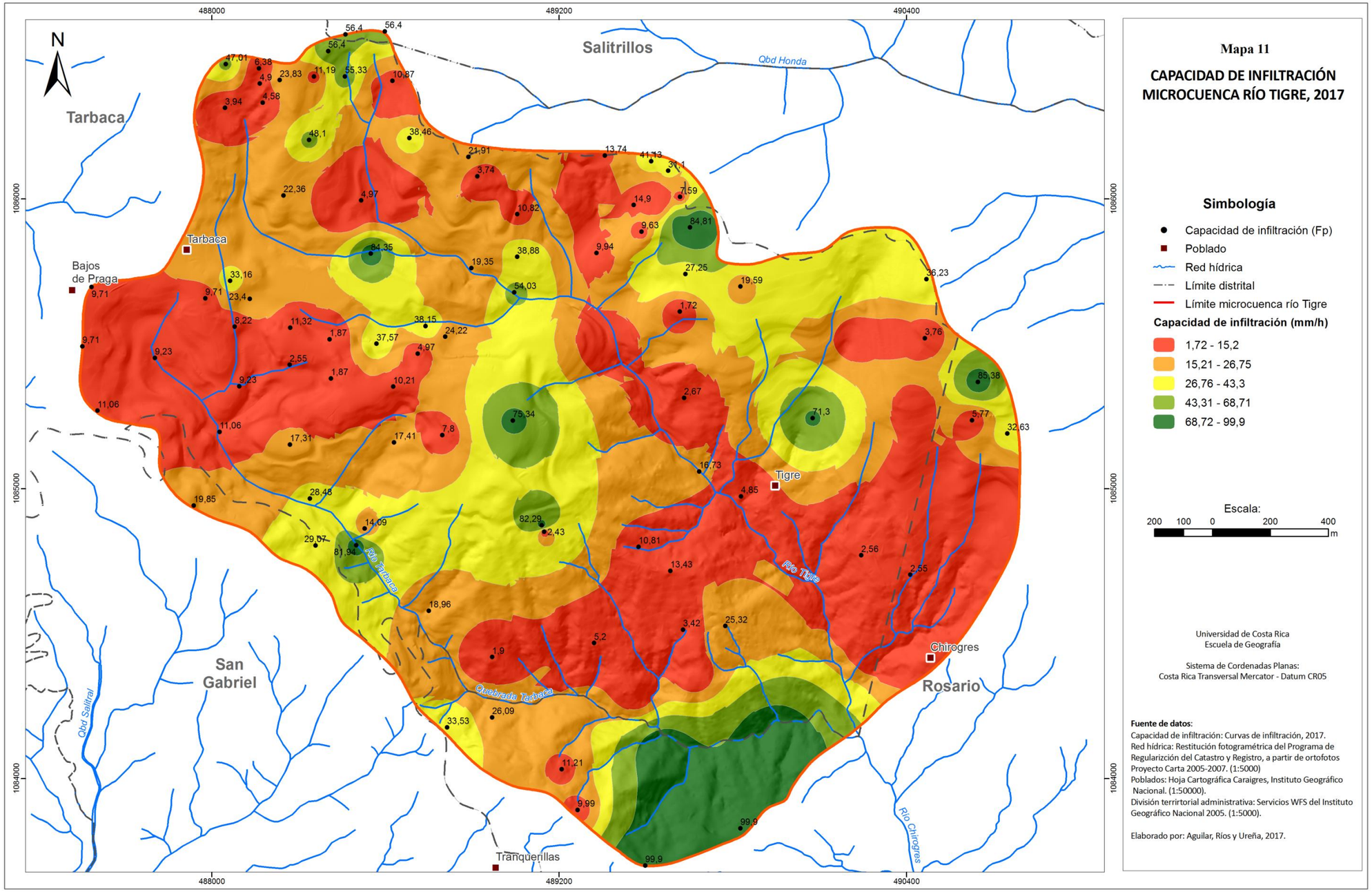
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

Los datos calculados según la curva de ajuste, muestran una correlación nula (0,79) entre ambos parámetros (fo y fc), evidenciando además que las pruebas con los valores más altos de capacidad de infiltración inicial no son correspondientes estrictamente con máximos de infiltración final, el mejor ejemplo se da con el máximo de “fo” que presenta una capacidad en equilibrio de 24,98 mm/h; mientras el valor más alto de “fc” (30.659 mm/h) se dio en la prueba con capacidad inicial de 79,19 mm/h.

La constante de decaimiento determinada para el tiempo inicial o máxima de la capacidad de infiltración muestra las desviaciones más pequeñas, en la mitad de las pruebas se estimaron valores de “k” menores a los 0,223, solo 10 pruebas presentaron valores superior a 1, dentro de las cuales se encuentra el máximo (2.114). El resultado de combinar los 3 parámetros mediante la ecuación de Horton se presenta en el Anexo 1.

Prácticamente el 90% de la microcuenca presenta capacidades de infiltración por debajo de los 43 mm/h (Mapa 11), los valores más bajos medidos, se localizaron principalmente en los valles y laderas cercanas a los afluentes principales, las nacientes de los ríos y pequeños tributarios ubicados en las zonas altas y en la confluencia o salida de la microcuenca.

Las máximas capacidades de infiltración, no presentan un patrón generalizable que pueda ser interpretado, algunos fueron identificados en zonas con gran elevación, pertenecientes a la divisoria central que separa ambos afluentes y en las laderas ubicadas al noreste de la microcuenca, otros se localizan en bajas altitudes cercanas a los cauces de los ríos.


Mapa 11
CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN
MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Capacidad de infiltración (Fp)
Poblado
Red hídrica
Límite distrital
Límite microcuenca río Tigre
Capacidad de infiltración (mm/h)
1,72 - 15,2
15,21 - 26,75
26,76 - 43,3
43,31 - 68,71
68,72 - 99,9
Escala:
200 100 0 200 400
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Capacidad de infiltración: Curvas de infiltración, 2017.
Red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
Salitrillos
Qbd Honda
Tarbaca
Bajos de Praga
Tigre
Chirogres
Rosario
San Gabriel
Tranquerillas
Río Tarbaca
Río Tigre
Río Chirogres
Quebrada Tarbaca
Qbd Salitral
488000
489200
490400
1086000
1085000
1084000

3.3. Caracterización de la conductividad hidráulica saturada

La conductividad hidráulica describe la movilidad del agua subsuperficial o subterránea, por lo que depende del grado de saturación y la naturaleza del suelo (Donado y Colmenares, 2004). Dicho parámetro es una propiedad de los medios porosos, en términos hidrogeológicos,

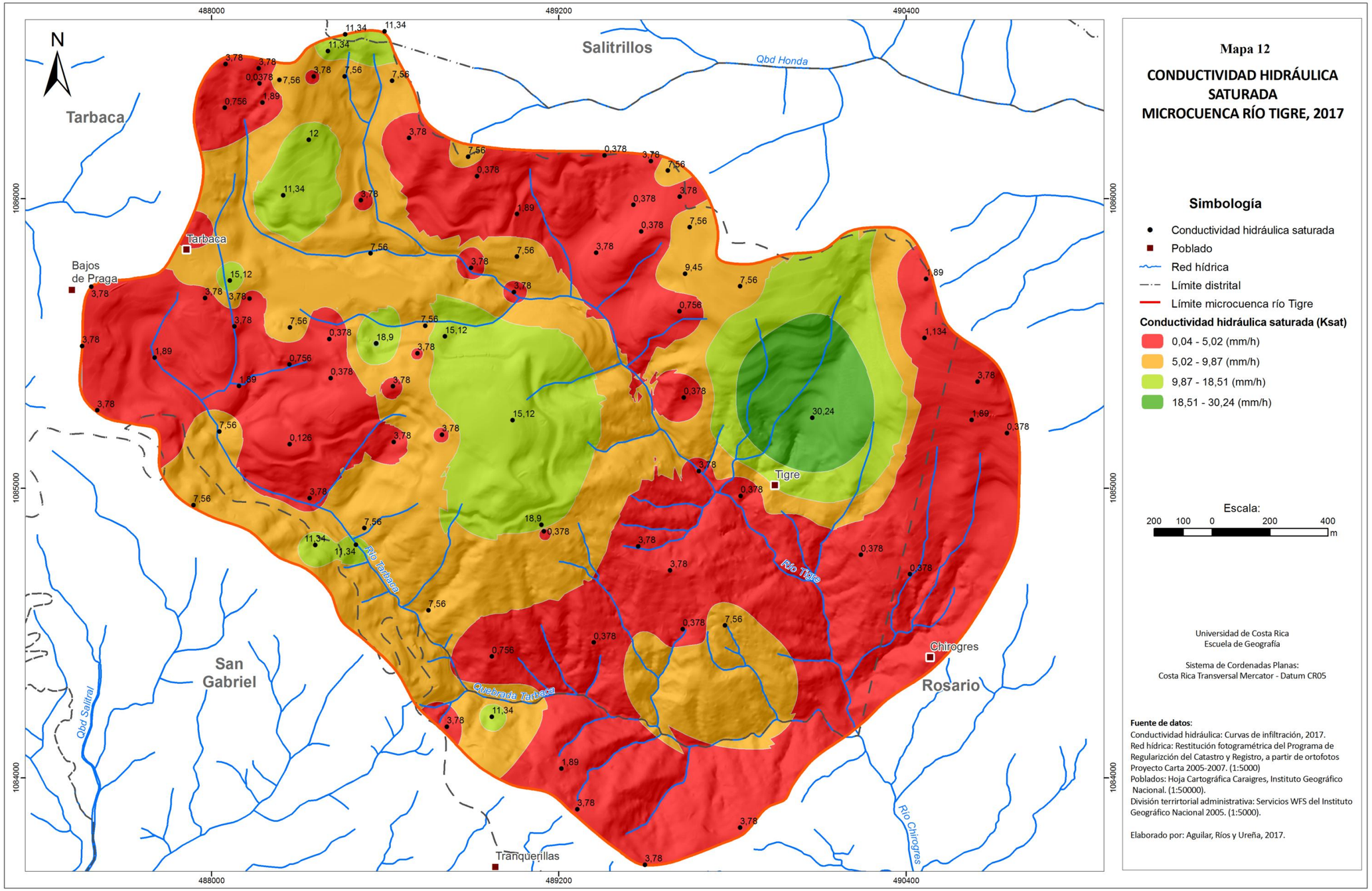
> "un medio tiene una conductividad hidráulica si puede transmitir en una unidad de tiempo una unidad de volumen de agua subterránea a una viscosidad predominante a través de una sección transversal unitaria, medida en ángulo recto a la dirección del flujo, bajo una unidad de gradiente hidráulico" (Barbecho y Calle, 2012, p.25).

La microcuenca río Tigre presenta un rango de valores de conductividad hidráulica saturada (ksat), entre los 0,04 y 30,24 mm/h (Mapa 12), con un promedio general de 5,3 mm/h lo cual califica a la microcuenca con una conductividad de muy lenta a lenta.

La distribución de la conductividad ha sido clasificada de acuerdo a los resultados de interpolación en: muy lenta (0,04 – 5,01 mm/h), lenta (5,02 – 9,87 mm/h), rápida (9,87 – 18,5 mm/h) y muy rápida (18,5 – 30, 24 mm/h).

Tal como se observa en el Mapa 12, la conductividad muy lenta abarca 2,6 km^2 del área de estudio, la conductividad lenta 1,9 km^2, mientras que la conductividad rápida y muy rápida abarcan 1 km^2 de la microcuenca.

Las conductividades entre 18,5 y 30,24 mm/h ocupan 3,6% del área de estudio mientras que las conductividades con valores entre 9,87 y 18,5 abarcan un 14,3%. Por su parte las conductividades entre 0,04 y 5,01 mm/h comprenden un área de 48%; y un 34,2% para las conductividades entre 5,01 y 9,87 mm/h.


Mapa 12
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA
MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Conductividad hidráulica saturada
Poblado
Red hídrica
Límite distrital
Límite microcuenca río Tigre
Conductividad hidráulica saturada (Ksat)
0,04 - 5,02 (mm/h)
5,02 - 9,87 (mm/h)
9,87 - 18,51 (mm/h)
18,51 - 30,24 (mm/h)
Escala:
200 100 0 200 400
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Conductividad hidráulica: Curvas de infiltración, 2017.
Red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
Salitrillos
Qbd Honda
Tarbaca
Bajos de Praga
Tigre
Chirogres
Rosario
San Gabriel
Tranquerillas
Río Tarbaca
Río Tigre
Río Chirogres
Qbd Salitral
Quebrada Tarbaca
488000
489200
490400
1086000
1085000
1084000

3.4. La infiltración en el contexto geoambiental de la microcuenca

La infiltración y la recarga hídrica se ve afectada por factores que intervienen en el proceso de penetración del agua a través de la superficie de terreno, tales factores definen las características del terreno del medio permeable.

Los factores climáticos como la precipitación, afectan la recarga hídrica, ya que las lluvias en las zonas de recarga son la principal y más importante fuente de abastecimiento de agua (Matus, Faustino y Jiménez, s.f.). Aunado a que los sitios de mayor elevación son donde se producen las mayores precipitaciones, por ende son zonas con potencial acuífero relevante.

