

INFORME BORRADOR FINAL

Consultoría:

“Creación de un Portafolio de Áreas Prioritarias para el Fondo de Agua del Área Metropolitana de San Salvador”

Descargo de responsabilidad

Los conceptos y opiniones que en este documento se expresan son responsabilidad del equipo consultor y no necesariamente reflejan la posición de la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua, ni de ninguna de las instituciones que la integran.

INFORME BORRADOR FINAL

Consultoría:

“Creación de un portafolio de áreas prioritarias para el Fondo de Agua del Área Metropolitana de San Salvador”

ALIANZA LATINOAMERICANA DE FONDOS DE AGUA

The Nature Conservancy

Presentado por:



Enero de 2021

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

	pp.
I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	9
II. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA.....	10
2.1. Objetivos Seleccionados	10
2.2. Marco Conceptual	10
2.2.1. El Estado Deseado de los Fondos de Agua.....	10
2.2.2. Oferta actual de servicios ecosistémicos hidrológicos	12
2.2.3. Demanda del recurso.....	14
2.2.4. Proyecciones de la oferta y demanda.....	15
2.3. Herramientas de Análisis Seleccionadas y su Aplicación.....	17
2.3.1. Etapa 1: Preparación de insumos básicos	19
2.3.2. Etapa 2: Preprocesamiento de datos	20
2.3.3. Etapa 3: Procesamiento de datos usando RIOS.....	28
2.3.4. Etapa 4: Procesamiento de datos usando InVEST	31
2.4. Resolución Espacial y Temporal Seleccionada	32
2.5. Definición y Justificación de Parámetros a Evaluar	34
2.6. Indicadores Propuestos.....	35
III. RESULTADOS	37
3.1. Mapa de Usos y Coberturas del Suelo	37
3.1.1. Categorías de Uso y Coberturas del Suelo	38
3.1.2. Composición del Paisaje.....	38
3.2. Coeficientes de los Parámetros a Evaluar por Categoría de Uso y Cobertura del Suelo	39
3.3. Pre-Procesamiento de Datos.....	40

3.4. Resultados de la Modelación.....	48
3.4.1. Mapas a partir del Módulo Asesor del Portafolio	48
3.4.2. Mapas a partir del Módulo Traductor del Portafolio	53
3.4.3. Resultados InVEST	59
3.4.4. Escenario de NO Intervención	73
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

ANEXOS

Anexo 1. Descripción de Parámetros a Evaluar

Anexo 2. Informe de Procedimientos en Q-SWAT

Anexo 3. Tablas de Escorrentía, Flujo Base, Evapotranspiración y Agua disponible para la infiltración, en totales anuales por microcuencas de la RHI_AMSS, por escenario de intervención

Anexo 4. Tabla de cálculo de los cambios en escorrentía causados por los cambios en las coberturas y usos del suelo en la RHI_AMSS ocurridos durante el período 2010 – 2020

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

pp.

TABLAS:

Tabla 1. Insumos requeridos para cada uno de los objetivos definidos.....	20
Tabla 1. Promedios mensuales de precipitación por estación meteorológica entre 1965 y 2012.....	21
Tabla 3. Promedios mensuales de evapotranspiración potencial por estación meteorológica entre 1965 y 2012.....	21
Tabla 4. Componentes del coeficiente de la pendiente.....	23
Tabla 5. Componentes del coeficiente de cobertura vegetal.....	23
Tabla 6. Resumen detallado de la información geográfica utilizada.....	24
Tabla 7. Actividades y Transiciones por uso/cobertura del suelo.....	27
Tabla 8. Microcuencas que conforman la Región Hidrogeográfica de Influencia del AMSS.....	32
Tabla 9. Relación de los parámetros seleccionados con los objetivos perseguidos.....	34
Tabla 10. Categorías de usos y coberturas del suelo y composición del paisaje de la RHGI_AMSS.....	38
Tabla 11. Categorías de usos y coberturas del suelo y composición del paisaje de la RHGI_AMSS.....	39
Tabla 12. Categorías de usos y coberturas del suelo y composición del paisaje de la RHGI_AMSS.....	40

FIGURAS:

Figura 1. Resumen esquemático de los pasos y resultados de las metodologías RIOS e INVEST.....	17
Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.....	19
Figura 3. Límites de las microcuencas que conforman la Región Hidrogeográfica de Influencia (RHI) del AMSS.....	33
Figura 4. Mapa de usos y coberturas del suelo en la Región Hidrogeográfica de Influencia del AMSS.....	37
Figura 5. Mapa de distribución de la precipitación anual promedio, RHGI_AMSS.....	41
Figura 6. Mapa de distribución de la precipitación del mes más lluvioso / erosividad, RHGI_AMSS.....	41

Figura 7. Mapa de evapotranspiración potencial de la RHGI_AMSS.....	42
Figura 8. Mapa de recarga acuífera potencial dentro de la RHGI_AMSS.....	42
Figura 9. Modelo de elevación digital (DEM: Digital Elevation Model) de la RHGI_AMSS.....	43
Figura 10. Mapa de pendientes de la RHGI_AMSS.....	43
Figura 11. Mapa de captación de agua por pixel en la RHGI_AMSS.....	44
Figura 12. Mapa de conducción de agua por pixel en la RHGI_AMSS.....	44
Figura 13. Mapa de tipos de suelos dentro de la RHGI_AMSS.....	45
Figura 14. Mapa de profundidad del suelo de la RHGI_AMSS.....	45
Figura 15. Mapa de texturas del suelo de la RHGI_AMSS.....	46
Figura 16. Mapa de índice de texturas de los suelos en la RHGI_AMSS.....	46
Figura 17. Mapa de erodabilidad de la RHGI_AMSS.....	47
Figura 18. Mapa de beneficiarios dentro de la RHGI_AMSS.....	47
Figura 19. Priorización de áreas de implementación_Act.1: Conservación.....	48
Figura 20. Priorización de áreas de implementación_Act.2: Restauración.....	49
Figura 21. Priorización de áreas de implementación_Act.3: Mejores prácticas agrícolas.....	49
Figura 22. Priorización de áreas de implementación_Act.4: Control de la expansión urbana.....	50
Figura 23. Portafolio de actividades prioritarias según área de intervención, 2,500 <i>ha</i>	51
Figura 24. Portafolio de actividades prioritarias según área de intervención, 5,000 <i>ha</i>	51
Figura 25. Portafolio de actividades prioritarias según área de intervención, 10,000 <i>ha</i>	52
Figura 26. Portafolio de actividades prioritarias según área de intervención, 25,000 <i>ha</i>	52
Figura 27. Portafolio de actividades prioritarias según área de intervención, 50,000 <i>ha</i>	53
Figura 28. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 2,500 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	54
Figura 29. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 2,500 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	54
Figura 30. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 5,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	55
Figura 31. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 5,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	55
Figura 32. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 10,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	56

Figura 33. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 10,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	56
Figura 34. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 25,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	57
Figura 35. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 25,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	57
Figura 36. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 50,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	58
Figura 37. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 50,00 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	58
Figura 38. Escorrentía total anual esperada (m^3) en la RHI_AMSS, por escenario de intervención.....	59
Figura 39. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Línea Base	59
Figura 40. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 <i>ha</i> . Período: 5 años	60
Figura 41. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Escenario 5,000 <i>ha</i> . Período: 5 años	60
Figura 42. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Escenario 10,000 <i>ha</i> . Período: 5 años	61
Figura 43. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Escenario 25,000 <i>ha</i> . Período: 5 años	61
Figura 44. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Escenario 50,000 <i>ha</i> . Período: 5 años	62
Figura 45. Flujo lateral base anual esperado (m^3) en la RHI_AMSS, por escenario de intervención	62
Figura 46. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Línea Base.	63
Figura 47. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 <i>ha</i> . Período: 5 años	63
Figura 48. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 5,000 <i>ha</i> . Período: 5 años	64
Figura 49. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 10,000 <i>ha</i> . Período: 5 años	64
Figura 50. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 25,000 <i>ha</i> . Período: 5 años	65
Figura 51. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 50,000 <i>ha</i> . Período: 5 años	65
Figura 52. Evaporación total anual esperada (m^3) en la RHI_AMSS, por escenario de intervención	66
Figura 53. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Línea Base.....	66
Figura 54. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 <i>ha</i> . Período: 5 años	67
Figura 55. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 5,000 <i>ha</i> . Período: 5 años	67
Figura 56. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 10,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	68
Figura 57. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 25,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	68
Figura 58. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 50,000 <i>ha</i> . Período: 5 años.....	69

Figura 59. Agua disponible para la infiltración (m ³) en la RHI_AMSS, por escenario de intervención.....	69
Figura 60. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, línea base	70
Figura 61. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 ha. Período: 5 años.....	70
Figura 62. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 ha. Período: 5 años.....	71
Figura 63. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 ha. Período: 5 años.....	71
Figura 64. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 ha. Período: 5 años.....	72
Figura 65. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 ha. Período: 5 años.....	72
Figura 66. Áreas degradadas entre 2010 y 2020 en la región hidrogeográfica de influencia del AMSS.....	73
Figura 67. Pérdidas de usos y coberturas del suelo en la región hidrogeográfica de influencia del AMSS, entre 2010 y 2020	74
Figura 68. Ganancias en usos y coberturas del suelo en la región hidrogeográfica de influencia del AMSS, entre 2010 y 2020	74

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El Salvador enfrenta una serie de problemas y carencias vinculadas a la sostenibilidad del recurso agua: es uno de los pocos países en el mundo que no tiene una ley integral para la gestión del recurso, posee un alto porcentaje de vertidos sin tratamiento o con un tratamiento inadecuado, los cambios de uso de suelo limitan la regulación hídrica, las aguas superficiales tienen altos niveles de contaminación, hay sobreexplotación en algunos de los acuíferos, extracción de materiales pétreos sin control, falta de instrumentos para la gestión de cuencas y acuíferos – incluyendo los transfronterizos – erosión, que lleva al empobrecimiento de los suelos y al azolvamiento de los principales embalses, principalmente por el empleo de prácticas agropecuarias inadecuadas. Todos estos impactos se ven empeorados por la creciente variabilidad climática, lo que aumenta la incidencia de riesgos como sequías, inundaciones y deslizamientos. Por su alta densidad poblacional y acelerado crecimiento con poco control, el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) es uno de los territorios más afectados por la crisis del agua.

En vista de esta creciente vulnerabilidad hídrica, se propuso a inicios de 2018 la creación de un Fondo de Agua para el Área Metropolitana de San Salvador (FA_AMSS). Las acciones para tal fin inician, con el apoyo de la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua, en noviembre de 2018, con el desarrollo de un estudio de factibilidad que se concluyó en enero de 2019. El estudio analizó la situación, problemáticas e institucionalidad, y concluye que la creación de tal mecanismo aportaría a la solución de los actuales problemas, a la vez que fomentaría la cooperación interinstitucional e intersectorial y, de ser adecuadamente diseñado e implementado, podría tener un impacto significativo sobre la cantidad, calidad y abastecimiento a futuro del recurso.

A partir del positivo resultado del estudio de factibilidad, en octubre de 2019 da inicio la Fase de Diseño del referido Fondo, con el desarrollo del Estudio para la Priorización de Áreas de Intervención, al cual corresponde el presente informe, con el fin de orientar sobre en qué y dónde las inversiones iniciales deben enfocarse, para obtener los mejores resultados posibles de acuerdo a los objetivos trazados. Paralelamente, se trabaja en la implementación de un Proyecto Piloto, que tiene por objetivo mostrar el potencial de acción de una estructura como la propuesta y sus impactos sobre la población beneficiaria, despertando así el interés de diferentes sectores por sumarse a la iniciativa. El siguiente paso será la conducción un estudio socio-económico para estimar el impacto de tales intervenciones.

A través de una visión enfocada en la seguridad hídrica, los Fondos de Agua integran de mejor manera las soluciones en todos los sectores que pueden cambiar fundamentalmente la gestión del recurso y permitir más puntos de vista, más partes interesadas y más oportunidades para generar un mayor impacto.

II

APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

I. OBJETIVOS SELECCIONADOS

El Análisis de Factibilidad permitió determinar que la demanda de agua de los diversos sectores en el Área Metropolitana de San Salvador depende en un 65 % de recursos subterráneos. En tal sentido, el objetivo principal de este estudio es:

Identificar las Áreas prioritarias dentro de la región hidrogeográfica de influencia del Área Metropolitana de San Salvador (RHI-AMSS) que, por sus características biofísicas, posean el mayor potencial para incrementar la infiltración profunda y, por tanto, la recarga de acuíferos subterráneos, a partir de la implementación de las intervenciones propuestas por el Fondo de Agua.

Adicionalmente, los objetivos secundarios del presente estudio son:

Identificar y priorizar las áreas en que las intervenciones propuestas podrían ser implementadas y rendir los mejores resultados, así como las transiciones o transformaciones que, a raíz de las intervenciones a implementar, se suscitarían, mediante la aplicación de la metodología del Sistema de Optimización de Inversiones en Recursos (RIOS, por sus siglas en inglés).

Calcular la cantidad de servicios ecosistémicos, en especial la disponibilidad de agua para la infiltración profunda, a partir de las intervenciones propuestas y los escenarios de transición modelados con RIOS, por medio de la aplicación de las metodologías de Evaluación Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones (InVEST, por sus siglas en inglés).

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. El Estado Deseado de los Fondos de Agua

La Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua ha trabajado en sistematizar y estandarizar el ciclo de proyectos para el diseño, creación y fortalecimiento de los Fondos de Agua (Calvache et al. 2012). Este ciclo, conocido como el “Estado Deseado para los Fondos de Agua”, ha sido desarrollado para crear un

modelo de implementación consistente y firme, necesario para implementar Fondos de Agua exitosos a gran escala. El Estado Deseado amplió el alcance y el impacto que históricamente han tenido los Fondos de Agua en América Latina durante los últimos 20 años, en la búsqueda de una agenda más amplia de seguridad hídrica. En tal sentido, la capacidad y calidad de los Fondo de Agua para ayudar a brindar seguridad hídrica ha evolucionado y mejorado.