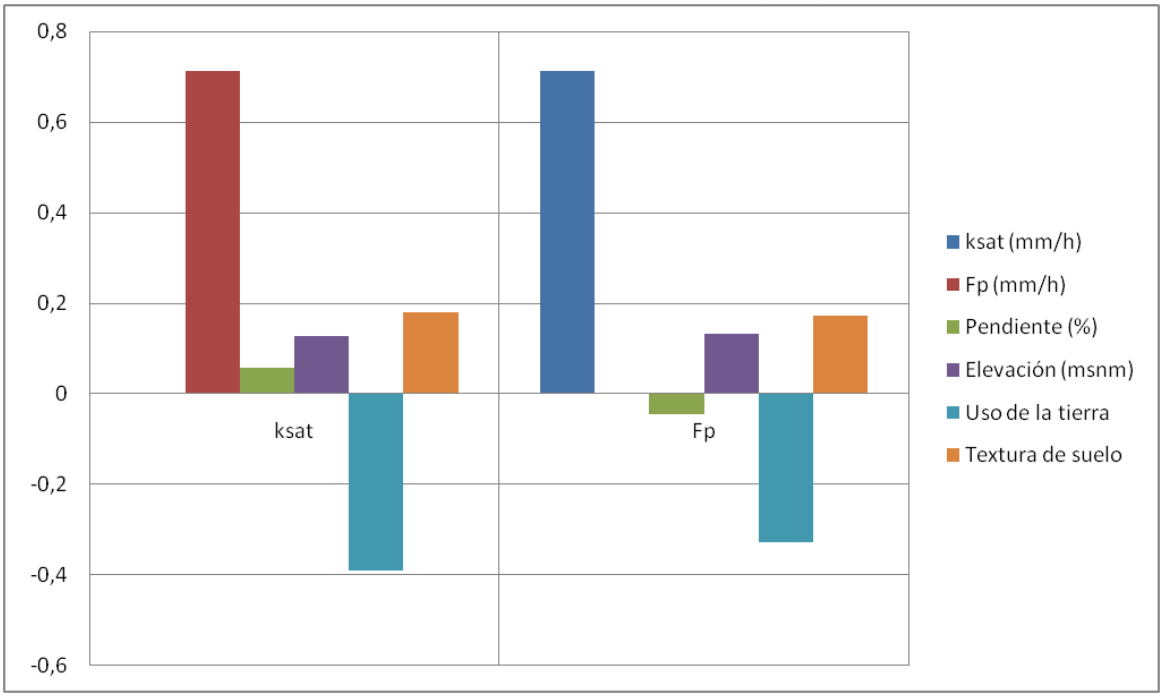
Otros factores relacionados con las condiciones del suelo son el uso de la tierra, en donde las superficies con mayor cobertura vegetal van a favorecer la infiltración, ya que las plantas protegen al suelo de la compactación por impacto de la lluvia, así como también ayuda a evitar la escorrentía superficial, y las raíces de las plantas y árboles abren grietas en el suelo que facilitan el ingreso del agua. Mientras aquellos sitios cuya superficie del suelo está más expuesta sean por actividades agropecuarias por ejemplo potreros, o debido al tránsito va a provocar menor penetración del agua y por consiguiente se reduce la infiltración.

La pendiente juega el papel de mantener, más o menos, tiempo de contacto el agua sobre el suelo, por lo que las pendientes menores favorecen el proceso, lo contrario a las pendientes abruptas que propician la escorrentía.

Otras características del terreno son la textura de los suelos, en donde cuanto mayor sea la presencia de materiales finos se expone a la separación y arrastre de tales materiales por el agua, lo cual provoca el llenado de poros; así también este tipo de suelos compactados impiden el paso del agua a través de ellos. Mientras que los suelos de textura gruesa, porosos tienen gran capacidad de recarga.

La relación existente entre las variables (pendiente, elevación, uso de la tierra y textura de suelo) respecto a la capacidad de infiltración (Fp) y la conductividad hidráulica saturada (Ksat) en la microcuenca mostró ser muy baja y en algunos casos no existe relación (Gráfico 20).

Gráfico 20. *Correlación de variables respecto a la capacidad de infiltración (Fp) y la conductividad hidráulica saturada (Ksat).*



Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

Se presenta una correlación alta (0,71) entre la capacidad de infiltración (Fp) y la conductividad hidráulica (Ksat). Sin embargo, la relación de dependencia entre la variable pendiente y conductividad hidráulica saturada es de 0,06 y respecto a la capacidad de infiltración es de -0,05; por tanto, se evidencia que no existe dependencia entre estas variables.

Respecto a la correlación de la elevación con la conductividad hidráulica saturada y la capacidad de infiltración es de 0,13; por lo que no se muestra una dependencia significativa. El uso de la tierra tampoco presenta relación con la conductividad saturada (-0,39) ni con la capacidad de infiltración (-0,33). La textura de los suelos es la variable que presenta mayor relación con la conductividad (0,18) y la capacidad de infiltración (0,17) comparado con el resto de variables.

3.5. Áreas potenciales de recarga hídrica

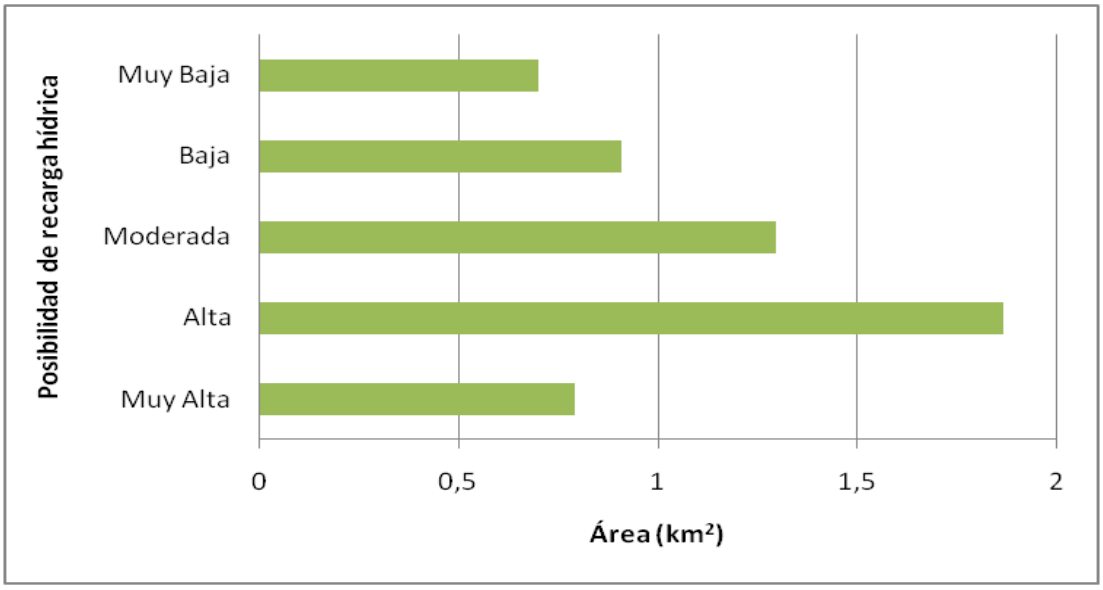
Las áreas de recarga son superficies en las cuales ocurre la infiltración que alimenta los acuíferos y cauces de los ríos (Gaceta, 1997). De acuerdo a los resultados de capacidad de infiltración y conductividad hidráulica saturada, así como la relación de ambas variables con la

textura del suelo presenta la distribución de las áreas de recarga sobre la microcuenca río Tigre (Mapa 13).

Al ser la textura un dato cualitativo le fue asignado un valor (peso) según el potencial que tiene respecto al proceso de infiltración. En donde los suelos arenosos son los que presentan mayores posibilidades de recarga y los suelos arcillosos por sus cualidades de poseer partículas finas y compactas presentan las menores posibilidades de recarga hídrica.

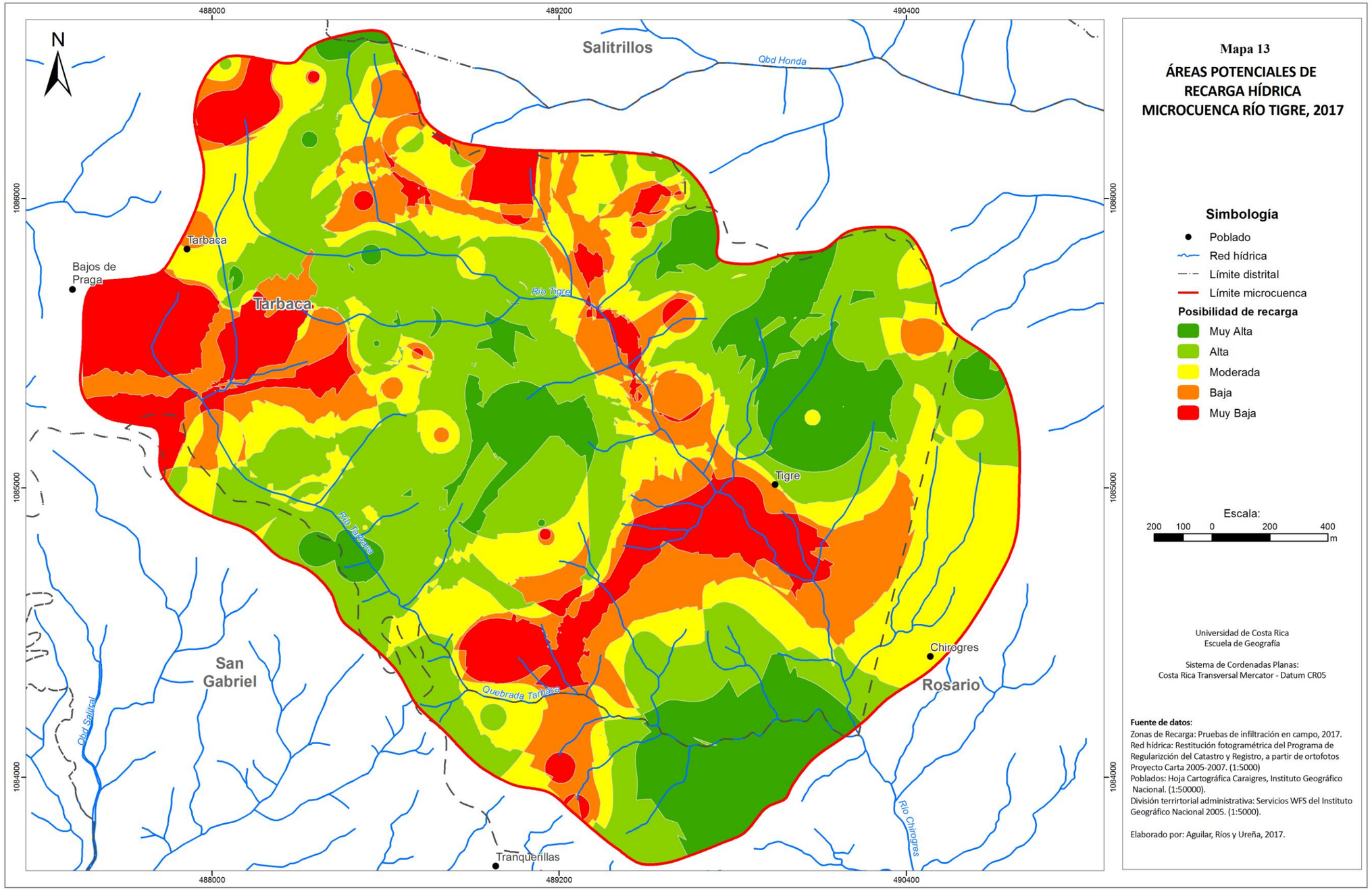
Las áreas aprovechables en términos de recarga, considerando las zonas con recarga muy alta, alta y moderada, abarcan 3,9 km^2 mientras que las zonas con poco o nulo (bajo y muy bajo) potencial de recarga ocupa 1,6 km^2 (Gráfico 21).

Gráfico 21. *Distribución del potencial de recarga hídrica en la microcuenca río Tigre, 2017*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

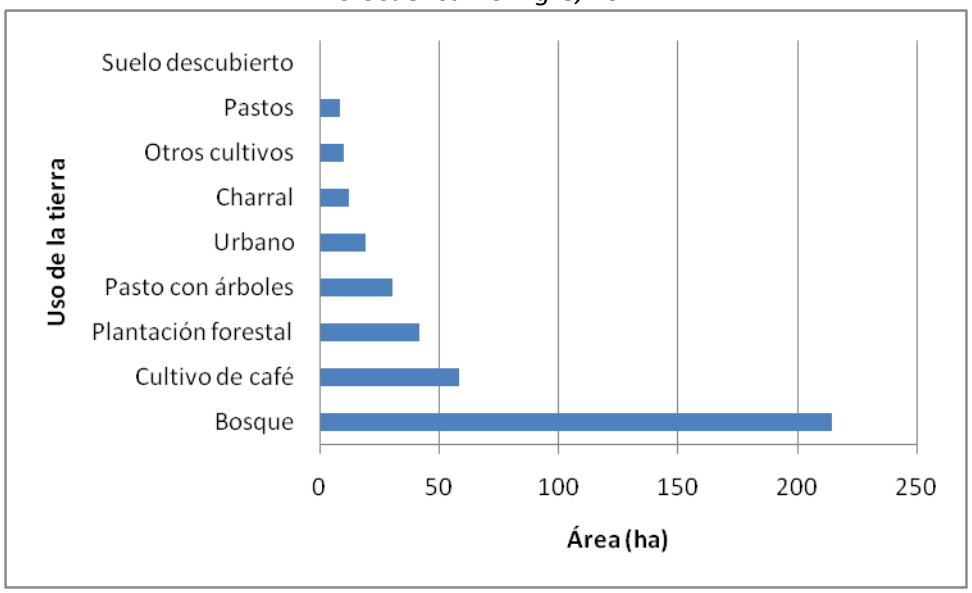
En la microcuenca prevalecen las áreas con alta posibilidad de recarga en un 33,6%, mientras que las zonas con poca posibilidad (baja y muy baja) de aprovechamiento representan un 28,9%. La posibilidad de recarga muy alta corresponde a 14,2% y 23,3% a las áreas con potencial moderado.


Mapa 13
ÁREAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Poblado
Red hídrica
Límite distrital
Límite microcuenca
Posibilidad de recarga
Muy Alta
Alta
Moderada
Baja
Muy Baja
Escala:
200 100 0 200 400
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Zonas de Recarga: Pruebas de infiltración en campo, 2017.
Red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularizción del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
Salitrillos
Qbd Honda
Tarbaca
Bajos de Praga
Río Tigre
Tigre
Río Tarbaca
San Gabriel
Quebrada Tarbaca
Qbd Salitral
Chirogres
Rosario
Río Chirogres
Tranquerillas
488000
489200
490400
1086000
1085000
1084000

Se muestra que las zonas con posibilidad de recarga ocupan los sectores centro y oeste, suroeste, este y un pequeño sector en norte. Mientras que los sitios no favorables para la recarga hídrica se distribuyen por toda la microcuenca.

Por otra parte, a pesar de que la variable uso de la tierra no presentó correlación con la capacidad de infiltración ni con la conductividad hidráulica saturada, cabe resaltar que gran parte de las áreas potenciales de recarga hídrica se encuentran ubicadas (Mapa 14) sobre zonas de bosque (Gráfico 22).

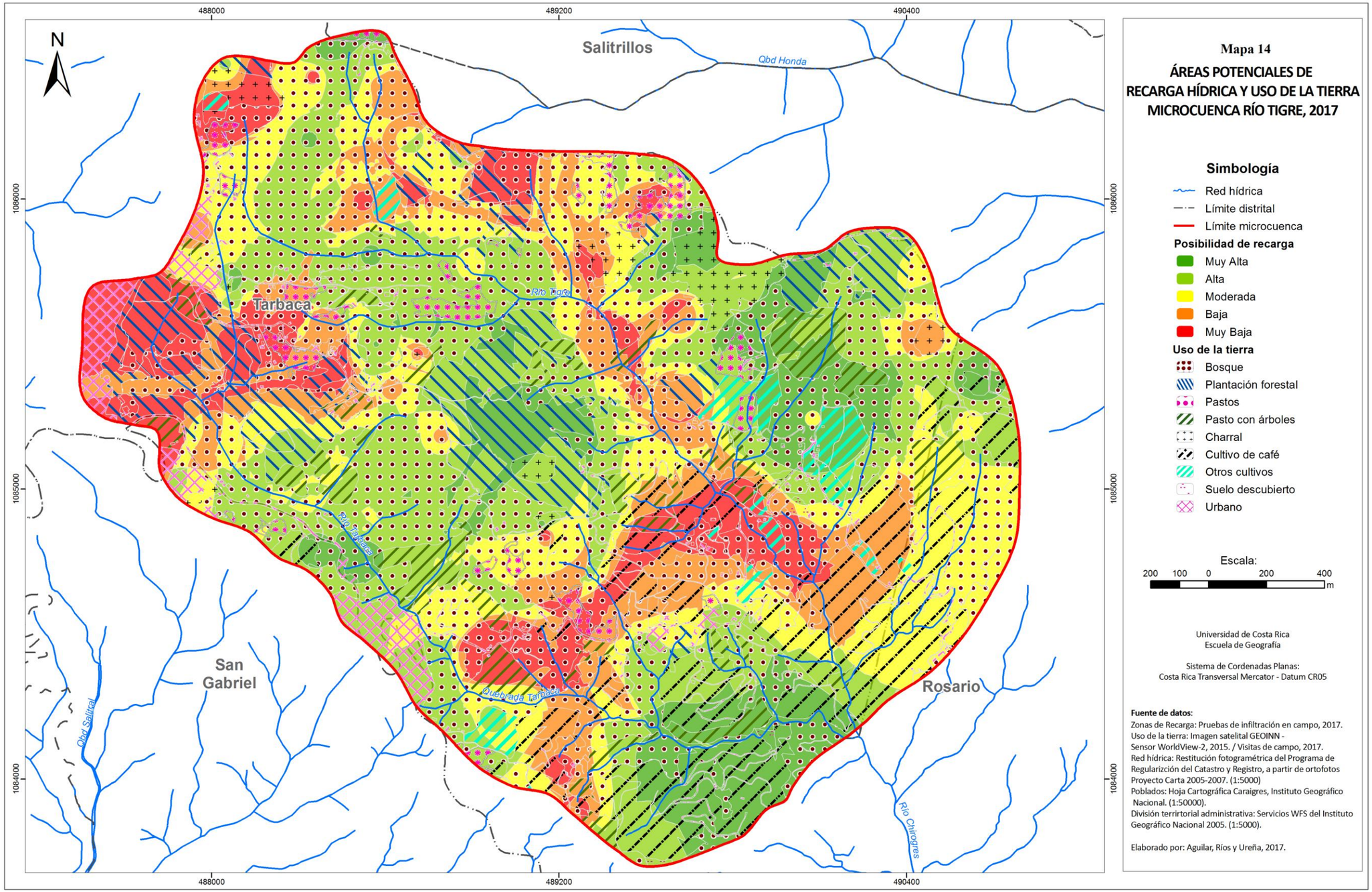
Gráfico 22. *Posibilidad de recarga muy alta, alta y moderada por uso de la tierra, microcuenca río Tigre, 2017.*



Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

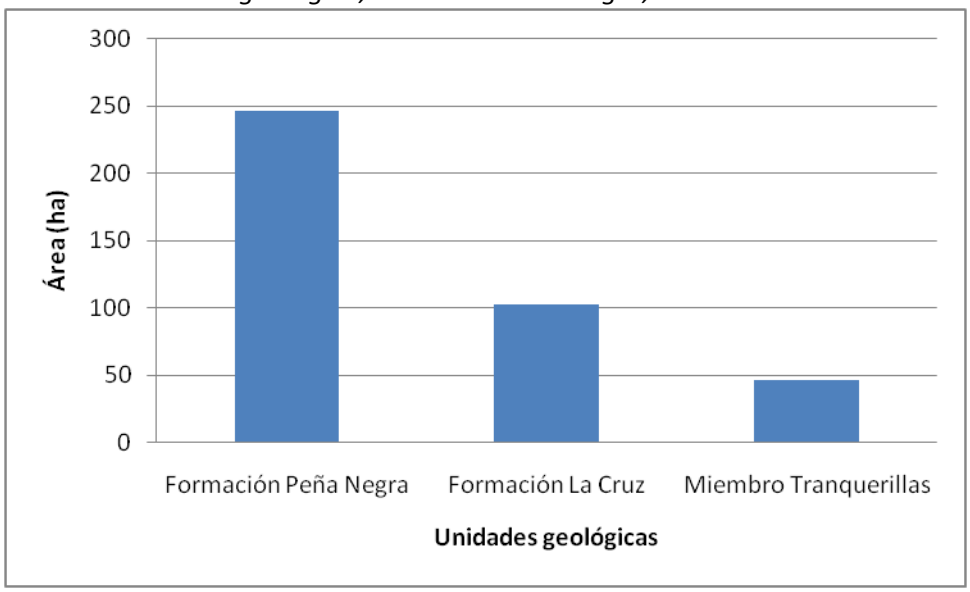
Para lo cual se tiene que la posibilidad de recarga muy alta sobre la cobertura de bosque ocupa 31,5 ha mientras que la posibilidad alta ocupa 108 ha. Considerando la posibilidad de recarga hídrica moderada, alta y muy alta que se presenta sobre los bosques de la microcuenca alcanzan un total de 214,6 ha, lo que representa un 38,5% del total del área de estudio.

Las áreas de plantación forestal corresponde a un total 42 ha de áreas potenciadoras (muy alta, alta y moderada) para la recarga hídrica, lo que representa un 7% del total del área de estudio. Mientras que las coberturas con menor potencial de infiltración (baja y muy baja posibilidad) lo representan en primer lugar las zonas suelos descubierto (0,8 ha) cual indica que este tipo de suelos están siendo mal manejados.


Mapa 14
ÁREAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA Y USO DE LA TIERRA MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Red hídrica
Límite distrital
Límite microcuenca
Posibilidad de recarga
Muy Alta
Alta
Moderada
Baja
Muy Baja
Uso de la tierra
Bosque
Plantación forestal
Pastos
Pasto con árboles
Charral
Cultivo de café
Otros cultivos
Suelo descubierto
Urbano
Escala:
200 100 0 200 400
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Zonas de Recarga: Pruebas de infiltración en campo, 2017.
Uso de la tierra: Imagen satelital GEOINN - Sensor WorldView-2, 2015. / Visitas de campo, 2017.
Red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Regularizción del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
Salitrillos
Qbd Honda
Tarbaca
Río Tigre
Río Tigre
Quebrada Tarbaca
San Gabriel
Qbd Salitral
Rosario
Río Chirogres
488000
489200
490400
1086000
1085000
1084000

Las áreas potenciales de recarga hídrica respecto a la geología (Mapa 15) muestran que la formación Peña Negra que cubre un área de 3,3 km^2 dentro de la microcuenca, presenta un 31% del área con posibilidad de recarga alta y muy alta (173 ha) del total de la microcuenca, y 13% del área con potencial moderado (73,4 ha). Es decir la posibilidad total de recarga en esta unidad geológica cubre un total de 246,4 ha (Gráfico 23). Lo cual coincide con el hecho de que tal formación está constituida por rocas permeables tales como areniscas, calizas y guijarros.

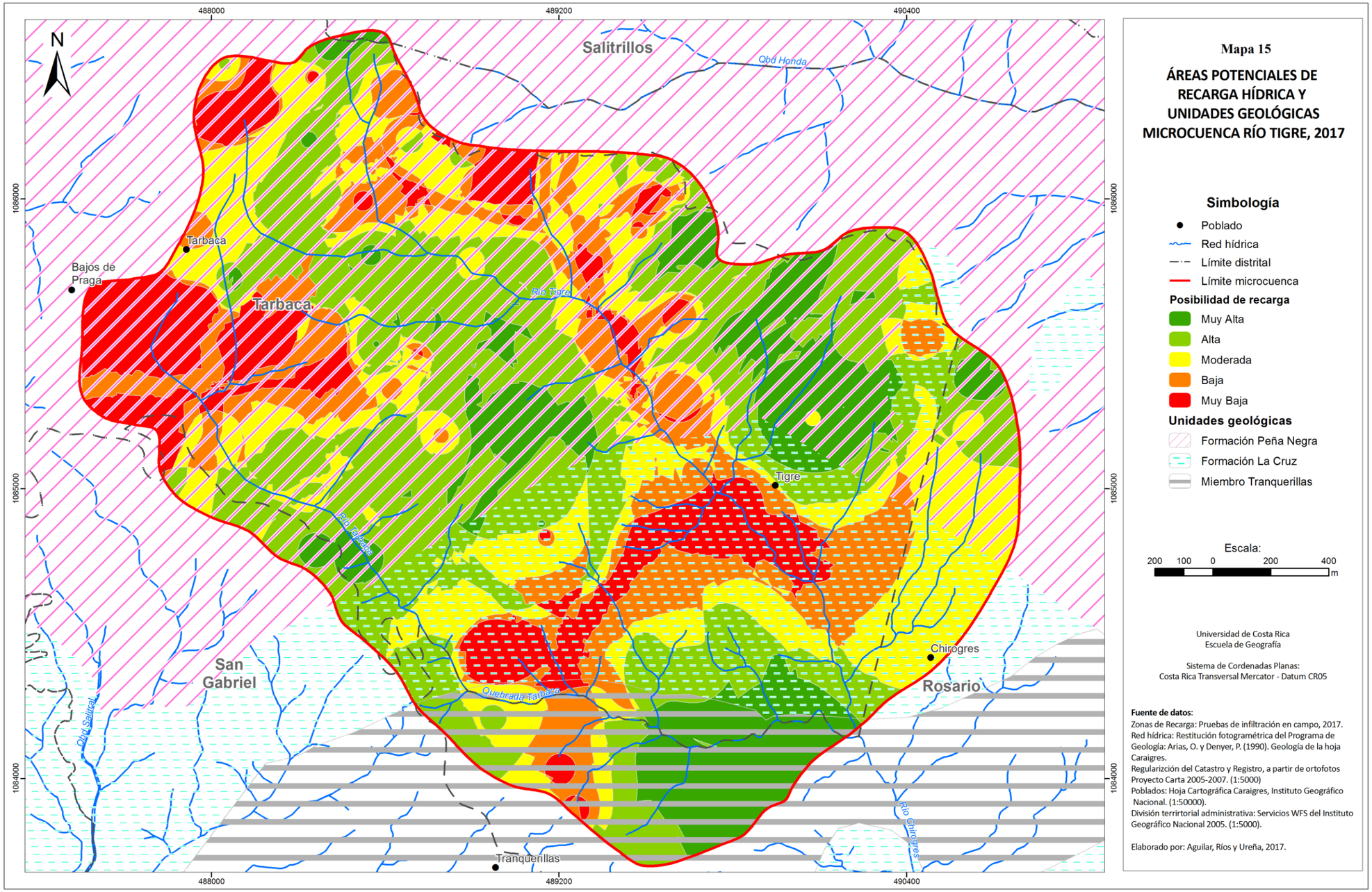
***Gráfico 23**. Posibilidad de recarga muy alta, alta y moderada por unidad geológica, microcuenca río Tigre, 2017.*



Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.