Las fases del Estado Deseado de los Fondos de Agua son las siguientes:

1. **FACTIBILIDAD.** En esta fase se evalúa la elegibilidad, al determinar si existen desafíos de seguridad hídrica en una determinada área o región, así como el potencial de que un Fondo de Agua ayude a abordar estos desafíos. De existir este potencial, en esta etapa se evalúa la factibilidad (la probabilidad de que la iniciativa funcione) y, de manera general, se determina cómo un Fondo de Agua podría contribuir positivamente a la seguridad del recurso dentro de un área/región definida.
2. **DISEÑO.** En esta fase se evalúa y elige una estructura que sirva como plataforma de acción colectiva, en donde los interesados de todos los sectores se reúnen, coordinan y colaboran, para ayudar a mejorar la seguridad hídrica a través del cambio sistémico basado en la ciencia. Los dos objetivos principales de esta fase son:
 - a. Tener un Plan Estratégico convincente y accionable, que articule cómo el Fondo de Agua contribuirá a mejorar la seguridad hídrica en la región;
 - b. Tener liderazgo (director, junta directiva, y asesores del Fondo de Agua) comprometido con la estrategia y los planes, con el apoyo suficiente de partes interesadas críticas/prioritarias, donantes/inversionistas, junto con recursos y/o compromisos para impulsar al Fondo de Agua hacia las Fases de Creación y Operación.
3. **CREACIÓN.** En esta fase se prepara el Fondo de Agua para la operación y es lanzado oficialmente.
4. **OPERACIÓN.** Un Fondo de Agua operativo busca estabilidad en esta fase, al desarrollar/implementar un plan de trabajo integral que guía la ejecución sistemática de actividades, medición, evaluación y comunicación del progreso (hacia los objetivos previamente definidos) y mejora continua, a través de acciones correctivas, refinamientos e innovación.
5. **CONSOLIDACIÓN – MADUREZ.** Esta quinta fase es una continuación de la anterior, con un enfoque en asegurar la viabilidad a largo plazo del Fondo, para crear un impacto duradero y significativo, que contribuya positivamente a la seguridad hídrica.

La implementación de esta ruta homogenizada de acción busca:

- Profesionalizar la gestión de los Fondos de Agua, lo que permite una cultura de mayor rendimiento, impulsada por el enfoque en la entrega, el alcance, el cronograma y el presupuesto.

- Asegurar que haya objetivos claros, establecidos desde el principio, que tengan un enfoque continuo, y que el progreso hacia esos objetivos se comunique de manera rutinaria.
- Escalar la eficiencia y efectividad mediante procesos y sistemas que priorizan la comprensión, la rendición de cuentas y la entrega consistente y oportuna de resultados de calidad (de manera que se reduzcan o eliminen los imprevistos).
- Acelerar el proceso, simplificando y desentramando la planificación, ejecución y generación de informes.
- Contribuir a que los procesos de gobernanza/toma de decisiones sean efectivos y se ejecuten acorde a los principios del proceso, incluyendo aquellos que rigen a los participantes del Fondo de Agua y su conducta.
- Mejorar la coalición y el involucramiento de los actores clave, facilitando que estos comprendan la importancia y necesidad del trabajo realizado por el Fondo de Agua, de manera que facilite la toma de decisiones basada en el consenso y la acción colectiva.
- Contribuir a que cada Fondo de Agua esté listo para la transición a una fase de Operación, con sistemas, procesos y capacidades en su lugar, antes de completar las fases de construcción.

2.2. Oferta actual de servicios ecosistémicos hidrológicos

- a. Contribución a los procesos de recarga acuífera.** A la fecha del presente estudio, no se cuenta con mapas oficiales de recarga o infiltración hídrica potencial para ningún área del país. A partir de los datos y mapas hidrogeológicos existentes, el equipo consultor construyó un mapa de recarga o infiltración hídrica potencial para el área de interés, la Región Hidrogeográfica de Influencia (RHI) del AMSS. Si bien el potencial de infiltración del suelo es determinante, la recarga real de los acuíferos subterráneos está en buena medida condicionada por las coberturas y usos del suelo presentes, los cuales pueden favorecer la infiltración (como el caso de los bosques), limitarla o prevenirla (como el caso de las superficies urbanas impermeabilizadas). El análisis combinado de ambos factores ayuda a identificar las áreas críticas, en las cuales la implementación de medidas convencionales (zanjas de infiltración, mejora de la cobertura vegetal, etc.) o procesos de recarga acuífera artificial (a través de pozos de recarga de agua lluvia o lagunas de infiltración), tendrán los mejores resultados en términos de optimizar la recarga de los acuíferos subterráneos.

Según el detalle de recarga hídrica anual establecida y estimada por microcuenca en la zona de interés, presentado en el Estudio de Factibilidad del Fondo de Agua del AMSS (Castillo et al. 2019), se estima que **la infiltración total en la región hidrogeográfica de influencia del AMSS es de 312,388,128.58 m³/año, equivalente al 32.5 % de la precipitación.**

- b. Regulación de la disponibilidad de agua.** A partir del Balance Hídrico (entradas vs. salidas) desarrollado por el Estudio de Factibilidad (Castillo et al. 2019), donde se define la cantidad de agua que ingresa al sistema (Recarga Hídrica Potencial o Infiltración Potencial, más el agua importada de otras

cuenchas), la cantidad de agua que se extrae de la cuenca y la cantidad de agua necesaria para abastecer la demanda para los diferentes usos, se estimó la capacidad de la cuenca para abastecer la demanda, así como la disponibilidad anual de agua.

Entendiéndose la disponibilidad hídrica como la diferencia entre la oferta hídrica (recarga) y la demanda hídrica (consumo), el Estudio de Factibilidad del Fondo de Agua del AMSS (Castillo *et al.* 2019) estimó que **en la zona de estudio existe una disponibilidad de agua de 153,465,112.68 m³/año, equivalente al 49.1 % de la recarga hídrica anual.**

Con medidas que potencian la infiltración hídrica real, como las mencionadas en el literal “a” y otras que fomenten el uso racional y eficiente del agua entre los usuarios (como la adopción de tecnologías y dispositivos ahorradores, el uso de agua lluvia, etc.), el Fondo de Agua busca reducir la vulnerabilidad ante una posible escasez futura del recurso.

- c. **Prevención de inundaciones y deslizamientos.** Cuando en una cuenca se fomenta la infiltración del agua lluvia, se reduce el volumen que escurre de la misma (escorrentía), disminuyendo así el riesgo, intensidad y frecuencia con que se puedan presentar inundaciones y deslaves cuencas abajo. Adicionalmente, la vegetación y estructura del terreno dan cohesión al suelo y disminuyen la velocidad de la escorrentía, liberando el agua paulatinamente, lo que disminuye el volumen de agua en un momento dado y, por tanto, los riesgos. Si bien no se debe olvidar que este efecto amortiguador funciona dentro de cierto rango de valores climáticos “normales”, pero siempre existe un riesgo de que su resistencia y resiliencia sean superadas durante eventos climáticos extremos (por ejemplo, tormentas o depresiones tropicales muy copiosas).

No existen a la fecha datos o indicadores que ayuden a cuantificar el aporte de la Región Hidrogeográfica de Influencia del AMSS en este sentido, pero es válido suponer que **el acelerado cambio en el uso del suelo, la deforestación y las malas prácticas agropecuarias, son todos factores que han contribuido a la disminución de la capacidad de regulación de la escorrentía del sistema**, que ha sido la causa de numerosas tragedias que lamentar a lo largo de las últimas décadas.

Las actividades preliminarmente identificadas como parte del portafolio de acciones del Fondo de Agua del AMSS, tienen como principal objetivo incrementar la infiltración del agua y la retención de agua y suelo, por lo que también puede esperarse una reducción del riesgo de inundaciones y deslaves.

- d. **Regulación de la calidad del agua.** La capacidad que tienen los sistemas naturales para mejorar la calidad del agua es – desde la perspectiva del uso humano del recurso – particularmente importante en dos momentos del ciclo: (1) durante la depuración del agua natural (lluvia, escorrentía o afloramiento) destinada al consumo u otros usos y (2) durante la descontaminación – hasta cierto límite – de las aguas servidas, es decir aquella agua residual de cualquier uso humano, al momento de su reincorporación al sistema natural o antes de su siguiente uso.

En general, es poca la información actualmente existente sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas de la Región Hidrogeográfica de Influencia (RHI) del AMSS. La mayoría de mediciones

han tenido lugar en los cauces del río Acelhuate y sus afluentes, los cuales constituyen el principal recurso hídrico del AMSS (MARN, 2006); poniendo de manifiesto el alto grado de contaminación existente casi desde el nacimiento de estas fuentes de agua, producto de la mezcla de aguas residuales de todo tipo (domésticas, comerciales, industriales y hasta tóxico-infecciosas), y de desechos sólidos, con los caudales naturales. Como el Estudio de Factibilidad del Fondo de Agua del AMSS (Castillo et al. 2019) señala: **el Acelhuate y sus afluentes han sufrido una fuerte degradación ambiental, paralela al desarrollo urbano de toda la subcuenca.**

Se estima que las plantas de tratamiento de agua construidas únicamente corresponden al 11% de la población servida, por lo que en la actualidad **más de 1,200,000 habitantes vierten sus aguas sin tratar al sistema de alcantarillado.** Estos vertidos están teniendo un efecto muy negativo sobre la calidad de las aguas superficiales e incluso las del manto freático inmediato. **El modelo de calidad de aguas superficiales, basado en el Índice de Calidad del Agua (ICA), identifica a todos los ríos y riachuelos del AMSS – con la excepción de los tramos más altos ubicados en el volcán de San Salvador – como Contaminados y Fuertemente contaminados.** Las aguas del sistema, aún fuertemente contaminadas, desembocan eventualmente en el sector superior del embalse del Cerrón Grande; contribuyendo de esta forma al acelerado proceso de eutrofización del mismo y convirtiendo al río Lempa (principal río del país) en el gran receptor de las aguas residuales del AMSS.

Bajo las condiciones actuales, es posible concluir que: **los ecosistemas (naturales, rurales y urbanos) de la región de influencia han perdido – o visto significativamente afectada – su capacidad para regular la calidad del agua que ingresa o se vierte al sistema,** debido a que la carga excesiva de contaminantes supera la capacidad de los ecosistemas degradados de metabolizar dicha carga.

Es claro que la conservación y restauración de ecosistemas naturales, agroecosistemas e incluso de los ecosistemas urbanos, tendrá un efecto positivo sobre la capacidad de autolimpieza del sistema hídrico, pero se debe reconocer que el mayor impacto en este sentido dependerá de la educación a la población usuaria y de la implementación de nuevos y más eficientes sistemas de tratamiento.

2.3. Demanda del recurso

El Estudio de Factibilidad del Fondo de Agua del AMSS (Castillo et al. 2019) estimó la **demanda hídrica total (uso doméstico, comercial, industrial y agrícola) para la región de estudio en 158,923,016 m³/año, para el 2018, equivalentes al 50.9 % de la recarga hídrica anual.** De acuerdo a datos reportados por ANDA y correspondientes al año 2017, el sector domiciliar representa un 78 % (unos 123,959,952 m³/año) del consumo (lo que incluye a las instituciones del Gobierno Central, autónomas y municipales, así como a las áreas marginales); seguido por el sector comercio, que representa un 17.7 % (unos 28,129,374 m³/año) y el industrial un 4 % (unos 6,356,921 m³/año).

Sólo en el AMSS habitan 1,566,697 personas (una densidad de 2,656 hab/km²), sin considerar a la población flotante que se desplaza desde el interior del país; y se espera un crecimiento anual de 0.16% durante los próximos 30 años. Si se considera el área de toda la RHI, el conteo de habitantes se eleva a 1,917,098. (DIGESTYC, 2017)

Considerando sólo las acometidas de uso doméstico o residencial, **la cobertura urbana del servicio de agua potable en la Región Metropolitana alcanza al 98.9 %** de la población, incluyendo a los usuarios que son atendidos por autoabastecidos y descentralizados. Los municipios de Tonacatepeque, San Martín y Ciudad Delgado, son los que presentan una menor cobertura, con valores comprendidos entre el 70 % y el 80 % (PNAPS, 2017).

En lo que respecta a la continuidad, **sólo el 38 % de la población urbana del AMSS recibe agua siete días a la semana durante 24 horas**. En buena medida, estas deficiencias se deben a la antigüedad y falta de adecuado mantenimiento de la infraestructura, que se estima genera hasta un 45% de pérdidas. (ANDA, 2017)

Cabe mencionar que, junto a las deficiencias en el abastecimiento de agua, en muchos casos **existe un mal uso del recurso**. Por otro lado, **no existen controles adecuados para mejorar el conocimiento sobre la extracción, ni incentivos que promuevan el uso eficiente, el tratamiento y reúso del recurso**.

2.4. Proyecciones de la oferta y demanda

A la fecha, y gracias a que en la región de influencia del AMSS aún persisten importantes extensiones naturales y semi-naturales, y que el tipo de suelo, textura y estructura facilitan la infiltración y retención hídrica, **la zona no ha llegado a la condición de estrés hídrico** (indicador porcentual de la presión a la que se encuentra sometido el recurso). Como antes se señaló, en la zona de estudio existe una disponibilidad de agua equivalente al 49.1 % de la recarga hídrica anual. **Sin embargo, existen acciones y procesos que podrían agravar la situación en un futuro cercano.**

Para las próximas décadas se espera, como ya se dijo antes, un incremento anual promedio de la población metropolitana del 0.16%, así como la continuidad del crecimiento expansivo del área urbana, con proyectos habitacionales de baja densidad y, en menor escala, desarrollos verticales de alta densidad. **Lo que significa mayor demanda.**

Por otra parte, la misma expansión urbana, la pérdida de cobertura vegetal, las malas prácticas agropecuarias y el cambio del uso del suelo (particularmente en áreas clave para la recarga hídrica), traerán consigo una disminución de la capacidad de infiltración y, por tanto, de la recarga del sistema. **Lo que significa menor oferta/disponibilidad de agua.**

El análisis comparativo de imágenes satelitales de la última década (2010 – 2019) realizado como parte del presente estudio, identificó un total de 1,794 hectáreas (equivalentes a un 3.25% del área de estudio) que han sufrido cambios en la cobertura/uso del suelo que han afectado negativamente su capacidad para retener e infiltrar el agua lluvia. Las mayores pérdidas corresponden a los cafetales bajo sombra (con una tasa promedio de deforestación anual del 0.72%); mientras que las coberturas que más rápidamente se expanden son las agropecuarias, que conforman el 70.93% de las expansiones observadas, particularmente el cultivo de granos básicos, que corresponde al 30.1% de las expansiones. A partir de la comparación de los coeficientes de Números Curva (CN, por sus siglas en inglés) de las coberturas/ usos iniciales con los de las finales, se estima que tales han tenido como resultado un incremento en la escorrentía anual del orden de los 5,000,000 m³, disminuyendo en igual magnitud la cantidad de agua disponible para la infiltración. De no implementarse medidas de restauración y control, como las propuestas por la iniciativa del Fondo de Agua del AMSS, sólo se puede esperar que el deterioro de los ecosistemas naturales y agroecosistemas continúe a igual ritmo durante la próxima década (para detalles ver Sección 3.4.3. Escenario de NO Intervención).