La formación la Cruz cubre 1,6 km^2, de los cuales un 18,5% del área total de la microcuenca corresponde a áreas con potencial alta, muy alta y moderada, ocupando un área de 103 ha. Es decir es una zona con menor potencial de recarga hídrica lo cual se debe a que la formación La Cruz la conforman rocas impermeables como basaltos y andesitas.

Finalmente, el miembro Tanquerillas ocupa un área de 0,6 km^2, está constituido por rocas permeables tales como areniscas, tobas, y vulcaneritas. Presenta 8,3% del total del área de estudio con posibilidad de recarga, moderada, alta y muy alta (46,5 ha), y tan solo 1,3% con posibilidad baja y muy baja (8,9 ha). Esta unidad representa bajo potencial de recarga respecto a las unidades anteriores, lo cual se debe a que en la unidad de menor área que ocupa el área de estudio.


Mapa 15
ÁREAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA Y UNIDADES GEOLÓGICAS MICROCUENCA RÍO TIGRE, 2017
Simbología
Poblado
Red hídrica
Límite distrital
Límite microcuenca
Posibilidad de recarga
Muy Alta
Alta
Moderada
Baja
Muy Baja
Unidades geológicas
Formación Peña Negra
Formación La Cruz
Miembro Tranquerillas
Escala:
200 100 0 200 400
m
Universidad de Costa Rica
Escuela de Geografía
Sistema de Cordenadas Planas:
Costa Rica Transversal Mercator - Datum CR05
Fuente de datos:
Zonas de Recarga: Pruebas de infiltración en campo, 2017.
Red hídrica: Restitución fotogramétrica del Programa de Geología: Arias, O. y Denyer, P. (1990). Geología de la hoja Caraigres.
Regularización del Catastro y Registro, a partir de ortofotos Proyecto Carta 2005-2007. (1:5000)
Poblados: Hoja Cartográfica Caraigres, Instituto Geográfico Nacional. (1:50000).
División terrirtorial administrativa: Servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional 2005. (1:5000).
Elaborado por: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017.
N
488000
489200
490400
1086000
1085000
1084000
Salitrillos
Qbd Honda
Tarbaca
Bajos de Praga
Tarbaca
Río Tigre
Tigre
Río Blanco
San Gabriel
Qbda Salitral
Quebrada Tarbaca
Chirogres
Rosario
Río Chirogres
Tranquerillas

CAPÍTULO 4. ESTIMACIÓN CUANTITATIVA DE LA RECARGA HÍDRICA

4.1. Modelo hidrológico

Para el uso del modelo, no se consideró la influencia del factor humano de acuerdo a lo estipulado en términos de uso de la tierra sobre la microcuenca, y por tanto los caudales no se ven afectados por el uso sobre el recurso, así como también se definió que las características hidrológicas, en términos de distribución de precipitación, evapotranspiración y capacidades de almacenamiento de agua, son generalizables para toda el área de estudio y el período analizado, ya que se trata de un modelo amontonado que no hace diferenciación espacial en la cuenca analizada (Birkel, 2009).

Por las razones antes mencionadas, únicamente se consideran las variables climáticas como entradas necesarias del modelo, los valores de precipitación y evapotranspiración medidos con las estaciones meteorológicas son incorporados en términos diarios, luego son alterados y separados en diferentes flujos y reservorios a fin de representar la generación de caudal en este sistema, obteniéndose un patrón con clara relación a los eventos atmosféricos comunes de la región Pacífica costarricense.

4.2. Evaluación

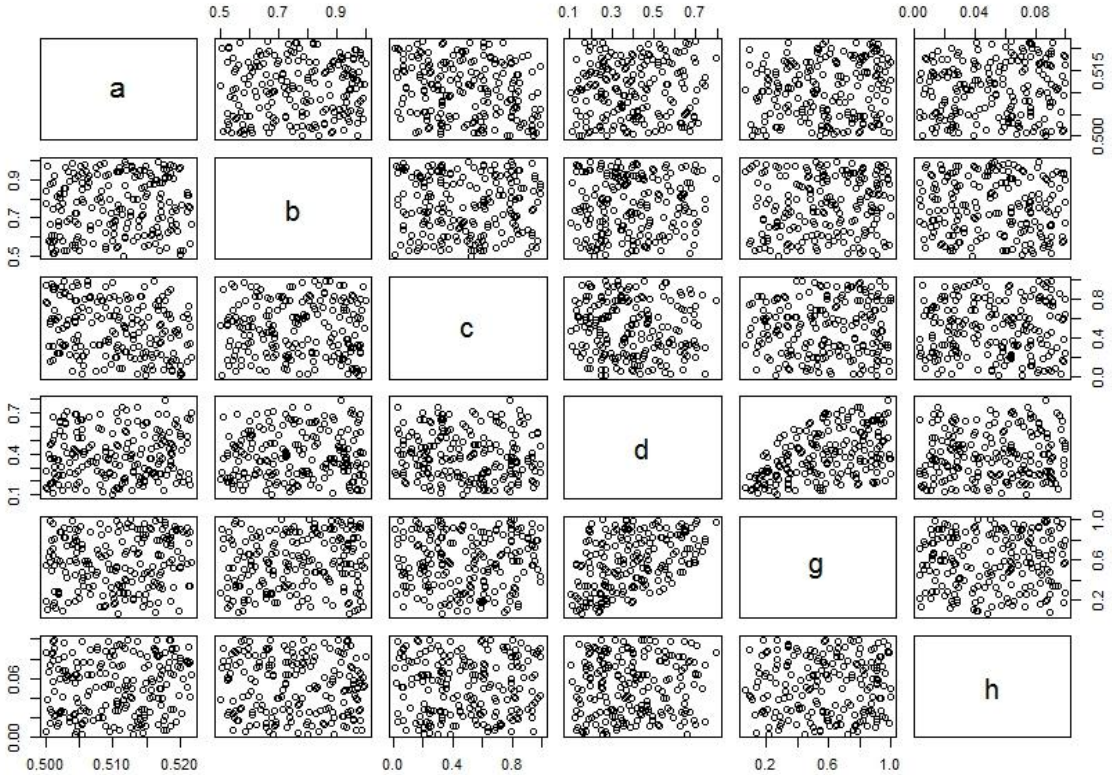
De las 10 000 corridas ejecutadas del modelo, con cada set de parámetros definidos dentro de los límites especificados, fueron descartadas 9.798 iteraciones debido a valores de balance hídrico muy altos o contribuciones de agua subterránea promedio anuales sobre los 80% o por debajo de 20%. Dejando sólo 202 corridas hidrológicamente aceptables, las cuales mostraron ser representativas de parámetros bastante distribuidos en el rango correspondiente, con poca correlación entre ellos, a excepción de los parámetros “d” y “g”, con una relación más significativa (Gráfico 24), lo cual puede deberse a la relación intrínseca que hay entre el movimiento lateral y vertical del agua en la zona no saturada del suelo.

Dentro de los conjuntos de parámetros que mostraron corridas aceptables en términos hídricos, se exhibe la menor desviación en el primer rango de valores, el cual es relativo a la segmentación de la lluvia interceptada y caída directa en el suelo, los cuales se mantuvieron

en los valores entre los 0,5 y 0,52 (Tabla 9), es decir que en la mayoría de las ocasiones prácticamente la mitad de la precipitación llega directamente al suelo, mientras la otra parte se almacena temporalmente en el dosel de los árboles.

La separación de la evapotranspiración muestra una distribución más amplia en los valores aceptados, con mínimos de 0,5 y máximos de 0,99; haciendo alusión a las diferencias posibles entre evaporación y transpiración. El flujo de intercepción ("c"), exhibe el mayor rango de valores, seguido por la percolación ("g"), lo cual puede ser interpretado como poca sensibilidad de estos movimientos del agua a la respuesta final de la microcuenca.

Gráfico 24. *Correlación entre los parámetros del modelo*



Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

Los valores del parámetro "d" presentan desviaciones más pequeñas entre ellos; en términos promediados diarios, lo cual indica que de la cantidad de lluvia que cae en el suelo y es infiltrada, menos de la mitad fluye hacia el cauce del río, la mayor parte de esta agua sigue moviéndose en forma vertical hacia capas más profundas.

El flujo de caudal base, es decir el agua de origen subterráneo con trayectoria lateral hacia los afluentes del sistema, presentó valores entre los 0,003 y 0,1; manteniéndose como el aporte de agua al caudal más pequeño.

Tabla 9. *Resumen estadístico valores de los parámetros aceptados*

	a	b	c	d	g	h
Mínimo	0,500	0,500	0,014	0,101	0,062	0,003
Mediana	0,511	0,761	0,501	0,377	0,581	0,054
Promedio	0,511	0,762	0,493	0,394	0,578	0,052
Máximo	0,522	0,999	0,992	0,794	0,998	0,100
Desviación estándar	0,006	0,148	0,276	0,170	0,261	0,028

Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

Sin embargo, en términos de contribución anual, el porcentaje de agua subterránea que compone el caudal potencial en la microcuenca es de 45% en promedio, mientras que en términos diarios puede alcanzar valores promedios de hasta 63%, los cuales pueden alcanzar valores cercanos a 90% o mayores durante el período de diciembre hasta abril. Para la época lluviosa los valores diarios alcanzados en porcentajes de contribución subterránea son en promedio de 53%, lo cual tiene validez con lo hidrológicamente esperado, en cuanto a la generación de caudal base durante la disponibilidad y deficiencias de lluvias.

A nivel mensual, se concibe mejor la conformación de la escorrentía final; a pesar de que el modelo considera 3 flujos de aporte al caudal, solo las circulaciones superficiales y subterráneas obtuvieron valores apreciables, esto debido a la alta capacidad de infiltración asignada al modelo, la cual es obtenida mediante la fórmula de Horton según los parámetros iniciales, finales y de decaimiento de la capacidad respecto al tiempo. Estos tres parámetros fueron modificados en repetidas ocasiones, sin embargo no mostraron ser sensibles al resultado final o los procesos del modelo hidrológico, por lo cual no se consideraron en la evaluación de la sensibilidad, y por tanto no se obtuvieron valores respectivos a la escorrentía directa.

El flujo superficial aporta mayor cantidades que el subterráneo durante los meses lluviosos, en volúmenes acumulados promedios de entre 110 a 155 mm; el proceso se invierte de enero hasta abril donde las contribuciones del subsuelo son superiores (Tabla 10), con aportaciones descendientes entre los 26 y 9 mm al mes.

La diferencia en el volumen de aporte de ambos flujos es relativamente pequeña en agosto y septiembre, en contraposición con la amplia diferencia estimada para junio, julio, octubre y especialmente mayo donde la contribución subterránea es menor a la mitad del volumen de aporte de la superficie. En los meses secos las mayores diferencias entre los flujos de escorrentía se dan en diciembre y enero, aproximadamente a nivel subterráneo aporta 25 mm más al caudal final que la escorrentía generada en las capas poco profundas del suelo. Desde febrero y hasta abril la diferencia es de entre 4 hasta 8 mm.

Las pérdidas de vapor de agua de la microcuenca, se ven reducidas en todos los meses respecto a lo estimado mediante la fórmula de Penman-Montheith para evapotranspiración potencial, esto a razón de la disponibilidad del recurso, especialmente durante la temporada seca, donde los acumulados mensuales son cercanos a los 6 mm. La reducción es más sutil para los meses lluviosos, estimándose valores de evapotranspiración actual entre los 30 y 60 mm al mes. Al contrario, para los meses secos la reducción es mayor a los 130 mm mensuales, a excepción de diciembre con una diferencia de 84 mm/mes respecto a la estimado en términos potenciales de acuerdo a la fórmula.

Tabla 10. *Flujos y depósitos de la precipitación, microcuenca río Tigre, 2016 - 2017.*

	Flujos de escorrentía		Evapotranspiración actual		Depósito temporal	
	Superficial	Subterránea	Evaporación	Transpiración	Infiltración	Intercepción
Septiembre	148,60	128,31	20,71	10,14	151,66	242,21
Octubre	155,57	109,37	34,29	15,37	185,42	241,24
Noviembre	77,11	86,03	22,87	11,52	77,04	122,15
Diciembre	37,52	65,97	16,14	10,10	41,32	62,90
Enero	4,05	26,06	2,60	2,86	5,08	4,49
Febrero	4,24	13,10	2,93	2,86	6,45	3,14
Marzo	6,89	11,13	4,76	4,33	11,01	5,12
Abril	3,03	9,92	2,15	2,27	5,02	2,34
Mayo	152,31	55,22	22,70	9,60	171,78	225,79
Junio	147,03	116,39	36,55	16,00	157,73	245,32
Julio	134,83	106,39	39,53	19,09	164,84	208,25
Agosto	115,70	107,66	37,21	19,11	127,90	182,89

Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

La evaporación suministra mayores cantidades a la atmósfera en todos los meses, a excepción de abril, donde la substracción a nivel foliar es ligeramente más grande (2,27 mm).

Contradictoriamente, el contenido de agua en la sección superior del suelo es menor, al contenido de intercepción, en la temporada lluviosa y diciembre y mayor durante los meses secos, en los cuales la extracción de vapor de agua de las plantas es prácticamente total. Se denota además que el volumen almacenado en el dosel de los árboles presenta un valor máximo en junio, reduciéndose considerablemente a través de los meses posteriores; en septiembre se obtiene un segundo valor máximo a partir del cual se mantiene el descenso en el contenido de intercepción hasta finalizar la época seca, con la excepción presentada en marzo, donde se obtuvo un ligero aumento respecto a los meses contiguos.

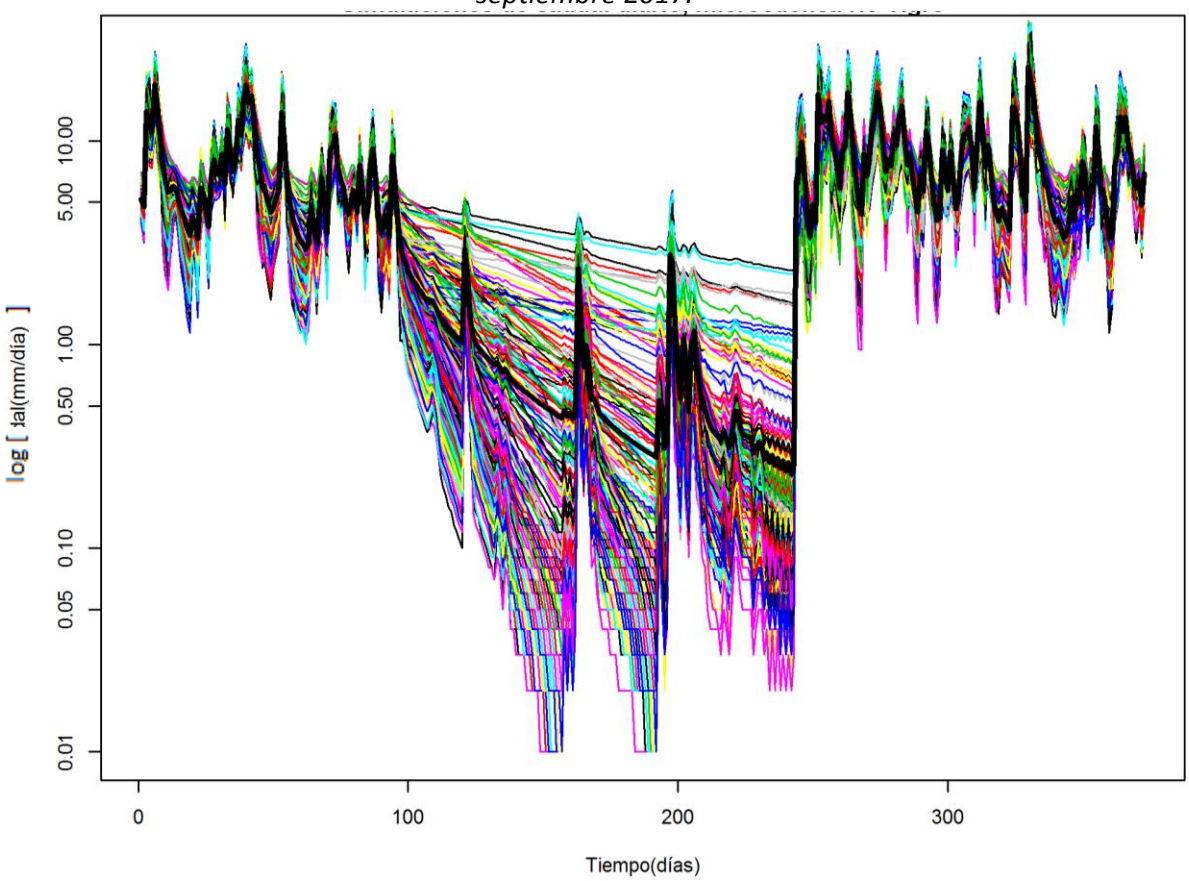
Las proyecciones de balance hídrico, limitados según los criterios establecidos previamente, presentan valores anuales entre los 2 y hasta los 99 mm, en ninguna de las corridas del modelo se obtuvieron balances negativos, por lo cual se puede decir que a escala anual las cantidades de precipitación son más que suficientes para suplir las pérdidas del sistema por evapotranspiración y escorrentía, además de que la microcuenca, según este balance, se queda con una parte importante del agua precipitada durante el año.

Las simulaciones del caudal diario para el período temporal considerado (septiembre 2016 – septiembre 2017), son en esencia controladas por las entradas de precipitación al sistema, produciéndose un hidrograma con bastantes oscilaciones en los caudales, especialmente durante los períodos respectivos a la época de lluvias (mayo – noviembre), donde se presentan los picos más elevados; en la estación seca (diciembre – abril), los niveles de caudal simulados por el modelo son muy bajos, cercanos a cero.

El resultado gráfico de las 202 corridas, muestra mayor variabilidad en término de volúmenes de caudal diario, mientras que el hidrograma es muy similar en todas las ocasiones (Gráfico 25). Las variaciones simuladas van desde caudales cercanos a 0,01 mm/día (0,64 l/s o 38,54 l/min) hasta los 38,80 mm/día (2.490 l/s).

Las máximas concentraciones correspondientes a los eventos de precipitación de la estación lluviosa se concentran entre los valores cercanos a los 10mm/día. Mientras que la mayor concentración de valores menores a los 10 mm/día están dados a partir de los 100 hasta los 250 días, es decir un período de 150 días en los cuales se verían disminuidos los caudales, tal período hace referencia a los meses de diciembre a abril.

Gráfico 25. *Simulaciones de caudal diario, microcuenca río Tigre, septiembre 2016 – septiembre 2017.*



Se muestra el hidrograma generado por cada uno de las corridas aceptadas del modelo
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

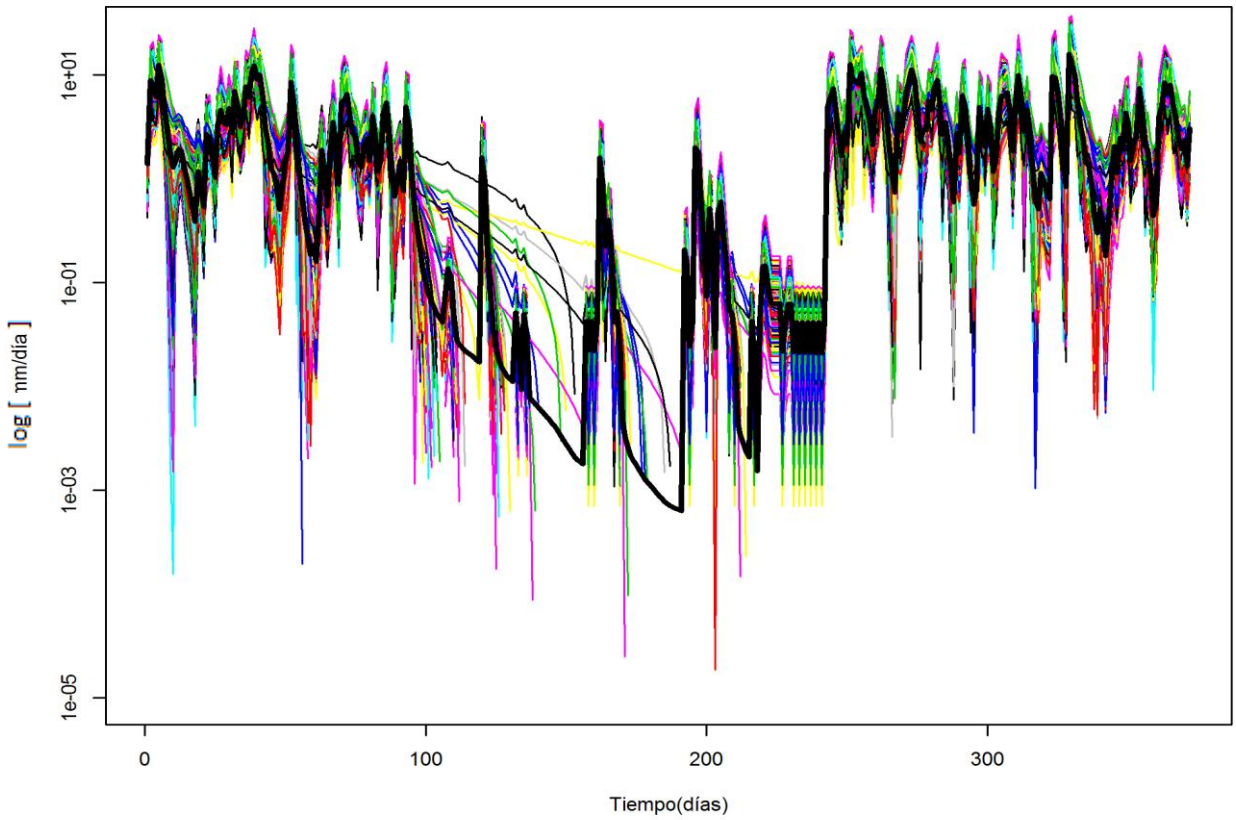
La línea resaltada en negro en el Gráfico 25, representa el valor promedio de todas las simulaciones, estableciéndose caudales potenciales de alrededor de los 7-8 mm/día durante los meses de septiembre y octubre; en noviembre los valores son cercanos a los 5 mm diarios, bajando hasta 3 mm/día en diciembre.

Para los meses correspondientes a la temporada seca, los valores promedios simulados no superan los 0,99 mm al día, y disminuyen al pasar de los meses hasta llegar a abril donde el caudal promedio es de alrededor de 0,44 mm/día. En mayo los valores simulados alcanzan los 6 mm diarios, de ahí el cambio radical presentado por la línea vertical generada en todas las simulaciones. En el mes de junio se presenta los promedios diarios más altos, 9 mm/día, mientras que para los meses de julio hasta septiembre los caudales se mantienen entre los 7 mm al día.

4.3 Dinámica de la Recarga hídrica

El estimado diario de recarga acuífera presenta un comportamiento similar al mostrado por las simulaciones de caudal, con la diferencia de que el rango de variación es más extenso durante los meses lluviosos, al contrario que en la época seca, cuando la mayoría de las simulaciones estima flujos de percolación nulos (Gráfico 26).

Gráfico 26. Simulaciones de recarga hídrica, microcuenca río Tigre, septiembre 2016 - septiembre 2017.



Se muestra los valores diarios recarga hídrica según las simulaciones aceptables del modelo
Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

El rango, en este caso, se encuentra entre los 0 y los 36 mm/día, situando los valores potenciales más altos a inicios del mes de agosto y junio y mediados del mes de mayo. Los flujos nulos, son localizados en diferentes fechas de todo el lapso temporal considerado, según las diversas simulaciones ejecutadas, con homogeneidad casi total evidenciada en los meses de enero y marzo.

La recarga potencial promedio, señalada en negro, conjetura valores promedios diarios cercanos a los 3 mm durante los meses de septiembre a noviembre, con mayores recargas estimadas en octubre. En diciembre los potenciales acuíferos son de 1 mm diario en promedio, reduciéndose a menos de la mitad durante los primeros cuatro meses del año. En los meses posteriores el flujo de recarga hídrica diaria se encuentra en cantidades promedio cercanas a los 3,5 mm, con acumulados máximos alcanzados en mayo.

Las aportaciones mensuales al depósito subterráneo se encontrarían en el rango entre los 2 y los 6 mm para los meses más secos de la región climática considerada, los cuales constituirían alrededor de una cuarta parte de la precipitación total registrada durante el período correspondiente (Tabla 11).

Al inicio de la época lluviosa, los volúmenes acumulados son cercanos a los 120 mm, observándose una ligera disminución desde mayo hasta agosto, la cual está, en cierta medida, relacionada con las reducciones en las precipitaciones y aumento en la evapotranspiración.

Tabla 11. *Acumulados mensuales estimados, microcuenca río Tigre*

	Precipitación (mm)	Evapotranspiración actual (mm)	Recarga (mm)
Septiembre	152,03	30,85	125,34
Octubre	332,77	49,66	131,83
Noviembre	203,17	34,39	65,34
Diciembre	84,95	26,24	31,59
Enero	10,39	5,46	3,31
Febrero	13,18	5,79	3,60
Marzo	22,51	9,10	6,00
Abril	10,26	4,72	2,64
Mayo	350,60	32,30	130,31
Junio	322,88	52,54	124,28
Julio	325,73	58,62	114,83
Agosto	272,59	56,32	97,97

Elaboración: Aguilar, Ríos y Ureña, 2017

Para septiembre los valores de recarga hídrica (125,34 mm) serían superiores a 3 partes del total de lluvia del mes, lo cual supera la diferencia del balance hídrico mensual entre la precipitación y evapotranspiración real. En octubre, con recargas acumuladas (131 mm) similares a las de septiembre, el porcentaje correspondiente respecto a la precipitación es de apenas el 40%, constituyendo cerca de la mitad de los lucros obtenidos por el sistema en detrimento de los posibles flujos de vapor de agua hacia la atmósfera.

Al final del año, se mantienen los mismos porcentajes de recarga acuífera respecto a la precipitación caída en el sistema, sin embargo los márgenes de ganancia del sistema en noviembre son casi tres veces mayores a las de diciembre.

De acuerdo a los potenciales de recarga simuladas por el modelo, las posibles acumulaciones de agua a nivel subterráneo, las cuales están sujetadas a la capacidad acuífera de la microcuenca, podrían alcanzar volúmenes acumulados diarios máximos de hasta 116 mm en promedio durante octubre, y cercanos a los 108 mm entre junio y septiembre.