Estas tendencias se verán agravadas por la creciente inestabilidad climática, producto del calentamiento global, y empujarán fuertemente al AMSS hacia un escenario futuro de estrés hídrico y de riesgos ambientales incrementados.

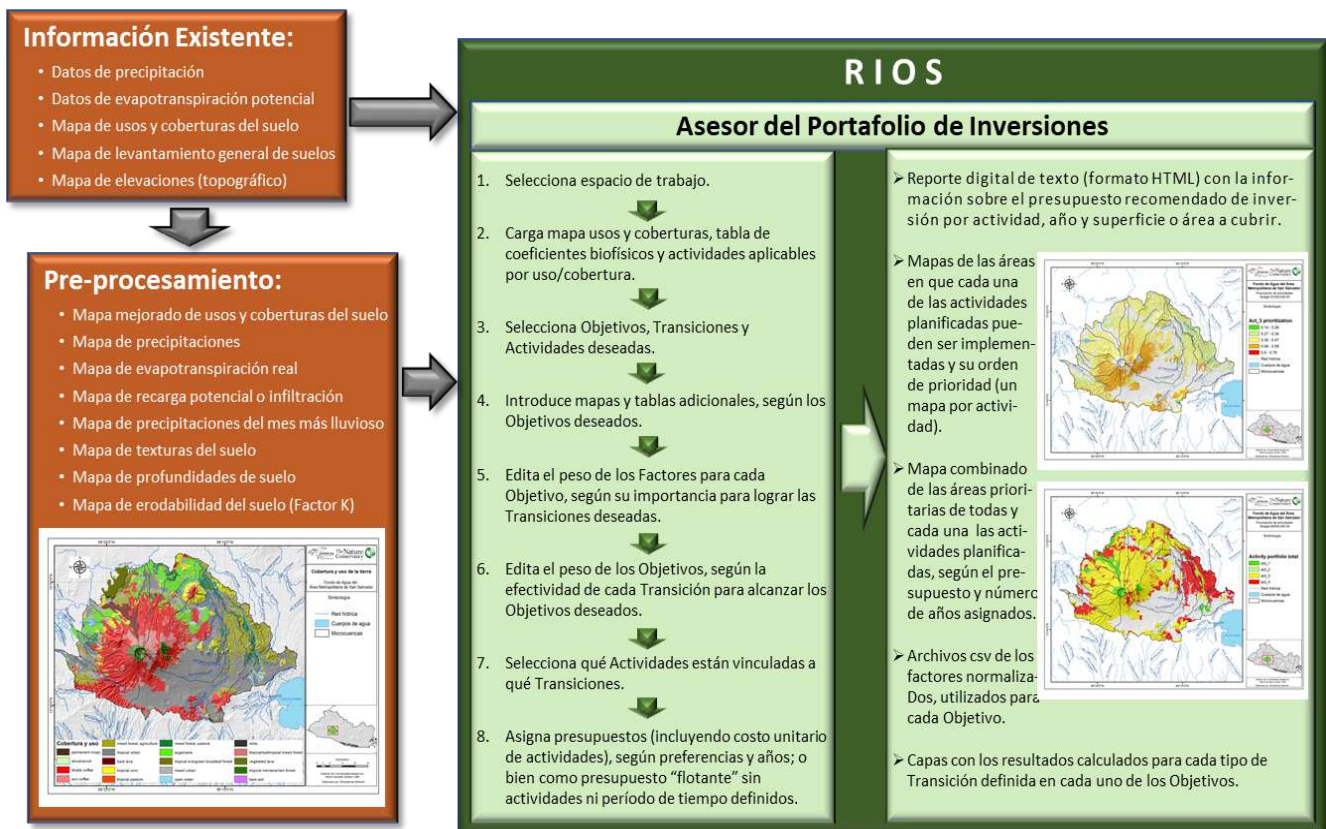
La implementación de acciones contundentes, como las propuestas por la iniciativa del Fondo de Agua, serán indispensables si se desea evitar, o al menos disminuir, las consecuencias negativas del crecimiento poblacional, la falta de planificación y el deterioro ambiental.

3. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS SELECCIONADAS Y SU APLICACIÓN

Para llevar a cabo la priorización de las inversiones y calcular los posibles beneficios derivados, se seleccionaron dos metodologías complementarias: (i) el Sistema de Optimización de Inversiones en Recursos (RIOS, por sus siglas en inglés) y (ii) la Evaluación Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones (InVEST, por sus siglas en inglés), debido a las siguientes razones:

- Si bien estos son modelos estimadores bastante generales, se trata de modelos de aplicación relativamente sencilla, que trabajan aún en escenarios con poca información de base disponible, basados en coeficientes objetivos, que permiten un enfoque basado en ciencia;
- Se aplican de forma complementaria;
- Son softwares libres, flexibles e independientes;
- Permiten modelar escenarios para diversos objetivos, incluyendo la recarga de fuentes subterráneas y el control de la escorrentía, aplicables al caso de San Salvador;
- Ambas metodologías se basan en un enfoque de capital natural; y
- Ambas metodologías resultan en la producción de modelos espacialmente explícitos.

Los siguientes esquemas resumen los pasos del proceso de aplicación y resultados de ambas metodologías:



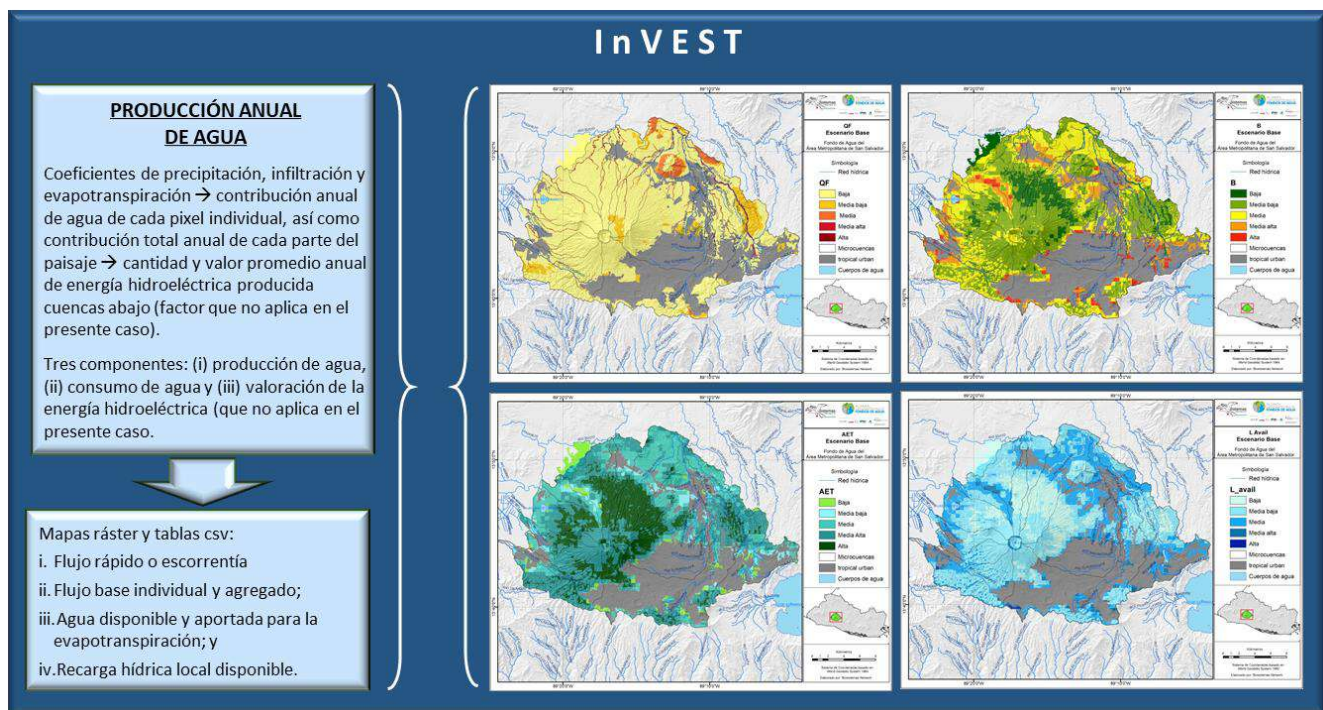
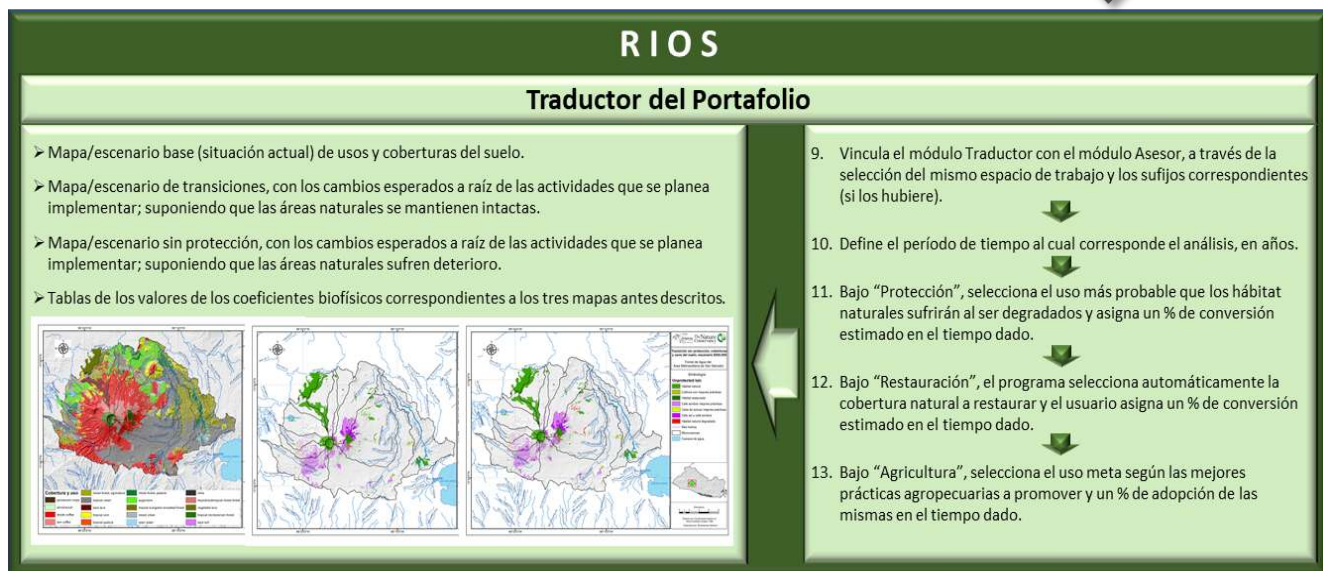


Figura 1. Resumen esquemático de los pasos y resultados de las metodologías RIOS e INVEST.

Adicionalmente al proceso antes descrito, se intentó la modelación utilizando el software de *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT), pero la falta de información suficientemente detallada de períodos representativos de tiempo dificultó la tarea y fue causa de importantes retrasos en el cronograma de trabajo. Después

de un largo y desgastante proceso de refinamiento, ensayo y error, los resultados obtenidos no correspondían con las observaciones ni los criterios técnicos del equipo consultor; por lo que se decidió descartar tal información y apegarse a la metodología de modelación antes descrita, utilizando RIOS e InVEST, cuyos resultados sí se apegaron a lo esperado. De cualquier manera, el Anexo 2 del presente Informe resume el proceso de aplicación seguido con SWAT, que probablemente pueda ser retomado en el futuro, cuando se cuente con información más detallada.

3.1. Etapa I: Preparación de insumos básicos

3.1.1. Recolección de información existente

Información climática

Se sistematizaron las series de datos correspondientes a precipitación, temperatura y evapotranspiración desde 1965 hasta 2012, utilizadas por el Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (MARN, 2015) y correspondientes a 13 estaciones climáticas, así como a datos hidrométricos correspondientes a nueve estaciones de tres ríos principales, todas ubicadas dentro de o en el área cercana a la RHI del AMSS, como se muestra en la Figura 2. Así

mismo, se utilizaron datos de evapotranspiración real (ETO) y precipitación diaria de cuatro estaciones de referencia de la página del Global Weather Generator for SWAT (<https://globalweather.tamu.edu/>).

Información geográfica

Como referencia, se utilizaron los mapas de red hídrica y red vial del Centro Nacional de Registros (CNR) de El Salvador (<https://www.cnr.gob.sv/geoportel-cnr/>) y el Mapa de Levantamiento General de Suelos de El Salvador (escala 1:50000), del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 1962), convertido a formato ráster con resolución de 10 m. El modelo de elevación digital (MED/DEM) utilizado fue obtenido a partir de imágenes satelitales ASTER¹, del año 2000, con resolución de 30 m.

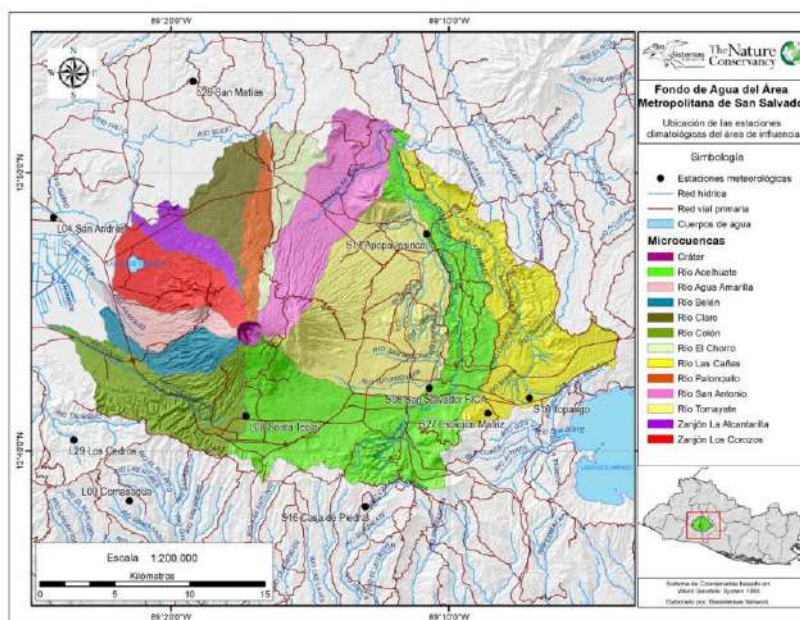


Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

¹ ASTER Global Digital Elevation Model V003: http://earthdata.nasa.gov/GI621404274-LPDAAEC_ECS

Por otra parte, se analizaron los más recientes mapas disponibles de Uso Actual del Suelo del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), pero dado que estos presentaban diferencias demasiado grandes con lo observado tanto en las imágenes satelitales como en las visitas de campo, se decidió no utilizar tales mapas para el presente estudio y se optó por generar un mapa propio (ver Sección 3.2, Preprocesamiento de datos, y Capítulo III, Resultados Preliminares).