Para los meses finales del año, las acumulaciones diarias son aproximadas a los 100 mm y para los primeros meses de año, con condiciones de baja pluviosidad, los volúmenes recolectados a nivel subterráneo alcanzarían valores cercanos a los 54, 39, 31 y 26 mm correspondientemente.

Dichos valores de recarga y almacenamiento subterráneo serían los precursores principales de la generación de caudal en la microcuenca río Tigre durante los meses secos del año, los responsables de evitar el secado de los afluentes y por ende de abastecer a la población usuaria de la ASADA durante esta estación.

En términos generales, se reconoce que aunque las simulaciones de caudal estimadas con el modelo no pudieron ser verificadas con valores reales medidos en la microcuenca, son posibles y concuerdan con el comportamiento hidrológico esperado y visualizado de respuesta ante eventos de precipitación, de ahí la factibilidad del uso del modelo y las estimaciones de recarga, caudal y demás variables consideradas.

CONCLUSIONES

El agua constituye un recurso de vital importancia en la microcuenca debido al aprovechamiento humano que le da la ASADA, lo que hace de ésta área, una zona prioritaria de manejo y protección, que garanticen la calidad y cantidad del recurso hídrico.

A partir de los datos meteorológicos analizados se comprobó la ocurrencia de una marcada estación seca como es descrita en el sentido climatológico, no se da precipitación, existe un alto potencial de evapotranspiración, los contenidos de humedad restantes son absorbidos por la vegetación, por lo que no hay infiltración o recarga hídrica.

Dada la poca disponibilidad del recurso hídrico durante la época seca y el crecimiento poblacional que trae consigo un aumento en la demanda del agua, se plantea el almacenamiento subterráneo como alternativa para el suministro humano. Comprobándose mediante las pruebas de infiltración que las zonas de mayor potencial se ubican al centro, sur y este de la microcuenca.

El modelo como herramienta de información refuerza los datos meteorológicos estimados y manifiesta la variación en los caudales en la relación con la faltante de lluvias. Además, brinda a la ASADA datos potenciales sobre el caudal y la recarga hídrica durante el año analizado, por lo que contempla los volúmenes disponibles a lo largo del año permitiendo considerar las medidas necesarias para el abastecimiento poblacional.

RECOMENDACIONES

El potencial de precipitaciones es favorable en la microcuenca sin embargo no se debe descartar que durante los períodos secos se va a limitar la disponibilidad del recurso en la zona a nivel superficial, de allí la importancia de que las áreas de recarga hídrica subterránea sean conservadas para asegurar su durabilidad o continuidad.

Las zonas de recarga hídrica potencial identificadas en la microcuenca deberían ser considerados por la ASADA como sitios aprovechables para el abastecimiento del recurso, así como para la identificación y establecimiento de nuevos sitios de captación ante eventuales problemas de abastecimiento durante la época seca.

Se recomienda modificar y evitar aquellas actividades que impliquen la afectación del bosque así como de aquellas zonas donde la posibilidad de la recarga es de moderada a muy buena.

Además la ASADA puede hacer uso del mapa (Mapa 14) en donde se contrapone las áreas potenciales de recarga con el uso actual de la tierra, a fin de proyectar junto con la comunidad planes o proyectos que favorezcan la conservación de las zonas de mayor potencial de recarga, por medio de programas de reforestación y conservación de suelos de la mano con los pequeños productores.

Se reconoce como limitación, el poco nivel de detalle existente sobre las unidades geológicas que conforman la zona de estudio, en vista que la información oficial está a escala 1:50.000. Por lo que se recomienda fortalecer esta investigación con nuevos estudios de tipo hidrogeológico que permitan una comparación entre los resultados obtenidos en campo por medio de pruebas de infiltración, con métodos geofísicos que permitan determinar la naturaleza de los materiales geológicos debajo de la superficie.

Se recomienda fortalecer la investigación mediante el análisis superficial de textura de suelos a partir de pruebas realizadas en laboratorio, para obtener porcentajes de arcillas, arenas y limos.

Capacitar al personal de la ASADA en lo referente a la recolección de datos en campo, tal como lo son las mediciones de caudal mediante el método de aforos, dado que los datos medidos durante el período analizado para esta investigación eran erróneos, ya que se hacían las mediciones en los lugares incorrectos. Esto con el fin de que puedan contar con una base de datos actualizada que les permita contemplar las variaciones en las condiciones naturales de caudal de los afluentes.

En conformidad con los resultados obtenidos del modelo hidrológico sobre el caudal diario y recarga hídrica en la microcuenca (Gráfico 25 y Gráfico 26) se le sugiere a la ASADA considerar las variaciones presentadas durante la época seca y la lluviosa, con el objetivo de prever futuros racionamientos como parte de las estrategias del manejo adecuado del recurso agua.

El modelo hidrológico, puede ser utilizado posteriormente, con nueva información meteorológica, para analizar otros períodos temporales. Preferiblemente con información

correspondiente sobre mediciones de caudal precisas, que permitan verificar el proceso precipitación – caudal en la microcuenca.

Se recomienda a los gobiernos locales (Municipalidad de Aserrí y Desamparados), velar por la protección de las áreas boscosas, regulando la expansión del desarrollo urbano y la producción forestal. En el caso de las actividades agropecuarias se requiere involucrar entes competentes en el área, tal como lo es el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), que capaciten a la población en el desarrollo de buenos métodos de manejo y conservación del suelo.

Es importante que se realice un manejo apropiado del territorio por parte de los actores involucrados, tomando en cuenta la distribución demográfica, actividades económicas, características biofísicas; para salvaguardar el bienestar de la microcuenca y asegurar el aprovechamiento del recurso hídrico a las futuras generaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, T. (1984). Miembro Tranquerillas de la "Formación Terraba". En Sprechmann, P. (Ed.), *Manual de Geología de Costa Rica* (13 - 17) San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica.

Aguilar, M. (2009). La base de calibración La Paz. En Zúñiga, M., Moya, J., Fuentes, O., y Chaves, M. (Ed.), *Azimuth*, (9), 6-8. Recuperdado de http://colegiotopografoscr.com/azimuth/revistas/2009/9.pdf

Aguirre, N. (2007). *Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas*. Recuperado de http://arcgeek.com/descargas/MCuencas.pdf

Alfaro, E. (2014). Caracterización del "veranillo" en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central (Characterization of the Mid Summer Drought in two Pacific slope river basins of Costa Rica, Central America), *International Journal of Tropical Biology*, 62, 1–15.

Alvarado, C y Barahona, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de investigación UNED, 9 (1), 23-33.*

Amador, J.A., Durán, A.M., Rivera, E.R., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B y Mora, N. (2016). The easternmost tropical Pacific Part II: Seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability. *Revista de Biología Tropical, 64, S23-S57.*

Angelone, S. y Garibay, M.T. (2014). *Tipos de suelos: Características tacto visuales*. Recuperado de http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Caracteristicas%20tacto%20visuales%202014_2s_imp.pdf

Arce, R. (2001). Laderas como piezas básicas en la descripción y análisis del territorio. *Informe Semestral IGN 37*, 39-49.

Arellano, F. (2005). *Caracterización Hidrogeológica de la zona aluvial del Río Sixaola comprendida entre Bribrí y Finca Celia de Sixaola*. (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Asociación Administradora de Acueductos Rurales (ASADA) San Gabriel. (2017). *Estimación de abonados para el año 2017*. San Gabriel, Aserrí.

Asamblea Legislativa de la República. (1942). *Ley de Aguas N°276*. Recuperado de http://www.oas.org/dsd/environmentlaw/waterlaw/documents/Costa_Rica-Ley_276.pdf

Asamblea Legislativa de la República. (1995). *Ley Orgánica del Ambiente N°7554*. Recuperado de http://www.isladelcoco.go.cr/assets/es/docs/ley-organicadel-ambiente.pdf

Asamblea Legislativa de la República. (1996). *Ley Forestal N° 7575*. Recuperado de http://www.cne.go.cr/cedo_dvd5/files/flash_content/pdf/spa/doc387/doc387-contenido.pdf

Asamblea Legislativa de la República. (1998). *Ley de Biodiversidad N° 7788*. Recuperado de http://www.eefb.ucr.ac.cr/Repositorio%20de%20documentos/costarica-leybiodiversidad-1998-sp.pdf

Ballerine, C. (s.f). *Topographic Wetness Index: A GIS approach to identifying areas at risk of urban flooding*. [Pdf slides]. Recuperado de http://www.illinoisfloods.org/documents/2016_IAFSM_Conference/Conference_Presentations/1B-GIS_Approach-IAFSM2016.pdf

Ballestero,M. (2009). *La prestación de los servicios de agua y saneamiento con enfoque de Gestión Integrada de Recurso Hídrico (GIRH) en Costa Rica: Situación y sistematización de algunas experiencias*. GWP Centroamérica y Alianza por el Agua.

Barbecho, J.G. y Calle, J. (2012). *Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del río Tarqui*. (Tesis de grado). Universidad de Cuenca, Ecuador. Recuperado de http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/771/1/ti897.pdf

Barquero, J. y Ellenberg, L. (1983). Geomorfología del piso alpino del Chirripó en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central* 17-8, 293-299.

Beven, K. (2004). Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes. *Hydrological processes*, *18*(17), 3447-3460.

Beven, K. J. (2011). *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons.

Bergoeing, J.P. y Brenes, L.G. (2017). *Atlas geomorfológico de Costa Rica: escala 1:100.000* (1 ed). Heredia, Costa Rica: EUNA.

Birkel, C. (2007). Introducción a la hidrología. En J.P. Bergoeing y L.G. Brenes (Ed.), *Práctica de la Geografía* (pp. 105-*125).* Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Birkel, C. (2009). Introducción al modelado hidrológico. En J.P. Bergoeing y L.G. Brenes (Ed.), *Práctica de la Geografía vol. 2*(pp. 105-*125).* Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Blanco, H. (2009). *Identificación y manejo de las áreas de recarga hídrica en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito San Carlos, Costa Rica*. (Tesis de maestría). Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica.

Bolaños, A. (2011*). Propuesta de reforestación y recuperación de la cobertura vegetal en la zona de recarga hídrica, de las fuentes captadas por la ASADA de Higuito ubicada en la Micro-Cuenca del Río Purires, el Guarco de Cartago*. (Tesis de grado). Universidad Técnica Nacional, Atenas, Costa Rica.

Bralower, T y Bice, D. (s.f). Distribution of water on the Earth's Surface. College of Earth and Mineral Sciences, The Pennsylvania State University: *Earth in the future*. Recuperado de https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/701

Cardona, B. L. (2013). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*. *Recuperado de: http://www. repositorio. usac. edu. gt/4482/1/Conceptos% 20b% C3% A1sicos% 20de% 20Mo rfometr% C3% ADa% 20de% 20Cuencas% 20Hidrogr% C3% A1ficas. pdf*.

Capó, A., y García, C. (2014). Análisis e interpretación de los perfiles longitudinales en la red fluvial del sur y sureste de mallorca. *Cuadernos de investigación geográfica*, *40*(1).

Castillo, B. (2016, 8 de noviembre). Vientos navideños ya llegaron al Valle Central y Pacífico Norte. *La Prensa Libre*. Recuperado de https://www.laprensalibre.cr/Noticias/detalle/91919/vientos- navidenos-ya-llegaron-al-valle-central-y-pacifico-norte-

Chávarri, E. (2005). *El Ciclo Hidrológico e Introducción a Modelos Hidrológicos*. Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Chinchilla, M., Mata, R. y Alvarado, A. (2011). Caracterización y clasificación de algunos ultisoles de la región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense, 35* (1), 59-81. Recuperado de https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6687/6376

CORTOLIMA. (s.f.). *Plan de Ordenación y manejo ambiental de las quebradas Las Panelas y Balsas, aspectos biofísicos*. Recuperado de https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/cuenca_panelas/DIAGNOSTICO/2.2ASPECTOS_BIOFISIC OS.pdf

Davis, W. M. (1899). The geographical cycle. *The Geographical Journal*, *14*(5), 481-504.

Davie, T. (2008). Fundamentals *of hydrology*. Taylor & Francis.

De Matauco, A. I. G. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la AGEN º*, *38*, 311-329.

Donado, L.D. y Colmenares, J.E. (2004). *Modelo de conductividad hidráulica en suelos*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de http://www.docentes.unal.edu.co/lddonadog/docs/Grade_Docs/Donado_(2004).pdf

Donis, L.F. (2015). *Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del río Negro, Ciudad de Guatemala*. (Tesis de grado) Universidad Rafael Landívar, La Asunción, Guatemala. Recuperado de http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2015/06/15/Donis-Luisa.pdf

Dunn, S. M., y Mackay, R. (1995). Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, *171*(1-2), 49-73.

Duque, G. (2017). *Manual de geología para ingenieros*. Recuperado de http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/355/geomorfologia.pdf

Eterovic, J.M. (2008). *Aplicación de modelos hidrológicos con fines de prevención de desastres en cuencas en Venezuela.* (Tesis de maestría). Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

Evaluación de los recursos forestales mundiales (FRA). (2010). *Informe nacional, Costa Rica* (047). Recuperado de http://www.fao.org/forestry/20308-0982e92a29545eed28d27cd4149dce658.pdf

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de la Plata (FCAyF). (s.f). *Hidrología aplicada al estudio y manejo de cuencas y de sistemas de riesgo y drenaje. Aplicación de metodologías para la medición y estimación del escurrimiento y la infiltración.* Recuperado de http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/15618/mod_resource/content/2/unidad%202%202017.pdf

Fallas, J. C. (2001). La humedad del aire En: XIII Jornada para el Desarrollo Archivístico Dr. Celso Rodríguez: memoria: la conservación documental y los diferentes soportes, un r eto para los profesionales de la información. San José, C.R.: Dirección General del Archivo Nacional, p. 61-63.