3.2. Etapa 2: Preprocesamiento de datos

El primer paso fue la identificación de los requisitos o insumos necesarios para aplicar la modelación RIOS, de acuerdo a los objetivos del estudio (Vogl *et al.* 2015). Relación que se resume en la siguiente tabla.

Tabla 1. Insumos requeridos para cada uno de los objetivos definidos.

Objetivo	Insumos requeridos
Objetivo 1. Identificar las Áreas prioritarias dentro de la región hidrogeográfica de influencia del Área Metropolitana de San Salvador (RHI-AMSS) que, por sus características biofísicas, posean el mayor potencial para incrementar la infiltración profunda y, por tanto, la recarga de acuíferos subterráneos, a partir de la implementación de las intervenciones propuestas por el Fondo de Agua.	✓ Mapa actualizado de usos/coberturas del suelo y su tabla de coeficientes ✓ Modelo de Elevación Digital (MED/DEM) ✓ Delimitación de cuencas y subcuencas hidrográficas ✓ Precipitación mensual y anual promedio y del mes más lluvioso ✓ Evapotranspiración potencial (PET) y real (ETO) ✓ Erosividad y Erodabilidad ✓ Textura y profundidad del suelo ✓ Umbral de acumulación del flujo
Objetivo 2. Identificar y priorizar las áreas en que las intervenciones propuestas podrían ser implementadas y rendir los mejores resultados, así como las transiciones o transformaciones que, a raíz de las intervenciones a implementar, se suscitarían.	✓ Mapa actualizado de usos/coberturas del suelo y su tabla de coeficientes ✓ Tabla de clases resultantes de las transiciones y sus coeficientes ✓ Mapas resultantes del Módulo Asesor del Portafolio RIOS y sus tablas: áreas priorizadas por grupo de actividades y actividades priorizadas por área de intervención.
Objetivo 3. Calcular la cantidad de servicios ecosistémicos, en especial la disponibilidad de agua para la infiltración profunda, a partir de las intervenciones propuestas y los escenarios de transición modelados.	✓ Tabla general de clases de usos/coberturas del suelo, sus transformaciones y sus coeficientes ✓ Mapas resultantes del Módulo Traductor del Portafolio RIOS y sus tablas: áreas de transición resultantes de las intervenciones y áreas de potencial deterioro, por escenario, para un horizonte de 5 años. ✓ Mapas resultantes de la modelación InVEST y sus tablas: escorrentía, flujo base, evapotranspiración y cantidad de agua disponible para la infiltración, por escenario, para un horizonte de 5 años.

Teniendo claro el tipo y formato de la información requerida para correr las modelaciones correspondientes a los objetivos seleccionados, se procedió a generar la información faltante a partir de la existente.

Cálculo de la precipitación

A partir de los datos de lluvia registrados por las 13 estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio (Sección 3.1.1 y Figura 2), se calculó el acumulado mensual de precipitación y se obtuvieron los valores promedio mensuales para cada estación durante el periodo de registro (1965 – 2012). (Tabla 2)

Con los promedios mensuales de precipitación para cada estación pluviométrica y la ubicación geográfica de las mismas, se elaboró un mapa de puntos (ubicaciones), a partir del cual se realizó un proceso de cálculo de Polígonos de Thiessen, con el que se le asigna un valor ponderado de la precipitación a cada polígono. Teniendo el valor ponderado de precipitación para cada polígono, se procedió a realizar un mapa en formato ráster, con resolución 10 m x 10 m (Fig. 5), para que a cada pixel fuera asignado un valor propio de precipitación.

Tabla 2. Promedios mensuales de precipitación por estación meteorológica entre 1965 y 2012 (en mm).

ESTACION/mm	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL ANUAL
S10 Ilopango	3.50	1.30	10.10	40.90	166.60	280.80	316.90	317.60	330.20	220.60	44.30	8.20	1741.00
L08 Santa Tecla	3.70	1.00	9.00	37.90	168.00	314.90	351.40	328.00	358.30	206.70	49.20	6.60	1834.70
L09 Comasagua	1.80	1.20	8.00	32.30	188.80	351.60	342.30	342.20	397.80	311.30	50.10	5.70	2033.10
L26 San Matías	3.50	0.30	17.50	54.40	140.40	280.90	265.70	333.10	282.40	203.20	29.80	4.10	1615.30
L29 Los Cedros	2.30	0.70	7.80	39.90	198.70	316.30	325.30	314.70	387.40	343.10	32.00	2.10	1970.30
L42 Hacienda Atiocoyo	6.30	0.70	8.10	52.30	209.30	288.10	275.10	284.90	283.40	190.40	14.60	6.40	1619.60
S01 Toma de Aguilaes	4.40	2.80	9.60	77.80	166.60	279.10	291.90	321.30	297.30	185.50	30.00	3.10	1669.40
S08 San Salvador FICA	4.00	3.00	6.70	53.50	154.60	295.70	293.80	324.20	318.70	215.30	44.90	3.20	1717.60
S16 Casa de Piedra	1.90	0.70	8.10	41.50	186.30	306.20	331.80	333.00	408.10	214.90	55.10	4.60	1892.20
S17 Apopa Insinca	2.80	3.30	10.40	50.90	185.10	262.10	294.10	321.10	310.10	197.20	39.50	7.50	1684.10
S27 Estación Matriz	2.70	0.90	7.90	35.60	140.70	293.70	316.50	322.30	345.20	218.80	43.90	9.00	1737.20
L04 San Andrés	3.80	4.10	12.20	60.60	173.80	272.10	311.90	310.60	293.50	179.40	35.30	9.30	1666.60
L27 Chiltiupán	0.60	1.50	7.20	57.00	225.20	350.30	402.50	318.60	457.50	508.30	44.10	2.20	2375.00

Adicionalmente, se utilizaron datos de evapotranspiración real (ETO) y precipitación diaria de cuatro estaciones de referencia de la página del Global Weather Generator for SWAT (<https://globalweather.tamu.edu/>).

Cálculo de la Evapotranspiración potencial (PET)

Este se realizó de la misma manera ya descrita para el cálculo de la precipitación, con la diferencia de que los datos sobre evaporación potencial solamente son registrados por cuatro estaciones en la región de interés. La siguiente tabla resume los valores mensuales promedio para estas estaciones.

Tabla 3. Promedios mensuales de evapotranspiración potencial por estación meteorológica entre 1965 y 2012.

MES/ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL AÑO
ETP S-10 ILOPANGO	114,82	119,47	144,65	141,97	134,59	122,33	129,63	129,01	115,82	111,82	103,05	106,59	1,473.75 mm
ETP B-10 CERRÓN GRANDE	131,61	140,99	170,11	168,37	153,12	139,66	144,02	139,98	126,18	124,22	118,11	121,76	1,678.14 mm
ETP L-04 SAN ANDRES	124,49	132,09	161,42	160,45	149,25	132,32	138,37	137,37	123,05	120,20	112,44	115,82	1,607.28 mm
ETP L-27 CHILTIUPAN	119,14	123,30	150,88	146,31	139,51	130,09	139,53	133,22	118,78	114,06	111,75	113,58	1,540.14 mm
													TOTAL:
													6,299.31 mm

Cálculo de los Coeficientes de evapotranspiración (K_c)

El Coeficiente de evapotranspiración correspondiente a cada pixel, de acuerdo a su cobertura, para cada mes del año, fue calculado a partir de los valores de Evapotranspiración real (ET), obtenidos de los rasters generados a partir de imágenes satelitales MODIS¹ (periodo 2010 – 2020) y los valores de Evapotranspiración potencial (PET), empleando la siguiente fórmula:

$$K_{ci} = ET_i / PET_i$$

Dónde: K_c : Coeficiente de Evapotranspiración PET : Evapotranspiración potencial
 ET : Evapotranspiración real i : Mes correspondiente

Cálculo de la recarga potencial o potencial de infiltración

La estimación de la recarga hídrica potencial se realizó mediante un balance hídrico de suelos, aplicando la metodología de Schosinsky (2006), la cual plantea que la recarga al acuífero se lleva a cabo si la cantidad de agua que se infiltra es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo (cantidad de agua que el suelo es capaz de retener antes de saturarse y permitir el libre drenaje) y, además, satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante es la que recarga al acuífero, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR$$

Dónde: R_p : recarga potencial mensual en mm/mes H_{Sf} : humedad del suelo al final del mes en mm
 P_i : precipitación infiltra mm/mes ETR : evapotranspiración real en mm/mes
 H_{Si} : humedad del suelo al inicio del mes en mm

Para el cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente se consideran factores tales como: la precipitación mensual, retención pluvial mensual en el follaje y el coeficiente de infiltración.

Para el cálculo de la retención mensual de lluvia por follaje se aplicaron los siguientes criterios:

Lluvias menores a 5 mm mensuales no generarán infiltración, ya que se considera que en un mes de lluvia al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (Schosinsky, 2006). Así, si la precipitación es menor o igual a 5 mm, entonces la retención es igual a la precipitación, expresado como una igualdad se tiene: $Ret = P$.

El método considera que la retención de la lluvia en follaje aproximadamente corresponde al 12% de la precipitación mensual; pudiendo alcanzar hasta un 20% en bosques muy densos, así para estos casos, se

¹ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>

aplica que si el producto de la precipitación (P) y el coeficiente de retención del follaje (Cfo) es mayor o igual a 5 mm/mes, el valor obtenido es igual a la retención pluvial (Ret). (Schosinsky, 2006)

El coeficiente de infiltración (Ci) es calculado como se indica en la siguiente ecuación:

$$Ci = Kp + Kv + Kfc$$

Dónde:

Kp : fracción que infiltra por efecto de la pendiente. (Tabla 4)

Kv : fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal. (Tabla 5)

Kfc : fracción que infiltra por textura del suelo.

Además, la metodología incorpora los coeficientes de pendientes y de cobertura vegetal que se muestran en las tablas 4 y 5, respectivamente.

Tabla 4. Componentes del coeficiente de la pendiente.

Pendiente		Kp
Muy plana	0.02% - 0.05%	0.30
Plana	0.3% - 0.4%	0.20
Algo plana	1% - 2%	0.15
Promedio	2% - 7%	0.10
Fuerte	Mayor de 7%	0.06

Tabla 5. Componentes del coeficiente de cobertura vegetal

Cobertura vegetal	Kv
Cobertura con zacate menos del 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más del 75%	0.21

El coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (Kfc), es uno de los factores más determinantes en la infiltración de la lluvia en el suelo, y está dado por la ecuación siguiente (Schosinsky, 2006):

$$Kfc = 0.267 \ln(fc) - 0.000154fc - 0.723$$

Dónde:

Kfc : coeficiente de infiltración

fc : Infiltración básica del suelo

Esta ecuación es válida para un valor de fc de entre 16 a 1,568 mm/día, para valores menores a 16 mm/día: $Kfc = 0.0148 fc / 16$, y para valores mayores a 1,568 mm/día: $kfc = 1$.

Aplicando esta metodología, se obtuvieron los valores de Recarga Potencial en cada polígono, que luego se rasterizaron.

Mapas ráster

De acuerdo a los objetivos definidos, la plataforma RIOS requiere de una serie de datos, en mapas de formato ráster, para poder efectuar las modelaciones (Vogl et al. 2015). La siguiente tabla resume los mapas generados, la fuente de información de la cual derivan y una breve descripción de los mismos.

Tabla 6. Resumen detallado de la información geográfica utilizada.

Dato requerido RIOS	Fuente de información	Descripción/Característica del dato
Usos y Coberturas del Suelo	Ráster de 10 x 10 m ² generado a partir de interpretación y clasificación de imágenes satelitales del sensor Sentinel 2 e imágenes de alta resolución de Google Earth, utilizando imágenes del año 2019. Elaboración propia.	Cobertura de la tierra según categorías de CORINE (<i>Coordination of Information on the Environment</i> , de la Unión Europea ²) Land Cover, adaptadas posteriormente a las categorías preestablecidas por la plataforma de RIOS. Adicionalmente, se agregaron las categorías: “Lava desnuda” y “Vegetación sobre lava”, y se separó la categoría de “Café” en “Café bajo sol” y “Café bajo sombra”. Esto debido a que todas estas categorías comprenden extensiones significativas dentro del área de estudio, así como características suígeneris que determinan el comportamiento particular de los parámetros evaluados.
DEM o MED	Imágenes ASTER ³	Modelo de elevación digital (DEM: <i>Digital Elevation Model</i>), generado a partir de imágenes satelitales ASTER ³ (<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection</i>), año 2000, resolución de 30 m.
Erosividad	Elaboración propia, con base en datos meteorológicos históricos	En el formato ráster, el dato del Erosividad (r) es el factor <i>R</i> de la ecuación RUSLE; un índice de erosión pluvial que representa la energía cinética de la lluvia. El cálculo del factor <i>R</i> se realizó usando el índice modificado de Fournier (Renard y Freimund, 1994). Este índice caracteriza la agresividad de la precipitación y se calcula con la ecuación: $IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P}$ Donde: IFM = índice de Fournier modificado en mm; <i>p_i</i> = precipitación del mes <i>i</i> en mm; <i>P</i> = precipitación total anual en mm Tamaño de celdas 90 m x 90 m. Proyección del dato: WGS 1984 UTM; Zona 16N; Unidades: MJ*mm/(ha*h*año)
Erodabilidad	Elaboración propia, con base en el modelo SWAT (<i>Soil & Water Assessment Tool</i> : https://swat.tamu.edu/)	En el formato ráster, el factor <i>K</i> determina la susceptibilidad del suelo ante la erosión hídrica. Su valor depende del contenido de materia orgánica, permeabilidad, estructura y textura del suelo. Es un insumo proporcionado por el modelo SWAT. Para el cálculo se utilizó información edáfica de las cuencas, proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). El índice para estimar el Factor <i>K</i> está dado por la fórmula del Grupo Tragsa (1998): $K = [10^{-4} * 2.71 * M^{1.14} * (12 - mo) + 4.20 (s-2) + 3.23$

² <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

³ ASTER Global Digital Elevation Model V003: http://earthdata.nasa.gov/GI621404274-LPDAAAC_ECS

Dato requerido RIOS	Fuente de información	Descripción/Característica del dato
		$(p-3)] / 100$; donde: K = factor de erodabilidad del suelo, expresado como $[t \cdot m^2 \cdot hr / ha \cdot J \cdot cm]$; MO = materia orgánica [%]; s = código de la estructura del suelo; p = código de permeabilidad; M = producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias o $(\%limo + \%arena) * (100 - \%arcilla)$ Tamaño de celdas de 90 m x 90 m. Proyección del dato: WGS 1984 UTM Zona 16N; Unidades: $ton \cdot ha \cdot h / (ha \cdot MJ \cdot mm)$
Profundidad del suelo	Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Levantamiento General de suelos de El Salvador, escala 1:50000	Capa ráster obtenida a partir de los mapas vectoriales del Levantamiento General de Suelos de El Salvador, impresos a escala 1:50000, del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Valores de profundidad del suelo definidos a partir de las propiedades físicas especificadas en cada serie de suelo, como la profundidad efectiva. Se trabajó con un pixel de 10 m x 10 m. Los límites coinciden con los bordes de las 12 microcuencas que comprenden la región hidrogeográfica de influencia del AMSS. El sistema de coordenadas fue definido en Proyección UTM Zona 16P y Datum WGS 1984; Unidades: mm.
Textura del suelo	Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Levantamiento General de suelos de El Salvador, escala 1:50000	Capa ráster obtenida a partir de los mapas vectoriales del Levantamiento General de Suelos de El Salvador, impresos a escala 1:50000, del Ministerio de Agricultura y Ganadería. El sistema de coordenadas fue definido en Proyección UTM Zona 16P y Datum WGS 1984.
Evapotranspiración potencial	Elaboración propia, a partir del registro histórico de estaciones meteorológicas en la región de estudio	El formato ráster indica la evapotranspiración generada por el modelo SWAT con el método de Hargreaves (método seleccionado por disponer solamente de datos de precipitación y temperatura). Tamaño de celdas de 90 m x 90 m. Proyección del dato WGS 1984 UTM Zona 16N; Unidades: mm.
Evapotranspiración real	Imágenes satelitales MODIS ⁴	Ráster de evapotranspiración real (ET) producido a partir de imágenes satelitales MODIS ⁵ , período 2010 – 2020. Resolución de 10 m x 10 m por pixel. Proyección del dato WGS 1984 UTM Zona 16N; Unidades: mm.
Precipitación del mes más lluvioso	Elaboración propia, con base en series históricas de 52 años de 10 estaciones climatológicas ubicadas en la zona de estudio.	Modelo de precipitación obtenido a partir de la interpolación de valores promedio de precipitación del mes de septiembre, de las 10 estaciones climatológicas correspondientes a la región hidrogeográfica de Influencia del AMSS. Obtenido aplicando el algoritmo <i>Multi Level B-Spline</i> Interpolación de SAGA GIS, habiéndose definido un pixel de 10 m x 10 m. El sistema de coordenadas fue definido en Proyección UTM Zona 16P y Datum WGS 1984; Unidades: msnm.

⁴ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>

Dato requerido RIOS	Fuente de información	Descripción/Característica del dato
		El formato ráster obtenido expresa el promedio de precipitación del mes más lluvioso. Tamaño de celdas de 10 m x 10 m. Proyección del dato WGS 1984 UTM Zona 16N; Unidades: mm.
Precipitación anual promedio	Elaboración propia, con base en series históricas de 52 años de 10 estaciones climatológicas ubicadas en la zona de estudio.	Modelo de precipitación obtenido a partir de la interpolación de valores promedio de precipitación de las 10 estaciones climatológicas ubicadas en la región hidrogeográfica de influencia del AMSS. Obtenido aplicando el algoritmo <i>Multi Level B-Spline</i> Interpolación de SAGA GIS, habiéndose definido un pixel de 10 m x 10 m. El sistema de coordenadas fue definido en Proyección UTM Zona 16N y Datum WGS 1984; Unidades: mm.
Cuencas y subcuencas hidrográficas	Elaboración propia, con base a la geomorfología analizada a partir del DEM.	Obtenido a partir de modelos hidrológicos del software GRASS-QGIS, a partir del DEM, con resolución de 10 m x 10 m. El sistema de coordenadas fue definido en Proyección UTM Zona 16P y Datum WGS 1984; Unidades: msnm.

Coeficientes biofísicos

Se utilizó la tabla de coeficientes biofísicos de RIOS (rios_default_lulc_coefficients.csv), *Natural Capital Project*, página 107 de la Guía de Uso Paso a Paso de RIOS (Vogl et al. 2015). Se trata de una tabla en formato csv (valores separados por comas – *comma separated values*) que contiene los valores de coeficientes biofísicos predeterminados por el programa (en base a mediciones y experiencias generales) para cada uno de los usos y coberturas del suelo usados por la plataforma. Adicionalmente, y con base en las experiencias del equipo consultor y por comparación con los valores asignados por la tabla para categorías con características y respuestas similares, se asignaron coeficientes a las cuatro categorías agregadas por el equipo al mapa de usos y coberturas del suelo: “Café bajo sol”, “Café bajo sombra”, “Lava desnuda” y “Vegetación sobre lava” (ver Tabla 7 y Sección I.I del Capítulo III).

Objetivos, Actividades y Transiciones

Parte fundamental del proceso para implementar la metodología es la definición de los objetivos específicos que con la implementación del Fondo se desea alcanzar, puesto que el análisis de priorización está diseñado para maximizar los resultados en función de tales objetivos. Los objetivos seleccionados se describen en la Sección I del presente capítulo.

De igual forma, es importante identificar las actividades generales que se planea implementar para cada uso o cobertura del suelo presente en el territorio, junto con una estimación de sus costos; información que el software ocupa para determinar el grado de inversión por uso/cobertura y los cambios que se puede esperar, en función de los objetivos antes definidos.

Las “Transiciones” se definen dentro de la metodología RIOS como los cambios deseados en el uso y la cobertura del paisaje, de acuerdo a los objetivos seleccionados, y que son propiciados por una o más de las acciones planificadas. Como tal, el usuario selecciona en la plataforma qué actividades conducen a qué transiciones, para que el programa pueda efectuar la asignación correspondiente y correr la modelación.

La siguiente tabla resume las Actividades y Transiciones consideradas para cada uso/cobertura del suelo en el caso de la región hidrogeográfica de influencia del AMSS.

Tabla 7. Actividades y Transiciones por uso/cobertura del suelo.

CATEGORIAS DE USO/COBERTURA DEL SUELO	Act. 1 - Conservación	Act. 2 - Restauración	Act. 3 - Mejores prácticas agrícolas y ganaderas	Act. 4 - Control de la expansión urbana	TRANSICIONES
Cultivos permanentes			X	X	• Cultivos permanentes con mejores prácticas • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Vegetación arbustiva	X	X		X	• Áreas protegidas/conservadas de vegetación arbustiva • Áreas de vegetación arbustiva en transición a bosques • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Café bajo sombra			X	X	• Cafetales bajo sombra con mejores prácticas agrícolas • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Café bajo sol			X	X	• Cafetales bajo sol en transición hacia cafetales bajo sombra • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Mezcla de vegetación y agricultura		X	X	X	• Mezcla de vegetación y agricultura con mejores prácticas • Mezcla de vegetación y agricultura transición a bosques • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Lava desnuda	X			X	• Áreas de lava desnuda protegidas/conservadas • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Maíz tropical (granos básicos)		X	X	X	• Maíz (granos básicos) transición a sistemas agroforestales • Maíz tropical (granos básicos) con mejores prácticas • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Pastos tropicales			X	X	• Pastos tropicales con mejores prácticas • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Mezcla de vegetación y pastos		X	X	X	• Mezcla de vegetación y pastos con mejores prácticas • Áreas en transición a sistemas agrosilvopastoriles • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Caña de Azúcar			X	X	• Caña de Azúcar con mejores prácticas • Áreas a resguardo de la expansión urbana

CATEGORIAS DE USO/COBERTURA DEL SUELO	Act. 1 - Conservación	Act. 2 - Restauración	Act. 3 - Mejores prácticas agrícolas y ganaderas	Act. 4 - Control de la expansión urbana	TRANSICIONES
Bosque tropical siempre-verde	X			X	• Áreas de bosque tropical protegidas/conservadas • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Urbano mixto (tejido urbano discontinuo)				X	• Áreas a resguardo de la expansión urbana
Cuerpos de agua / humedales	X				• Cuerpos de agua / humedales protegidos/conservados
Bosque tropical/subtropical mixto (bosque secundario)	X	X		X	• Áreas de bosque tropical/subtropical mixto regeneradas/transición a bosque maduro • Áreas de bosque protegidas/conservadas • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Vegetación sobre lava	X			X	• Áreas de vegetación sobre lava protegidas/conservadas • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Bosque montano/lluvioso tropical	X			X	• Áreas de bosque montano/lluvioso tropical protegidas • Áreas a resguardo de la expansión urbana
Suelo desnudo		X		X	• Áreas regeneradas/transición a vegetación arbustiva • Áreas a resguardo de la expansión urbana

3.3. Etapa 3: Procesamiento de datos usando RIOS

RIOS es una herramienta diseñada para asistir en la priorización de áreas geográficas de intervención, en función de lograr los mejores resultados según los objetivos deseados (la plataforma tiene la capacidad de analizar múltiples objetivos de manera simultánea), implementando el menú de acciones identificadas, dentro de un presupuesto asignado. RIOS también permite calcular los cambios que en un horizonte de tiempo pueden suscitarse, a raíz de las intervenciones a desarrollar; permitiendo así la comparación de escenarios según diferentes asignaciones presupuestarias y el escenario de No intervención (es decir, que podría esperarse si se deja que las cosas continúen de la misma manera como hasta la fecha). (Vogl et al. 2015)

Dentro de la plataforma RIOS, el procesamiento de los datos tiene lugar en dos módulos complementarios (previo a los cuales se requieren los insumos de información detallados en la Sección 3.2. Etapa 2: Preprocesamiento de datos): (a) el Asesor del Portafolio de Inversiones (*Investment Portfolio Adviser*) y (b) el Traductor del Portafolio (*Portfolio Translator*). El proceso (Figura 1 y subsecciones 3.3.1 y 3.3.2) produce dos

resultados principales: (i) un portafolio de inversión, que sirve como guía para saber en qué y dónde invertir, y (ii) un set de posibles escenarios de usos del suelo, derivados de la implementación del portafolio de inversión. Tales resultados pueden posteriormente ser utilizados como insumos para la plataforma de InVEST (ver Fig. 1 y Sección 3.4. Etapa 4: Procesamiento de datos usando InVEST) y estimar así el retorno, en función de los servicios ecosistémicos producidos, que se puede esperar de cada escenario. (Vogl *et al.* 2015)

3.3.1. Asesor del Portafolio de Inversiones

El proceso de análisis inicia con el Asesor del Portafolio de Inversiones. En este punto se agrega el mapa de usos y coberturas del suelo (en formato ráster), las tablas de coeficientes biofísicos y actividades consideradas para cada uso y cobertura presente (ambas tablas en formato csv), y se seleccionan los objetivos que se desea incluir. Adicionalmente, se introduce a la plataforma la información climática y geográfica (factores) recopilada, así como los mapas generados, de acuerdo a los requisitos específicos de cada uno de los objetivos seleccionado (3.2. Etapa 2: Preprocesamiento de datos). La contribución relativa (“peso”) de cada factor o parámetro (set de datos de cada variable) puede ser ajustada por el usuario, según los objetivos y características propias de cada proyecto/territorio particular. El usuario también puede ajustar los “pesos” o relevancia/importancia que cada una de las actividades planeadas puede tener para la consecución de cada objetivo deseado. A continuación, se debe/n seleccionar la/s actividad/es cuya implementación conduce a la ocurrencia de cada una de las Transiciones (cambios de uso o cobertura del suelo) deseadas. Adicionalmente, la plataforma ofrece la posibilidad de agregar polígonos de áreas en las cuales una o más actividades deben ser priorizadas o evitadas, según sea el caso. El último paso de este módulo es la asignación presupuestaria; aquí se introduce el costo unitario de las actividades planeadas y el usuario tiene la opción de destinar montos específicos por año y actividad, o bien introducir montos flotantes, que el programa sugerirá de qué manera invertir, con base en el costo unitario de las actividades planeadas y la efectividad en términos de propiciar las Transiciones deseadas y alcanzar así los objetivos trazados. (Vogl *et al.* 2015)

Los principales resultados de este primer módulo son: (i) un archivo de texto en formato HTML (*Hypertext Markup Language* / Lenguaje de marcado de hipertexto) con la distribución presupuestaria por actividades y años sugerida por el modelo; (ii) mapas para cada una de las actividades, mostrando todas las parcelas del territorio en donde tal actividad puede ser implementada, sorteada por orden de prioridad; y (iii) un mapa que contiene una combinación de las áreas prioritarias identificadas para todas y cada una de las actividades, en base a los presupuestos definidos por el usuario.

3.3.2. Traductor del Portafolio

El siguiente paso es la aplicación del módulo Traductor del Portafolio RIOS, que permite generar escenarios de qué cambios se pueden esperar en la cuenca, de acuerdo a las actividades planificadas, en un horizonte

de tiempo dado. Los resultados son espacialmente específicos (mapas en formato raster de pixel 10 x 10 m) y pueden ser utilizados como insumos de la metodología InVEST, para una estimación cuantitativa de los beneficios ambientales que pueden derivarse de tales cambios (ver Sección 3.4). (Vogl et al. 2015)

Lo primero que el usuario debe hacer es la vinculación de los resultados de la aplicación del primer módulo, el Asesor del Portafolio de Inversiones, con esta nueva etapa del proceso; lo que se logra seleccionando el mismo espacio de trabajo e indicando la ruta de los resultados previos en la casilla correspondiente. Una vez cargada la información del módulo previo, se debe indicar un número de años en el que se espera se den los cambios (este número no es usado por el programa para el cálculo de resultados; es sólo una referencia de planificación). Para el presente análisis se ha decidido utilizar un período de 5 años.

Simultáneamente, la plataforma habilita tres campos, correspondientes a *Protección*, *Restauración* y *Agricultura*. En el primero de estos campos, el usuario debe decidir qué uso del suelo con mayor probabilidad sustituirá a los hábitat naturales en caso de no estar estos protegidos, así como la porción de hábitat natural que probablemente se perderá (utilizando valores de entre 0 a 1) durante el periodo de tiempo considerado (para este caso, 5 años). En el campo de *Restauración* aparecen todos aquellos usos o coberturas para las cuales se asignó una actividad de restauración en el módulo *Asesor*, así como sus *Transiciones* correspondientes, también seleccionadas en el módulo anterior (Sección 3.3.1). Para cada uso/cobertura identificada se estimará una proporción que se espera sufra la *Transición* deseada durante el periodo de tiempo especificado como resultado de las *Actividades* a implementar. De forma similar, el campo *Agricultura* contiene los usos agropecuarios para los que se planificó la implementación de *Actividades* por parte del Fondo y sus *Transiciones* correspondientes, y nuevamente se debe estimar la proporción del área que se considera será transformada durante el periodo de tiempo especificado, como resultado de las *Actividades* a implementar.