Fatorelli, S. y Fernández, P.C. (2011). *Diseño Hidrológico*. Recuperado de http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf

Flórez, A. (2003). *Colombia: evolución de sus relieves y modelados*. Bogotá: Universidad

Nacional de Colombia. Recuperado de http://www.bdigital.unal.edu.co/47989/2/9587013123.PDF

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

Fuentes, J.J. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro.* Instituto Nacional de Ecología. México.

Fuentes, P. (2006). *Caracterización hidrogeológica y análisis de la vulnerabilidad del acuífero de la cuenca del Río Potrero en Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. (Tesis de maestría).Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Denegri, G. A., Delgado, M. I., y Besteiro, S. I. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGM DOMUS*, *4*.

Gómez, M. (s.f). *Crecimiento de la población de Costa Rica: evolución, perspectivas y algunas consecuencias*. PP. 137-166. Instituto Centroamericano de Estadística: Universidad de Costa Rica. Recuperado de http://ccp.ucr.ac.cr/bvp/pdf/seminarios/seminario_4/cuarto08.pdf

González, W. C. (2011). *Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá*. (Tesis de maestría). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

Guzmán, A. y Díaz, A. (2007). *Identificación de las áreas de recarga acuífera y zonas de protección de los manantiales del cantón central de Cartago*. En IX Congreso Nacional de Ciencias: Exploraciones fuera y dentro del aula. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Guzmán, I. y Calvo, J. C. (2013). Planning and development of Costa Rica water resources: current status and perspectives. *Revista Tecnología en Marcha*, *26*(4), 52-63.

Hartmann, D. L. (2016). *Global physical climatology* (Vol. 103). USA: Elsevier.

Hidalgo, H.G. (2010). *Progress report on "Water Resources in Costa Rica"*. Interamerican Network of Academies of Sciences (IANAS). Buenos Aires, Argentina, November 18, 2010.

Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *14*(1), 446-460.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, *56*(3), 275-370.

Ibañez, S., Moreno, H y Blanquer, J.M. (s.f). *Características del infiltrómetro de doble anillo (anillos de munz).* Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2008). Clima, Variabilidad y Cambio Climático en Costa Rica. *Cambio climático, segunda comunicación nacional*.

Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2011). *X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda*. Recuperado de http://www.inec.go.cr/censos/censos-2011

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2012*). X censo nacional de población y VI de vivienda 2011: resultados generales*. San José, Costa Rica: INEC.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2014). *Costa Rica: Población total proyectada al 30 de junio por grupos de edades, según provincia, cantón, distrito y sexo 2025*. San José, Costa Rica: INEC.

Kirkby, M. J., y Beven, K. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, *24*(1), 43-69.

Krause, P., Boyle, D. P., y Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, *5*, 89-97.

Kumar, B. V. (2014). *Determination of infiltration rate of soils using single and double ring infiltrometer and study on drought of karimnagar district of andhra pradesh* (Doctoral dissertation).

Laing, A y Evans, J.L. (2016). *Introducción a la meteorología tropical.* Recuperado de http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/index.htm

La Gaceta (1997, 23 de Enero). DECRETO Nº 25721-MINAE. *Reglamento a la Ley Forestal*. Recuperado de http://www.cne.go.cr/cedo_dvd5/files/flash_content/pdf/spa/doc386/doc386-contenido.pdf

Leiva, N. (2012). *Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Lema, J., Melgoza, J., Garay, A., Monroy, O., Fresan, M., Pérez, C.V. y Moctezuma, P. (s.f.). *Repensar la Cuenca: La gestión de ciclos del agua en el Valle de México*. Recuperado de http://www.agua.org.mx/h2o/images/stories/REPENSAR/diagnostico%20nuevo.pdf

Lobos, L.I. (2015). *Estimación de la recarga hídrica potencial de la subcuenca del río Salamá, Baja Verapaz*. (Tesis de grado) Universidad Rafael Landívar, Campus "San Pedro Claver, S.J." de la Verapaz. Recuperado de http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2015/06/22/Lobos-Lourdes.pdf

Maderey, L.E. (2005). *Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. México: Universidad Nacional Autónoma de México e Instituto de Geografía.

MAG-MIRENEM. (1988). *Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica*. Recuperado de http://www.mag.go.cr/informacion/imagenes-nama-cafe-taller/Decreto-Ejecutivo-23214-MAG-MIRENEM.pdf

Matus, O.D. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua*. (Tesis de maestría). Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.

Matus, O., Faustino, J. y Jiménez, F. (s.f.). Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica en subcuencas del río Jucuapa, Nicaragua. *Recursos naturales y ambiente*, (55), p. 4 – 82. Recuperado de http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6573/Metodologia_para_la_identificacion_participativa_de_zonas.pdf;jsessionid=8037D7978C21407198DE1D8BC04200CF?sequence=1

Méndez, J., Calvo, R., y Lozano, S. (2000). *Diagnóstico biofísico para el manejo de los recursos hídricos en las comunidades de Bijagual, Delicias y Sur del Cantón de Turrubares*. (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

Milford, M.H. (1997). *Soils and Soils Science. Laboratory excercises*. Texas, Estados Unidos: Hunt Publishing Company.

Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH). (2013). *Plan Nacional de Ordenamiento Territorial 2014 a 2020*. Recuperado de https://www.mivah.go.cr/Documentos/politicas_directrices_planes/pnot/PLANOT_2013-12-03.pdf

Mora, D. y Ruiz, J. (2013). *Determinación de áreas potenciales de recarga hídrica en la parte media y alta de las subcuencas Frijoles y Guacalito, Upala, Costa Rica*. (Tesis de grado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Morales, D. (s.f.). *Recursos hídricos-Costa Rica 2010*. Centro del Agua para América Latina y el Caribe. Recuperado de http://www.academia.edu/412042/Recursos_H%C3%ADdricos_en_Costa_Rica.

Murillo, O. (23 de julio de 2014). Asada de San Gabriel cumple con manejo del agua. *Seminario Universidad*. Recuperado de https://semanariouniversidad.com/suplementos/crisol/asada-de-san-gabriel-cumple-con-manejo-del-agua/

Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J. J., Domingo, F., y Gash, J. H. C. (2009). A review of rainfall interception modelling. *Journal of hydrology*, *370*(1), 191-206.

Núñez, J. (2001). *Manejo y conservación de Suelos*. San José, Costa Rica: EUNED.

Oscar, L.P (2016). *Medición de la infiltración del agua en el suelo, método de la doble anilla.* Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la gestión y uso del agua (Centro AGUA).

Pellegrini, A. (2014). *Textura y color del Suelo*. Recuperado de http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/18319/mod_resource/content/2/TEMA%203%20TEXTURA%20Y%20COLOR.pdf

Pesce, F. (s.f.). *Aportes de la hidrología morfométrica a la ecología fluvial*. Recuperado de http://tecrenat.fcien.edu.uy/Cuencas/Gestion%20Integrada%20de%20Cuencas/Aportes% 20de%20la%20Hidrologia%20a%20la%20Ecologia%20Fluvial.pdf

Pinochet, K.E. (2013). *Evolución geomorfológica durante el neógeno del sector Quebrada Algarrobal, Región de Atacama, Chile (28°15´-28°45´S).*

Pizarro, R., Flores, J.P., Sangüesa, C. y Martínez, E. (s.f.). *Módulo 3. Curvas de infiltración. Sociedad estándares de ingeniería para aguas y suelos LTDA*. Recuperado de http://eias.utalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/c_modulo_curva_infiltracion.pdf

Poblete, D. N. (2008). *Modelo hidrológico distribuido para la simulación de recursos hídricos*. (Tesis de Maestría). Pontificada Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile. Recuperado de https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/1395/500517.pdf?sequence=1.

Ramírez, P. (1983). Estudio meteorológico de los veranillos en Costa Rica. *Nota de investigación*, *5*.

Ramírez, A.S. (2007). *Estudio hidrogeológico integral y propuesta de zonificación de la vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero del cantón occidental de Grecia, Alajuela, Costa Rica*. (Tesis de Maestría). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Ramírez, L. M. y Vargas, R. (2010). *Delimitación y evaluación de las zonas de recarga hídrica para las montañas de El Volcán y La Chorrera, Honduras*. (Tesis de grado). Zamorano, Honduras: Zamorano.

Restrepo, L.F., González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista colombiana de ciencias pecuarias, 20* (2), 183-192. Recuperado de http://www.redalyc.org/pdf/2950/295023034010.pdf

Rojas, O. (2006). *Deformaciones: Pliegues y Fallas*. Recuperado de http:// http://www2.udec.cl/~ocrojas/deformaciones.pdf

Rueda, A. (14 de marzo de 2016). Cada tico consume en promedio 180 litros de agua por día,

60 más que lo ideal, según AYA. *AR*. Recuperado de https://www.ameliarueda.com/nota/ticos-consumen-40-litros-diarios-de-agua-mas-de-lo-ideal-afirma-aya

San Isidro, M.J. (1998). Procesos de validación de modelos de simulación. *Informes técnicos CIEMAT, 844,* 1-73.

Sepúlveda, R. B. (2015). El infiltrómetro de cilindro simple como método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos. Experiencias de campo en ámbitos de montaña mediterránea. *Baética*, (21).

Sojo, D., Denyer, P., Gazel, E. y Alvarado G.E. (2017). Geología del cuadrante Tapantí (1:50 000), Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (56), 83-116. doi: 10.15517/rgac.v0i56.29238 ISSN: 0256-7024

Solís, L.G. (2013). *Plan Rescate 2014-2018: Trabajo, Progreso y Alegría*. Recuperado de http://www.tse.go.cr/pdf/varios/plan_gobierno_pac.pdf

Sosa, C.E. (2009). *Identificación de las zonas potenciales para la recarga hídrica, en la subcuenca del río Grande, municipio de Ipala; Chiquimula*.(Tesis de grado), Centro Universitario Oriente, Universidad de San Carlos de Guatemala, Chiquimula, Guatemala.

Soto, M. (9 de setiembre de 2014). Acueductos comunales brindan agua al 27% de la población. *La Nación*. Recuperado de https://www.nacion.com/ciencia/medio-ambiente/acueductos-comunales-brindan-agua-al-27-de-la-poblacion/HVAO2SWEMVGSBJVXAK554ZN6GM/story/

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *38*(6), 913-920.

Torres, E. (2015). *Estructuras geológicas*. Recuperado de https://es.slideshare.net/eduardo26snap/estructuras-geologicas-47677357

Vargas y Mora (1999). Hidrogeoquímica y producción de manantiales en las formaciones Pacacua y Peña Negra. *Revista Geológica de América Central*, 22, 101-111.

Venegas, D. (2012*). Plan técnico operacional y de mantenimiento para las plantas de filtración rápida y filtración lenta de la ASADA de San Gabriel de Aserrí, Costa Rica.* (Tesis de grado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

World Hydrological Cycle Observing System (WHYCOS). (2009). “Chapter 6: Modelling of hydrological system”. *The Guide to Hydrological Practices.* Volume II: Management of wáter resources and application of hydrological practices. Geneva, Switzerland: WMO-OMM.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de variables por sitio de muestreo