Los resultados de este segundo módulo de la metodología RIOS corresponden a: (a) un mapa (en formato raster) que representa el “escenario de protección”, que combina los usos y coberturas actuales del suelo con los cambios esperados en las áreas sujetas a restauración y mejores prácticas agropecuarias, como resultado de la implementación de *Actividades* durante el periodo seleccionado de 5 años, y que considera que los hábitat naturales se conservan intactos por estar protegidos. (b) un segundo mapa (en formato raster) que representa el “escenario sin protección”, que, además de los cambios positivos esperados como consecuencia de las *Actividades* implementadas, muestra las pérdidas que pueden esperarse en los hábitat naturales de no ser protegidos (lo que después servirá de base para calcular las pérdidas de servicios ecosistémicos que pueden esperarse, aplicando la metodología InVEST). Adicionalmente, el módulo genera dos nuevas tablas de coeficientes (en formato csv): (a) una tabla de los coeficientes biofísicos utilizados por la modelación para los usos y coberturas originales del suelo, así como para sus *Transiciones*; y (b) una tabla con los coeficientes biofísicos utilizados por la modelación para las coberturas/hábitat naturales originales, así como para sus *Transiciones/degradaciones*, en un “escenario sin protección”.

3.4. Etapa 4: Procesamiento de datos usando InVEST

La metodología de Evaluación Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* – InVEST) es una herramienta práctica que permite mapear y evaluar los servicios ecosistémicos que se producen en un territorio dado (Sharp *et al.* 2018), y resulta por tanto un útil complemento a los escenarios de inversión modelados por medio de RIOS; permitiendo estimar el impacto de tales inversiones sobre la provisión de servicios ecosistémicos actuales y futuros.

Se decidió trabajar con un total de cinco diferentes escenarios de intervención, en cada uno de los cuales el tamaño de la intervención se duplica, con el objetivo de obtener una escala amplia de los resultados que con dichas intervenciones podrían esperarse, en lo referente a los objetivos identificados; particularmente en las variaciones del volumen anual de agua disponible para la infiltración. Estos cinco escenarios son: (a) intervención de 2,500 ha, (b) 5,000 ha, (c) 10,000 ha, (d) 25,000 ha y (e) 50,000 ha. Adicionalmente, se trabajo un escenario de línea base, que representa la situación actual y un escenario de no intervención, que representa la situación futura que podría esperarse si no se implementan las acciones recomendadas.

De entre los servicios ecosistémicos que la plataforma InVEST permite evaluar, se seleccionó la Producción anual de agua, como la variable de mayor interés para el presente estudio. A continuación, brevemente se describe la forma en que el software efectúa los cálculos.

Producción Anual de Agua:

Con base en los coeficientes de precipitación, infiltración y evapotranspiración previamente asignados para las diferentes coberturas y usos del suelo, InVEST calcula la contribución anual de agua de cada pixel individual, así como la contribución total anual de cada parte del paisaje y la traduce en términos de la cantidad y el valor promedio anual de la energía hidroeléctrica producida por los reservorios ubicados cuencas abajo. En tal caso, el modelo no considera las diferencias y/o interacciones entre el agua superficial y subterránea, pues considera que toda el agua producida por uno u otro medio alcanza los reservorios ubicados aguas abajo. Tampoco considera la estacionalidad de la producción de agua, puesto que una de las funciones de los reservorios es estabilizar la cantidad de agua disponible para la generación hidroeléctrica a lo largo de todo el año. Esta parte del modelo tiene tres componentes: producción de agua, consumo de agua y valoración de la energía hidroeléctrica. (Sharp *et al.* 2018)

De esta manera se obtuvieron mapas ráster y tablas csv del (i) flujo rápido o esorrentía, (ii) flujo lateral base, (iii) evapotranspiración real y (iv) cantidad de agua disponible para la infiltración/recarga hídrica, por unidad de área (pixel), por microcuenca y total, para cada uno de los cinco escenarios de intervención propuestos y el escenario de línea base.

4. RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL SELECCIONADA

El Área Metropolitana de San Salvador se localiza en la zona central del país y comprende una superficie de 589.91 Km², que es aproximadamente equivalente al 3% del territorio nacional. Está conformada por 14 municipios, doce de los cuales pertenecen al departamento de San Salvador y dos al departamento de la Libertad. De esta superficie, el área urbana corresponde a 175,28 Km² (Miranda y Santos, 2014).

A efectos del análisis y de su relación hidrográfica, se delimitaron las microcuencas que comparten la zona de recarga en el volcán de San Salvador. Bajo el enfoque político-administrativo, se añadieron tres municipios del departamento de La Libertad, que han experimentado un importante desarrollo urbano e industrial vinculado al AMSS en las últimas décadas: Colón, Quezaltepeque y San Juan Opico; ubicados al occidente del volcán de San Salvador. A los límites de las microcuencas antes mencionadas se le ha denominado la Región Hidrogeográfica de Influencia (RHI) del AMSS.

La RHI del AMSS está delimitada por el volcán de San Salvador (como eje central) y sus microcuencas asociadas (Tabla 8 y Figura 3), la cordillera del Bálsamo hacia el sur, el cerro San Jacinto hacia el este y el cerro Nejapa hacia el norte.

De acuerdo al relieve, el drenaje se orienta de forma radial, teniendo al volcán de San Salvador como foco. Las áreas en los límites geográficos tienen bajas pendientes y constituyen los valles o planicies existentes, en donde se observan mecanismos de transporte de sedimentos y depósitos, como consecuencia de grandes capacidades de erosión y velocidad de escurrimiento, que vienen desde la parte alta de la zona de interés; en tanto que en la parte más urbana las pendientes disminuyen. El relieve produce quebradas que escurren hacia los ríos Acelhuate, Las Cañas, San Antonio y Sucio, entre otros. Si bien todos estos son, finalmente, tributarios del Acelhuate y éste a su vez del Lempa. La cuenca del río Lempa es la cuenca más grande del país (cerca del 50 % del territorio nacional) y es compartida con Guatemala y Honduras.

Por razones de consistencia y compatibilidad, se decidió trabajar toda la información geográfica necesaria para desarrollar los modelos RIOS e InVEST a una resolución de 10 m x 10 m por pixel. Con respecto a la resolución temporal, se trabajó con datos del período desde 1965 hasta 2012, por ser éste el período de información meteorológica disponible, y con una predicción de 5 años (2020 – 2025), por ser un período suficientemente extenso como para poder evidenciar posibles cambios a efecto de las intervenciones propuestas, pero dentro del cual se puede también esperar que las dinámicas en cuanto al uso de la tierra y las tendencias socio-económicas observadas a lo largo de la última década se mantengan.

Tabla 8. Microcuencas que conforman la Región Hidrogeográfica de Influencia del AMSS.

Microcuenca	Área (km ²)
Río Acelhuate	128.61
Río Tomayate	100.17
Río Las Cañas	72.71
Río San Antonio	57.21
Río Colón	50.19
Río Flor Amarilla	16.87
Zanjón La Alcantarilla	11.71
Río Claro	23.87
Río Belén	16.06
Río Palonquillo	15.29
Río El Chorro	17.40
Zanjón Los Corozos	31.73
Cráter	2.20

Ubicación del área hidrogeográfica de influencia del AMSS

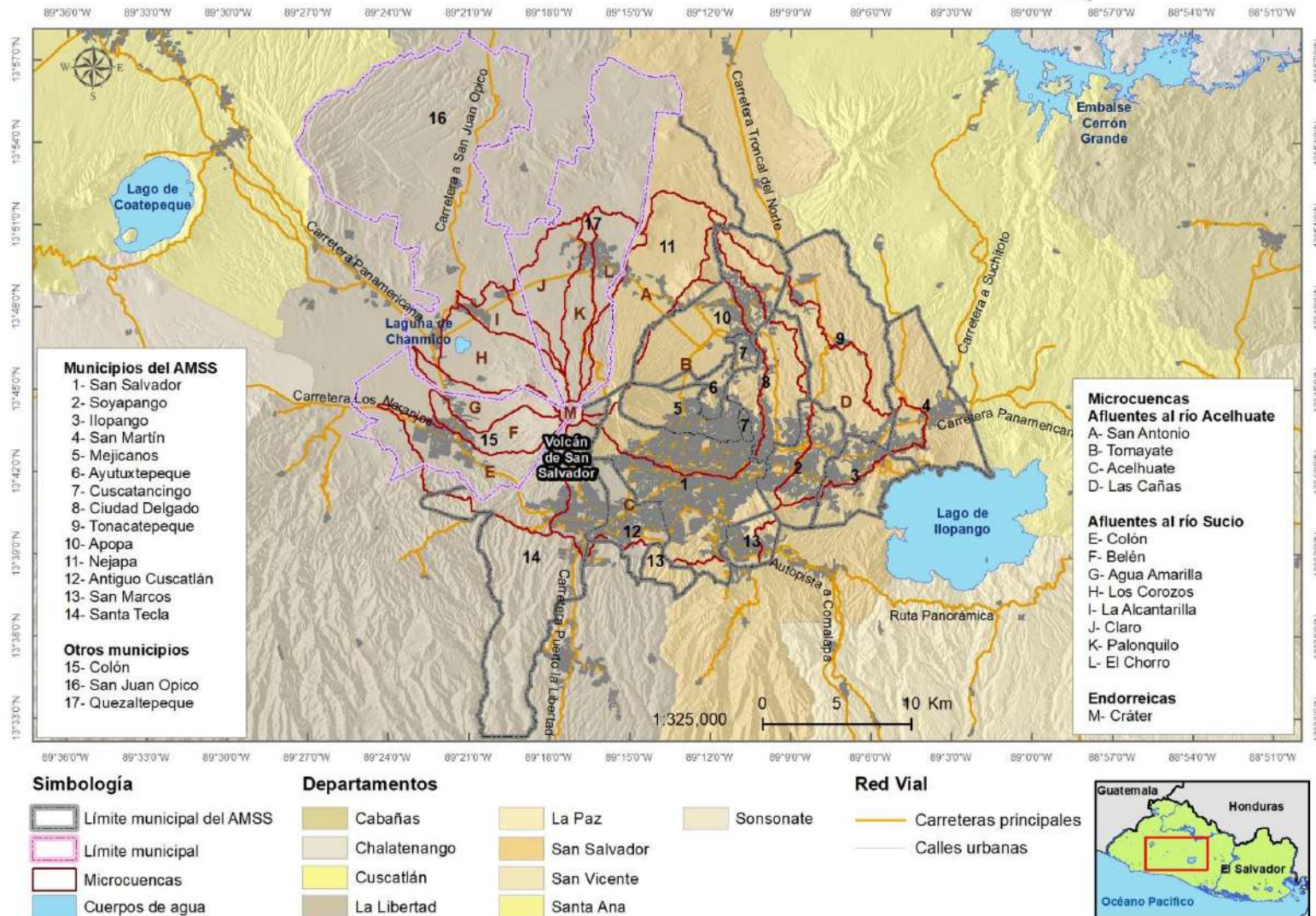


Figura 3. Límites de las microcuencas que conforman la Región Hidrogeográfica de Influencia (RHI) del AMSS.

5. DEFINICIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE PARÁMETROS A EVALUAR

En función de los objetivos definidos en la Sección II.I, se decidió basar el análisis de priorización de áreas de inversión en quince parámetros principales, por la estrecha relación que estos guardan con los objetivos que se persiguen, así como por la factibilidad de obtener datos. La Tabla 9 muestra la relación de estos parámetros con cada objetivo. Una breve descripción de cada uno de estos parámetros se ofrece en el Anexo I.

Tabla 9. Relación de los parámetros seleccionados con los objetivos perseguidos.

OBJETIVOS	PARÁMETROS														
	Topografía / Pendiente	Precipitación	Erosividad de la Lluvia	Erodabilidad del Suelo según Tipo	Profundidad del Suelo	Textura / Permeabilidad del Suelo	Cobertura / Uso del Suelo	Actividades Viables según Uso	Erodabilidad del Suelo según Uso	Escorrentía según Uso	Evapotranspiración Real	Susceptibilidad al Cambio de Uso del Suelo	Grado de Conservación / Deterioro de Ecosistemas Naturales	Presencia / Ausencia de Especies de Particular Interés para la Conservación (EPIC)	Nº de Beneficiarios
Identificar Áreas prioritarias dentro de la RHI-AMSS que, por sus características biofísicas, posean el mayor potencial para incrementar la infiltración profunda y, por tanto, la recarga de acuíferos subterráneos, a partir de la implementación de las intervenciones propuestas.															
Identificar y priorizar las áreas en que las intervenciones propuestas podrían ser implementadas y rendir los mejores resultados, así como las transiciones o transformaciones que, a raíz de las intervenciones a implementar, se suscitarían.															
Calcular la cantidad de servicios ecosistémicos, en especial la disponibilidad de agua para la infiltración profunda, a partir de las intervenciones propuestas y los escenarios de transición modelados.															

6. INDICADORES PROPUESTOS

a) Aumento de las áreas naturales protegidas (ANP) o de conservación en zonas de alto potencial de recarga acuífera.

El fondo del agua puede invertir en la conservación de áreas naturales existentes, compra de tierras, establecimiento de nuevas áreas naturales y/o servidumbres ecológicas, en áreas de alto potencial para recarga acuífera, para conservar o restaurar sus atributos naturales y de esa manera garantizar el manejo sostenible de los recursos hídricos.

Esto se vería reflejado en el incremento de la recarga hídrica subterránea, pero también en la mejora de la cobertura vegetal y la biodiversidad.

Debido a la complejidad que la medición directa del volumen real de agua infiltrada representa, y partiendo del supuesto básico que, en este caso, la conservación y restauración de las características originales de los ecosistemas naturales influyen directa y positivamente en la recarga de las aguas subterráneas, se propone como métricas de este indicador: el número de hectáreas de áreas naturales protegidas existentes que de forma efectiva resguardan los ecosistemas y procesos ecológicos propios, y el número de hectáreas de nuevas áreas naturales protegidas, tanto públicas como privadas. La medición necesaria implica una auditoría periódica (anual) del estado de la estructura natural de tales ecosistemas naturales.

b) Aumento del área agropecuaria bajo mejor manejo.

La mayor parte del área de recarga de la Región Hidrogeográfica de Influencia del AMSS corresponde a diversos usos agropecuarios, principalmente cultivos de café, sistemas mixtos de cultivos, vegetación y pastos, y caña de azúcar. La construcción de estructuras para captar agua lluvia y facilitar su infiltración, así como la implementación de mejores prácticas agropecuarias, tendrá un efecto positivo directo sobre la cantidad de agua que se infiltra y la calidad de la misma, así como sobre el agua de escorrentía, cuyo volumen se reducirá.

De manera similar al indicador de ANP, existe aquí el supuesto básico de que la implementación de mejores prácticas agropecuarias – particularmente el aumento de la cobertura arbórea y herbácea, las medidas para reducir la escorrentía y erosión (barreras, curvas, etc.) y aumentar la infiltración (zanjas y otras), la erradicación de quemas, el buen manejo de los rastrojos y el control de agroquímicos – tendrá una repercusión directa y positiva en el volumen y calidad del agua disponible para la infiltración. En tal sentido, se propone como métrica para este indicador: el número de hectáreas de paisajes productivos o agroecosistemas que implementan mejores prácticas agropecuarias. Y, de igual forma que para el caso de las ANP, también se hace necesario aquí contar con un sistema de auditoría periódica (anual o bianual) que verifique la implementación y mantenimiento de tales prácticas.

c) Volumen de agua lluvia captada y utilizada.

Con el fondo del agua se incentivará la captación y aprovechamiento del agua lluvia para diferentes usos, como: consumo humano, producción agrícola o industrial, entre otros. El agua puede ser directamente captada de los techos de las viviendas o naves industriales o comerciales; así como también del agua de escorrentía superficial. De esta manera se estaría reduciendo la extracción de agua subterránea (disminuye el consumo de energía eléctrica, la conducción, el tratamiento, etc.) y reduciendo la escorrentía superficial y la descarga hacia las quebradas.

La métrica para este indicador es simple y puede medirse de forma directa como capacidad instalada de captación de agua lluvia y volumen de agua utilizado.

d) Volumen de agua lluvia o tratada infiltrada artificialmente para mejorar la recarga.

Con la implementación del fondo del agua se pretende desarrollar acciones relacionadas con la recarga artificial de acuíferos o infiltración artificial. Esto se puede hacer a través de la captación del agua lluvia de los techos de las edificaciones o captación del agua de escorrentía superficial y, luego de un pretratamiento, conducirla a pozos o lagunas de infiltración.

De igual manera, se pueden aprovechar las aguas servidas (aguas negras y grises) ya tratadas (si cumplen con los índices de calidad apropiados) para crear lagunas de infiltración y de esa manera mejorar la recarga acuífera y reducir la escorrentía superficial.

La métrica para este indicador es el volumen de agua disponible para la infiltración = volumen de agua captada - evaporación.

e) Reducción del volumen de agua lluvia en escorrentía superficial.

La combinación de las acciones antes propuestas – mantenimiento y aumento de las áreas de conservación con alto potencial de recarga, implementación a gran escala de mejores prácticas agropecuarias, captación y utilización de agua lluvia e infiltración asistida de aguas lluvias y tratadas – reducirá el volumen de agua lluvia que se convierte en escorrentía superficial, aumentando así el agua disponible para evapotranspiración, flujo lateral o sub-superficial e infiltración profunda o recarga de acuíferos subterráneos.

Casos como el de la metodología LimnoTech, utilizan el cambio en el volumen de la escorrentía como indicador de la recarga hídrica; ya que: 1) la escorrentía sirve como indicador tanto de las mejoras hidrológicas (por ejemplo, flujo base mejorado) como para la reducción de la erosión, y 2) las predicciones de escorrentía son más ciertas que las predicciones de cambios en el flujo base, particularmente para extensiones de tierra relativamente pequeñas. Se utilizará en este caso el método de Escurrimiento de Número de Curva implementado en el modelo de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT) (Neitsch et al., 2005), para estimar la disminución de la escorrentía debido a la implementación de las intervenciones previstas. Los valores de los Números de Curva serán obtenidos por medición directa, instalando canaletas de recolección de la escorrentía en el límite inferior de parcelas muestrales in situ.

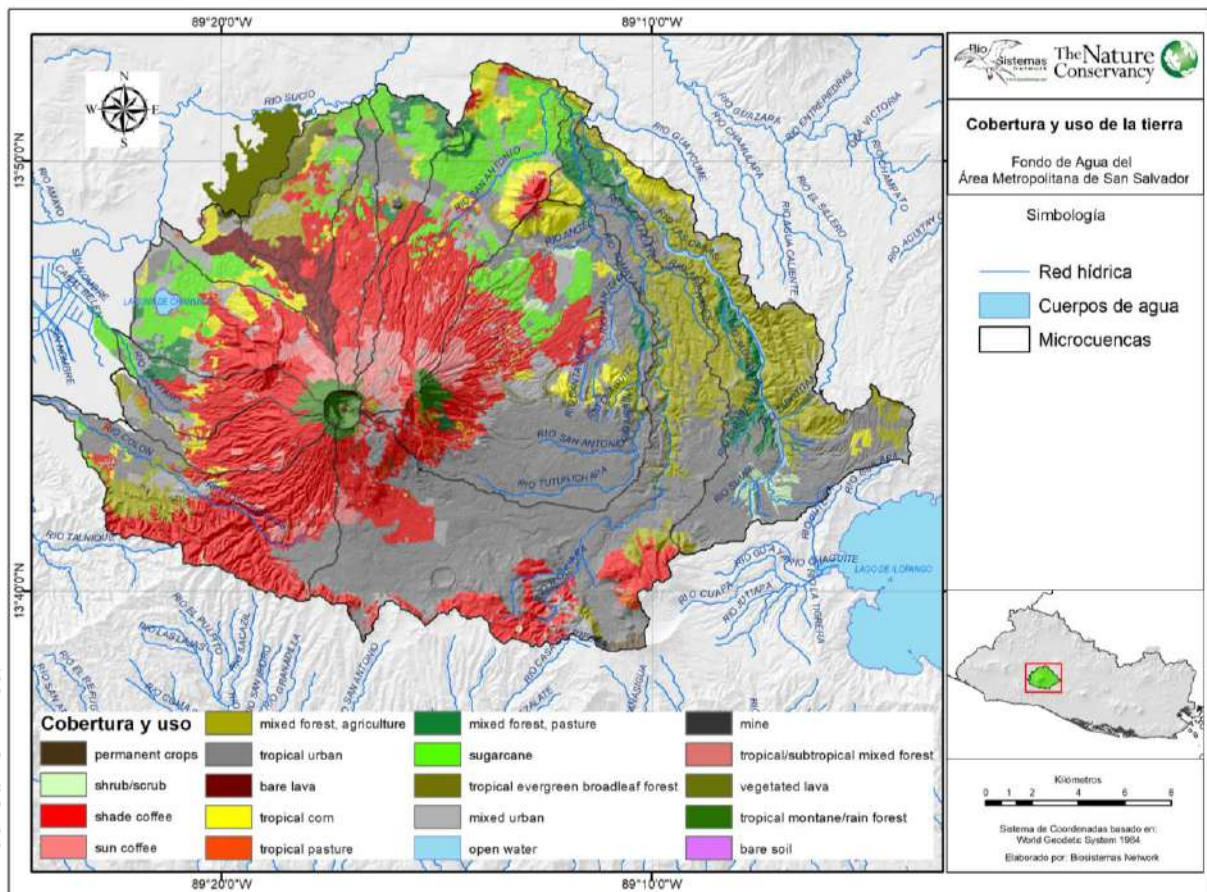
III

RESULTADOS

I. MAPA DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO

Como se señaló en la Sección 3.1.1. Recolección de información existente, a partir de la comparación de los mapas de usos y coberturas del suelo existentes para la RHI_ AMSS con imágenes satelitales recientes y observaciones en campo, resultó evidente que tales mapas tienen un margen de error demasiado grande como para poder ser utilizados en cualquier tipo de análisis a la escala del presente estudio. A partir de allí, se tomó la decisión de generar un mapa propio de usos y coberturas del suelo; lo que se hizo a partir de un proceso de clasificación supervisada, utilizando la nomenclatura del sistema CORINE Land Cover (Coordination of Information on the Environment, de la Unión Europea. Que es el sistema de clasificación oficial en El Salvador) y la plataforma QGIS 10.3, a partir de imágenes satelitales SENTINEL II de noviembre 2019. El mapa resultante exhibía el mismo tipo de discrepancias con la realidad ya observado en los mapas existentes, por lo que fue necesario un exhaustivo proceso de rectificación, utilizando las imágenes más recientes disponibles en la plataforma de Google Earth Pro, dentro del programa QGIS 10.3.

Figura 4. Mapa de usos y coberturas del suelo en la Región Hidrográfica de Influencia del AMSS.



El mapa final (Fig. 4) se apeg a de manera notable a la realidad territorial actual, particularmente en la zona de recarga del volcán de San Salvador, que se ha propuesto como la zona prioritaria inicial de intervención del Fondo.

I.1. Categorías de Uso y Cobertura del Suelo

Como antes se mencionó, el sistema de *CORINE Land Cover* fue utilizado inicialmente para nombrar las categorías de usos y coberturas del suelo. Posteriormente, tales categorías fueron sustituidas por las empleadas por el sistema RIOS, según la correspondencia que se muestra en la Tabla 10. Adicionalmente, se agregaron cuatro nuevas categorías: (i) Café bajo sol y (ii) Café bajo sombra (resultantes de la subdivisión de la categoría “Café” predeterminada en la plataforma RIOS), (iii) Lava desnuda y (iv) Vegetación sobre lava; puesto que resultan de gran relevancia para el caso del AMSS.

I.2. Composición del Paisaje

Después de realizados los procesos y ajustes antes descritos, el mapa de usos y coberturas actuales del suelo (Fig. 4) muestra que la RHI_AMSS corresponde a un paisaje variado, integrado por 18 diferentes categorías de uso/cobertura del suelo (Tabla 10), representadas en su mayoría por parches (extensiones de terreno continuas de una misma categoría) de pequeño a mediano tamaño (de menos de 1 ha a 100 ha) inmersos dentro de una matriz (uso o cobertura dominante) de tejido tropical urbano continuo en su porción este (que aproximadamente corresponde al 29% del área de interés) y de café (principalmente bajo sombra) en su porción oeste, que aproximadamente comprende el 28% del área.

El área total correspondiente a cada tipo de cobertura/uso del suelo, así como el número de parches que la componen y el tamaño máximo, mínimo y promedio de los mismos, se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 10. Categorías de usos y coberturas del suelo y composición del paisaje de la RHGI_AMSS.

Nº	Categorías Usadas en RIOS	Categorías CORINE Landcover	Nº de Parches	ÁREA (en hectáreas - ha)			
				Parche Menor	Parche Mayor	Promedio	TOTAL
1.	Tejido urbano tropical	Tejido urbano continuo	28	<1 ha	13,682 ha	571.79 ha	16,010 ha
2.	Café bajo sombra*	Café	40	<1 ha	11,748 ha	347.78 ha	13,911 ha
3.	Mezcla de bosque y agricultura	Mezcla de bosques y agricultura	50	<1 ha	2,311 ha	132.62 ha	6,631 ha
4.	Tejido urbano mixto	Tejido urbano discontinuo	354	<1 ha	230 ha	11.64 ha	4,121 ha
5.	Caña de azúcar	Caña de azúcar	69	<1 ha	776 ha	59.71 ha	4,120 ha
6.	Maíz tropical	Granos básicos	209	<1 ha	623 ha	13.25 ha	2,770 ha
7.	Mezcla de bosque y pasto	Mezcla de pastos y agricultura	31	<1 ha	526 ha	60.48 ha	1,875 ha
8.	Café bajo sol*	Café	26	<1 a	812 ha	63.19 ha	1,643 ha
9.	Vegetación sobre lava*	Vegetación arbustiva baja	1	1,141 ha	1,141 ha	1,141.00 ha	1,141 ha
10.	Lava desnuda	Roquedas, lavas	9	<1 ha	931 ha	105.89 ha	953 ha
11.	Bosque lluvioso o montano tropical	Bosques siempre verdes	2	172 ha	503 ha	337.50 ha	675 ha
12.	Vegetación arbustiva	Vegetación arbustiva baja	53	<1 ha	256 ha	8.45 ha	448 ha
13.	Cuerpos de agua	Ríos / Lagos, lagunas y lagunetas	2	78 ha	210 ha	144.00 ha	288 ha
14.	Pastos tropicales	Pastos naturales / Pastos cultivados	53	<1 ha	58 ha	3.60 ha	201 ha
15.	Bosque mixto tropical o subtropical	Bosques mixtos semicaducifolios	25	<1 ha	36 ha	8.00 ha	200 ha
16.	Cultivos permanentes	Cultivos permanentes	15	<1 ha	90 ha	8.93 ha	134 ha
17.	Bosque tropical siempre verde latifoliado	Bosques de galería	14	1 ha	24 ha	7.29 ha	102 ha
18.	Minas	Zonas de extracción minera	2	3 ha	17 ha	10.00 ha	20 ha
TOTAL :							55,243 ha
	* Categorías agregadas						

2. COEFICIENTES DE LOS PARÁMETROS A EVALUAR POR CATEGORÍA DE USO Y COBERTURA DEL SUELO

Se revisaron y, cuando se consideró necesario, ajustaron los valores de los coeficientes biofísicos preestablecidos por la plataforma RIOS para cada uso/coertura presente en el área de estudio, para reflejar de mejor manera las características locales. También se asignaron valores a los coeficientes biofísicos correspondientes a las cuatro nuevas categorías consideradas, a partir de un análisis comparativo razonado con los coeficientes conocidos de coberturas/ usos similares, así como la experiencia y conocimientos de los especialistas del equipo consultor. La tabla siguiente resume los coeficientes ajustados, que fueron utilizados para la modelación.

Tabla 11. Categorías de usos y coberturas del suelo y composición del paisaje de la RHGI_AMSS.