Prueba	Fecha	X	Y	Uso	Textura	Z	Conduc_Ksat	Capacidad_Fp	%Pendiente
3	29 de Abril	490469,691	1085722,97	Bosque	Limo-arcillos	1879	1,89	36,2322808	37,5
4	29 de Abril	490681,744	1085404,22	Cultivo de Ca	Arcillo-arenc	1828	3,78	85,37835809	21,4
1	29 de Abril	489655,85	1085851,71	Charral	Arcillo-arenc	1824	9,45	27,25202912	74,7
2	29 de Abril	489652,587	1085901,51	Bosque	Arcillo-limos	1829	7,56	84,81252497	26,6
1	27 y 28 de Ma	488677,362	1086411,66	Bosque	Arcillo-limos	1846	7,56	10,86677027	83,8
2	27 y 28 de Ma	488887,607	1086144,72	Bosque	Limo-arcillos	1853	7,56	21,90645484	10,7
3	27 y 28 de Ma	488918,034	1086077,64	Plantación fo	Arcilloso	1825	0,378	3,741333005	24,1
4	27 y 28 de Ma	488894,1	1086049,72	Plantación fo	Limo-arcillos	1811	1,89	10,82156945	51,8
6	27 y 28 de Ma	489582,25	1086116,22	Bosque	Arcillo-limos	1802	3,78	41,13366344	56,2
5	27 y 28 de Ma	489358,186	1086149,67	Urbano	Arcillo-arenc	1763	0,378	13,73932788	14,7
7	27 y 28 de Ma	489577,2	1086097,1	Pasto con árb	Franco Limo-	1808	7,56	31,0987212	13,7
8	27 y 28 de Ma	489587,661	1086071,72	Pastos	Arcilloso	1781	3,78	7,592624046	7,8
9	27 y 28 de Ma	489558,251	1086067,63	Charral	Arcillo-limos	1778	3,78	9,935082234	82,7
10	27 y 28 de Ma	489558,151	1086047,93	Bosque	Arcillo-limos	1786	0,378	14,90457463	31,9
11	27 y 28 de Ma	489541,727	1085936,25	Plantación fo	Arcillo-limos	1812	0,378	9,631165695	63,3
3	10 de Junio	489056,062	1085799,77	Plantación fo	Limo-arcillos	1732	7,56	38,87983279	30,02
2	10 de Junio	488897,137	1085761,55	Bosque	Franco Limo-	1698	3,78	19,35358788	51,2
1	10 de Junio	489045,81	1085677,35	Bosque	Limo-arcillos	1688	3,78	54,03096014	11,4
1	8 de Julio	488106,951	1086454,35	Plantación fo	Limo-arcillos	1899	3,78	6,3818464	45,2
2	8 de Julio	488048,62	1086465,11	Plantación fo	Limo-arcillos	1895	3,78	47,00517023	69,4
3	8 de Julio	488166,12	1086397,97	Charral	Limo-arcillos	1855	0,0378	4,895632384	28,6
4	8 de Julio	488235,396	1086410,06	Bosque	Arcillo-limos	1886	7,56	23,82857306	45,2
5	8 de Julio	488550,326	1085811,01	Bosque	Limoso	1803	7,56	84,35468801	28,6
6	8 de Julio	488263,675	1086397,54	Bosque	Arcillo-limos	1937	3,78	11,19497355	70,1
1	23 de Julio	488346,235	1086279,05	Bosque	Limo-arcillos	1865	3,78	4,965191203	45,7
2	23 de Julio	488391,011	1086376,12	Bosque	Limo-arcillos	1855	7,56	55,33137909	37,3
3	23 de Julio	488337,123	1086203,52	Bosque	Limo-arcillos	1844	12	48,10371219	41,9
4	23 de Julio	488241,647	1086118,68	Bosque	Arcillo-limos	1849	11,34	22,36446552	25,9
5	23 de Julio	488306,555	1086496,94	Bosque	Limo-arcillos	1896	11,34	56,43290844	46,5
1	29 y 30 de Ju	488046,094	1086313,98	Otros cultivo	Arcillo-limos	1843	0,756	3,942220281	42,2
2	29 y 30 de Ju	488176,236	1086331,9	Charral	Arcillo-limos	1849	1,89	4,575027336	31,3
3	29 y 30 de Ju	488712,345	1085465,72	Charral	Limo-arcillos	1779	3,78	4,966339771	47,1
4	29 y 30 de Ju	488807,516	1085524,05	Bosque	Limo-arcillos	1742	15,12	24,21720961	44,2
5	29 y 30 de Ju	488738,855	1085561,29	Bosque	Limo-arcillos	1722	7,56	38,14819226	60,6
6	29 y 30 de Ju	487978,373	1085656,73	Plantación fo	Limo-arcillos	1790	3,78	9,712237611	41,6
7	29 y 30 de Ju	488025,92	1085681,94	Charral	Limo-arcillos	1784	15,12	33,16389128	26,2
8	29 y 30 de Ju	488079,761	1085558,75	Charral	Arcilloso	1789	3,78	8,217497032	28,7
9	29 y 30 de Ju	488047,328	1085552,22	Plantación fo	Arcillo-limos	1780	1,89	9,234510739	17,25
10	29 y 30 de Ju	488126,415	1085607,32	Bosque	Limo-arcillos	1772	3,78	23,39521664	22,6

Prueba	Fecha	X	Y	Uso	Textura	Z	Conduc_Ksat	Capacidad_Fp	%Pendiente
11	29 y 30 de Ju	488264,898	1085536,21	Charral	Arcilloso	1785	7,56	11,31929885	10,8
12	29 y 30 de Ju	488248,786	1085476,36	Pastos	Limo-arcillos	1789	0,756	2,550681205	94,8
13	29 y 30 de Ju	488381,478	1085449,86	Plantación fo	Arcillo-limos	1784	0,378	1,186785653	23,9
14	29 y 30 de Ju	488407,644	1085515,28	Charral	Arcillo-limos	1781	0,378	1,867112801	59,6
1	12 y 13 Agost	488710,894	1086322,17	Bosque	Arcilloso	1831	3,78	38,45684406	74,4
2	12 y 13 Agost	489724,883	1085665,7	Charral	Limoso	1801	7,56	19,58715888	21,7
3	12 y 13 Agost	489617,767	1085610,79	Bosque	Franco Arcill	1721	0,756	1,172492122	35,5
4	12 y 13 Agost	490464,366	1085519,22	Charral	Arcillo-arenc	1852	1,134	3,757142146	51,8
5	12 y 13 Agost	488509,98	1085457,55	Plantación fo	Limo-arcillos	1805	18,9	37,57336046	60,7
6	12 y 13 Agost	488627,791	1085352,05	Bosque	Arcillo-limos	1816	3,78	10,21216789	14,7
7	12 y 13 Agost	488797,028	1085184,83	Bosque	Arcillo-limos	1811	3,78	7,802931098	25,9
8	12 y 13 Agost	488866,176	1085165,92	Plantación fo	Limo-arcillos	1797	15,12	75,33714226	16,13
1	19 y 20 Agost	488027,423	1085195,92	Bosque	Arcilloso	1770	7,56	11,05878656	25,5
3	19 y 20 Agost	488339,496	1084966,12	Bosque	Limo-arcillos	1705	3,78	28,47935757	56,5
2	19 y 20 Agost	488124,947	1085171,56	Plantación fo	Limo-arenos	1703	0,126	17,30865834	3,9
4	19 y 20 Agost	488630,069	1085159,68	Bosque	Arcillo-arenc	1708	3,78	17,4124164	35,9
5	19 y 20 Agost	488528,694	1084861,89	Bosque	Franco Arcill	1678	7,56	14,09341889	23,1
6	19 y 20 Agost	488499,616	1084804,86	Bosque	Arcilloso	1670	11,34	81,93684062	29,2
7	19 y 20 Agost	488359,553	1084803,25	Cultivo de Ca	Limo-arcillos	1675	11,34	29,06637035	61,3
8	19 y 20 Agost	487937,798	1084941,35	Charral	Arcillo-limos	1763	7,56	19,85478589	86,6
11	2 y 3 Setiemb	488750,092	1084578,58	Bosque	Limo-arcillos	1586	7,56	18,96021426	85,5
1	2 y 3 Setiemb	490867,346	1085158,12	Cultivo de Ca	Arcillo-limos	1773	1,89	5,773144965	31,5
2	2 y 3 Setiemb	490858,61	1085131,76	Cultivo de Ca	Franco Limo-	1753	0,378	32,63489871	45,9
3	2 y 3 Setiemb	490414,035	1084702,59	Otros cultivo	Limo-arenos	1587	0,378	2,549688413	97
4	2 y 3 Setiemb	490244,493	1084769,85	Otros cultivo	Limo-arcillos	1590	0,378	2,563441205	37,8
5	2 y 3 Setiemb	489828,586	1084973,14	Pastos	Limo-arcillos	1540	0,378	4,854416187	41,7
6	2 y 3 Setiemb	489746,228	1085021,86	Cultivo de Ca	Limo-arcillos	1539	3,78	16,73060348	12,7
8	2 y 3 Setiemb	489628,682	1084512,98	Plantación fo	Arcillo-arenc	1580	0,378	3,422947928	24,4
9	2 y 3 Setiemb	489321,382	1084467,05	Pastos	Arcillo-limos	1578	0,378	5,202053471	41,6
7	2 y 3 Setiemb	489775	1084525,68	Urbano	Franco Arcill	1591	7,56	25,31501709	85
10	2 y 3 Setiemb	488968,875	1084418,54	Urbano	Franco Arcill	1571	0,756	1,897001576	22,8

Anexo 2. Tabla para pruebas en campo

PRUEBA DE INFILTRACIÓN

Prueba #	
Fecha:	**Hora:**
Coordenadas:	**Latitud:** **Longitud:**
Altitud:	

Características del sitio		
Profundidad enterrada:		
Suelo:	**Plastas:** **Textura**: **Pegajosidad:** **Color:**	
Pendiente:		
Uso:		
Otros:		

Tiempo (min)	Nivel de agua (L)	Δh	Tasa de infiltración (Δh/Δt)

Anexo 3. Código fuente de programación

```
#### Modelo conceptual para la simulación del caudal en la microcuenca Río Tigre (5.5 km2) ################

require(DEoptim)
require(hydroGOF)
require(FME)

inp <- read.csv("DATOS_OBS.csv",na.strings="")      #datos de entrada
names(inp) <- c("fecha","P","PET")
attach(inp,warn.conflicts = F)

##########################################  inicio  de la función ##########################################

MRT <- function(a=0.9,
                b=0.52,                    #parametros iniciales
                c=0.0009,
                d=0.0007,
                g=0.10341454,
                h=0.03440984){

              # parametros de capacidad de infiltración

  fo = 29.479    # cap de infiltración inicial
  fc = 8.687    #cap de infiltracion final
  k = 0.427       #constante de decaimiento

  nrun <- nrow(inp)               #longitud de la serie de tiempo

              #definicion de variables

  P_int <- rep(NA,nrun)             #Precipitación interceptada
  transp <- rep(NA,nrun)            #transpiración
  evaporacion <- rep(NA,nrun)       #evaporación
  Qi <- rep(NA,nrun)                #flujo de intercepción
  Int <- rep(NA,nrun)               #intercepción en el dosel del bsoque
  trans_real <-rep(NA,nrun)         #transpiracion posible según disponibilidad de agua
  Ps <- rep(NA,nrun)                #Precipitacion que alcanza el suelo directamente
  S <- rep(NA,nrun)                 #Deposito superior (suelo)
  Qd <- rep(NA,nrun)                #Escorrentia directa
  infiltra <- rep(NA,nrun)          #Infiltracion
  Qs <- rep(NA,nrun)                #Escorrentia superficial
  evap_real <- rep(NA,nrun)         #evaporación posible según disponibilidad de agua
  perc <- rep(NA,nrun)              #percolación
  GW <- rep(NA,nrun)                #Deposito inferior (agua subterranea)
  Qb <- rep(NA,nrun)                #flujo de base
  Qt <- rep(NA,nrun)                #Escorrentía total
  AET <- rep(NA,nrun)               #Evapotranspiración actual

  for (i in 1:nrun) {

    if(i==1) {
      Int[i] <- 0                 #mm iniciales
      S[i] <- 5                   #mm iniciales
      GW[i] <- 5                 #mm iniciales
    }

    else {
      Int[i] <- Int[i-1]
      S[i] <- S[i-1]
      GW[i] <- GW[i-1]
    }


    Ps[i] <- P[i]*a
    P_int[i] <- P[i]-Ps[i]

```

```
67      evaporacion[i] <- PET[i]*b
68      transp[i] <- PET[i]-evaporacion[i]   #division de la ETP en transpiración (dosel) y evaporación (suelo)
69
70      Int[i] <- Int[i]+P_int[i]
71      Qi[i] <- c * Int[i]
72      Int[i] <- Int[i]-Qi[i]                                  #Depósito de intercepción
73      trans_real[i] <- ifelse(transp[i]>=Int[i],Int[i],transp[i])
74      Int[i] <- Int[i]-trans_real[i]
75
76      Ps[i] <- (1-a)*P[i]
77
78      Fp <- (fc + (fo-fc)*exp(-k))*24                #####Capacidad de infiltración (mm/día)
79      infiltra[i] <- ifelse(Ps[i]>=Fp,fc,Ps[i])
80      Qd[i] <- Ps[i]-infiltra[i]
81      S[i]<- S[i]+ infiltra[i]
82      Qs[i]<- S[i]*d
83      S[i]<- S[i]-Qs[i]
84      perc[i]<-S[i]*g
85      S[i]<- S[i]-perc[i]
86      evap_real[i]<-ifelse(evaporacion[i]>=S[i],S[i],evaporacion[i])
87      S[i]<-S[i]-evap_real[i]
88      S[i]<-S[i]+Qi[i]
89
90      GW[i]<-GW[i]+perc[i]
91      Qb[i]<-GW[i]*h
92      GW[i]<-GW[i]-Qb[i]
93
94      Qt[i] <- Qd[i] + Qs[i] + Qb[i]             ### milimetros/dia
95      AET[i] <- trans_real[i]+evap_real[i]
96      BH <- sum(P) - sum(AET)-sum(Qt)
97      val_Q <- (sum(Qb)/sum(Qt))*100        ### contribucion del agua subteranea
98
99    }
```

```
100
101   x <- c(BH,val_Q,Qt[750:1122])
102   return(x)
103
104 }
105
106 out <- MRT()
107
108 ###################### inicio evaluación #######################################
109
110 parRange <- data.frame(min = c(0.5,0.5,0,0.1,0,0.0001),max = c(1,1,1,1,1,0.1)) # rango de valores
111                                                                                  #por parametro
112 row.names(parRange) <- c("a","b","c","d","g","h")
113
114 LH <- Latinhyper(parRange,100000)              #generación de valores aleatorios
115
116 pairs(Latinhyper(parRange,100000),main="Latin hypercube")
117
118 Qsim <- function(p){                          # función de simulación #
119
120   MRT(a=p[1],b=p[2],c=p[3],d=p[4],g=p[5],h=p[6])
121
122 }
123
124 SR <- sensRange(func = Qsim,parInput = LH,num =100000,map = NULL)  #evaluación por set de parametros
125
126 rMT <- as.data.frame(SR,row.names=NULL,optional =FALSE)
127 write.csv(rMT, file="Result.csv")
128
```