CATEGORÍAS	COEFICIENTES													
	native_veg	sed_exp	sed_ret	rough_rank	cover_rank	usle_c	usle_p	root_depth	Kc	LULC_veg	N_exp	N_ret	P_exp	P_ret
permanent crops	0	0,19	0,84	0,163	0,814	0,19	1	1400	1,05	1	0	0	0	0
shrub/scrub	1	0,5	0,505	0,069	0,357	0,5	1	3120	0,43	1	0	0	0	0
Shade coffee	0	0,11	0,84	0,17	0,814	0,05	1	2000	0,95	1	0	0	0	0
Sun coffee	0	0,2	0,75	0,14	0,764	0,16	1	1500	1,073	1	0	0	0	0
mixed forest - agriculture	0	0,097	0,795	0,457	0,764	0,097	1	2095	1,073	1	0	0	0	0
tropical urban	0	0,1	0,2	0,014	0,029	0,1	1	1000	0,45	0	0	0	0	0
Bare Lava	1	0,1	0,84	0,66	0,114	0,001	1	1	0,175	0	0	0	0	0
tropical corn	0	0,08	0,84	0,163	0,814	0,08	1	1450	1,175	1	0	0	0	0
tropical pasture	0	0,14	0,84	0,5	1	0,14	1	1500	0,9	1	0	0	0	0
mixed forest- pasture	0	0,072	0,795	0,625	0,857	0,072	1	2089	0,95	1	0	0	0	0
sugarcane	0	0,24	0,84	0,163	0,814	0,24	1	2000	1,25	1	0	0	0	0
tropical evergreen forest	1	0,003	0,75	0,75	0,714	0,003	1	4380	1	1	0	0	0	0
mixed urban	0	0,1	0,2	0,15	0,143	0,1	1	1500	0,51	1	0	0	0	0
open water - wetlands	1	0,04	0,2	0,0001	0	0,04	1	1	1	1	0	0	0	0
mine	0	1	0,26	0,013	0,114	1	1	100	0,175	0	0	0	0	0
tropical/subtropical mixed forest	1	0,003	0,75	0,75	0,714	0,003	1	3300	1	1	0	0	0	0
Vegetated Lava	1	0,05	0,9	0,75	0,357	0,001	1	250	0,43	1	0	0	0	0
tropical montane/rain forest	1	0,003	0,75	0,75	0,714	0,003	1	4380	1	1	0	0	0	0
bare soil	0	1	0,26	0,013	0,114	1	1	100	0,175	0	0	0	0	0
mixed forest - agriculture - pasture	0	0,111	0,81	0,471	0,843	0,111	1	1896	1,03	1	0	0	0	0
riparian grassland	1	0,003	0,94	0,75	1	0,003	1	1560	1,2	1	0	0	0	0
tropical deciduous forest	1	0,003	0,75	0,5	0,714	0,003	1	2220	1	1	0	0	0	0
tropical grassland	1	0,003	0,83	0,163	0,357	0,003	1	9000	0,56	1	0	0	0	0
tropical mixed agriculture	0	0,19	0,84	0,163	0,814	0,19	1	1550	1,1	1	0	0	0	0
NODATA - roads (paved)	0	0,5	0,13	0,001	0	0,5	1	1	0,175	0	0	0	0	0

3. PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS

Utilizando los procedimientos descritos en la Sección 3.2. Etapa 2: Preprocesamiento de datos, de este documento, se obtuvieron los datos intermedios necesarios para correr las modelaciones correspondientes a los objetivos deseados, en la plataforma RIOS. Los cuales, además del Mapa de Usos y Coberturas del Suelo visto en detalle en las secciones precedentes, incluyen los siguientes:

- i. Precipitación: Tabla 12, Figura 5.
- ii. Erosividad (precipitación del mes más lluvioso: Figura 6.
- iii. Recarga potencial o potencial de infiltración: Tabla 12, Figura 8.
- iv. Evapotranspiración Figura 7.
- v. Modelo de elevación digital: Figura 9.
- vi. Pendientes: Figura 10.
- vii. Captación de agua por pixel: Figura 11.
- viii. Conducción de agua por pixel: Figura 12.
- ix. Tipos de suelos: Figura 13.
- x. Profundidad del suelo: Figura 14.
- xi. Texturas del suelo: Figura 15.
- xii. Índice de texturas de los suelos: Figura 16.
- xiii. Erodabilidad: Figura 17.
- xiv. Beneficiarios: Figura 18.

Tabla 12. Precipitación y recarga potencial en la RHGI_AMSS.

Microcuenca	Área_Km ²	Precipitación Media_mm	Volumen_m ³ /año	Recarga Hídrica Media (mm/año)	Recarga Hídrica (m ³ /año)
Zanjón La Alcantarilla	11.71	1,743	20,417,914	555.24	71,409,845
Río Acelhuate	128.61	1,778	228,733,210	590.75	59,175,223
Río Tomayate	100.17	1,794	179,690,940	419.64	30,512,111
Río San Antonio	57.21	1,794	102,613,889	565.79	32,369,128
Río Colón	50.19	1,819	91,291,210	545.86	27,396,463
Río Las Cañas	72.71	1,666	121,106,369	613.79	10,354,600
Río de Palonquilo	15.29	1,828	27,953,313	748.26	8,762,082
Río Flor Amarilla	16.87	1,748	29,487,508	719.45	17,173,307
Río El Chorro	17.40	1,747	30,382,561	722.55	11,604,185
Río Belén	16.06	1,768	28,397,728	706.12	10,796,572
Río Claro	23.87	1,739	41,512,708	513.09	8,927,699
Zanjón Los Corozos	31.73	1,770	56,169,879	691.52	21,941,892
Cráter	2.16	2,069	4,479,090	907.84	1,965,023
TOTALES:	543.99		962,236,317		312,388,128

Figura 5. Mapa de distribución de la precipitación anual promedio, RHGI_AMSS.

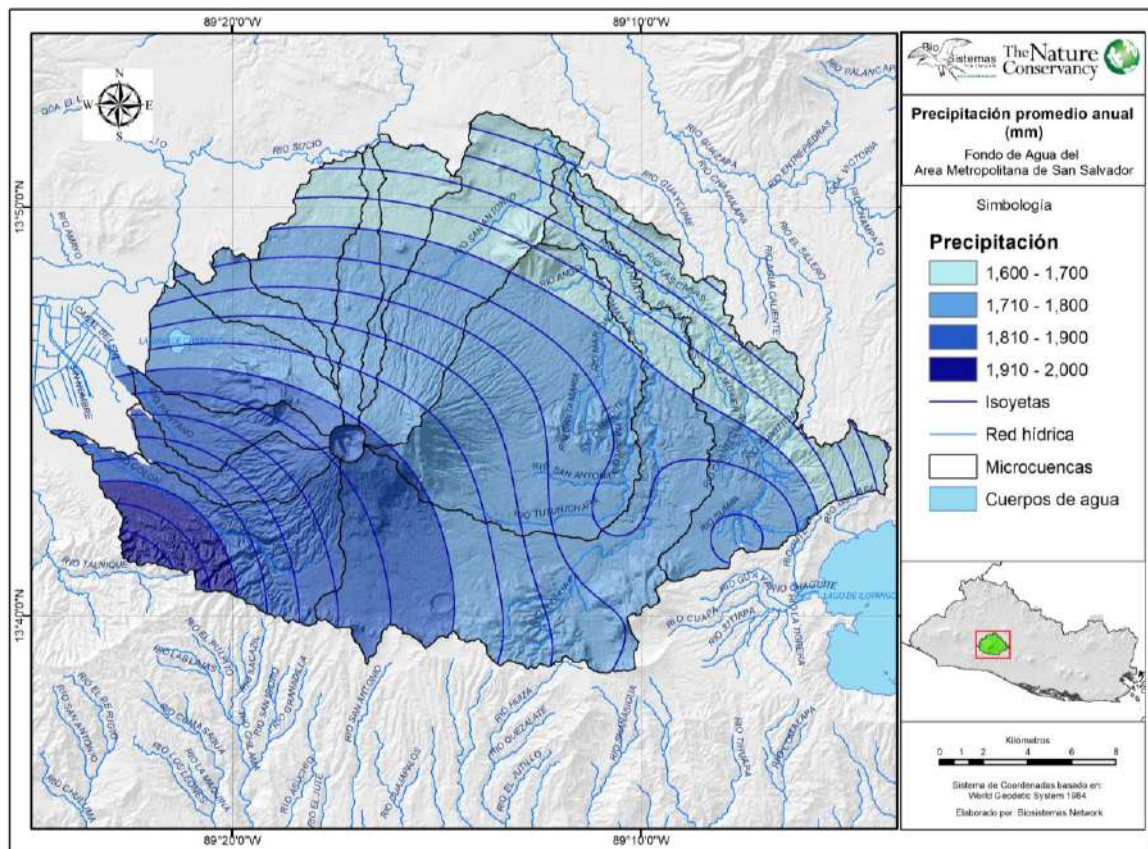


Figura 6. Mapa de distribución de la precipitación del mes más lluvioso / erosividad, RHGI_AMSS.

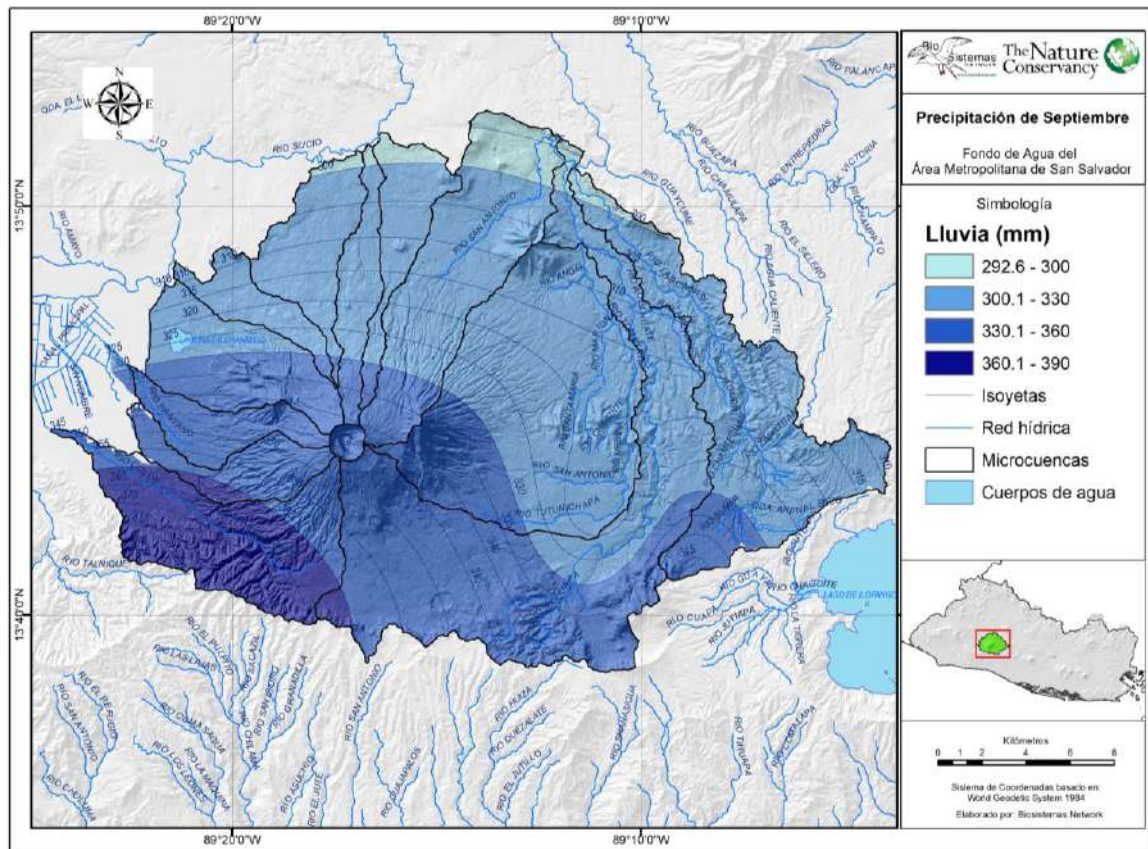


Figura 7. Mapa de evapotranspiración potencial de la RHGI_AMSS.

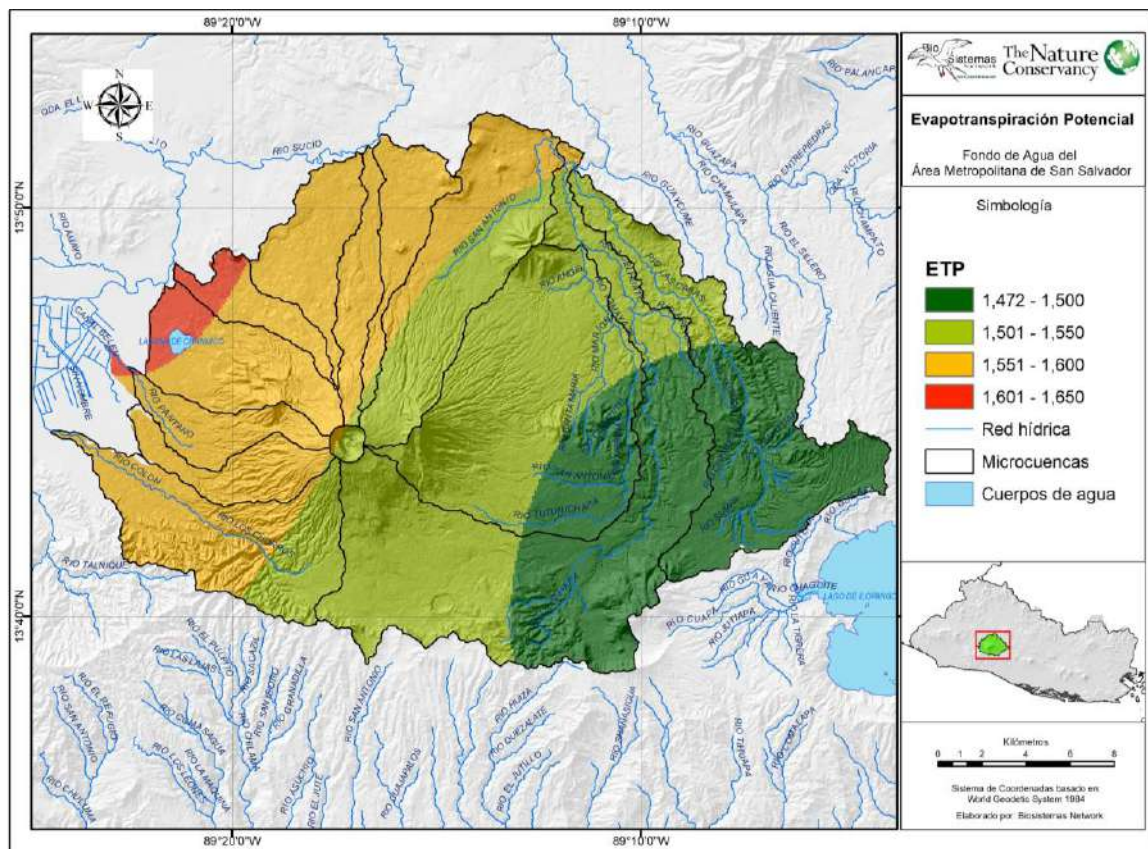


Figura 8. Mapa de recarga acuífera potencial dentro de la RHGI_AMSS.

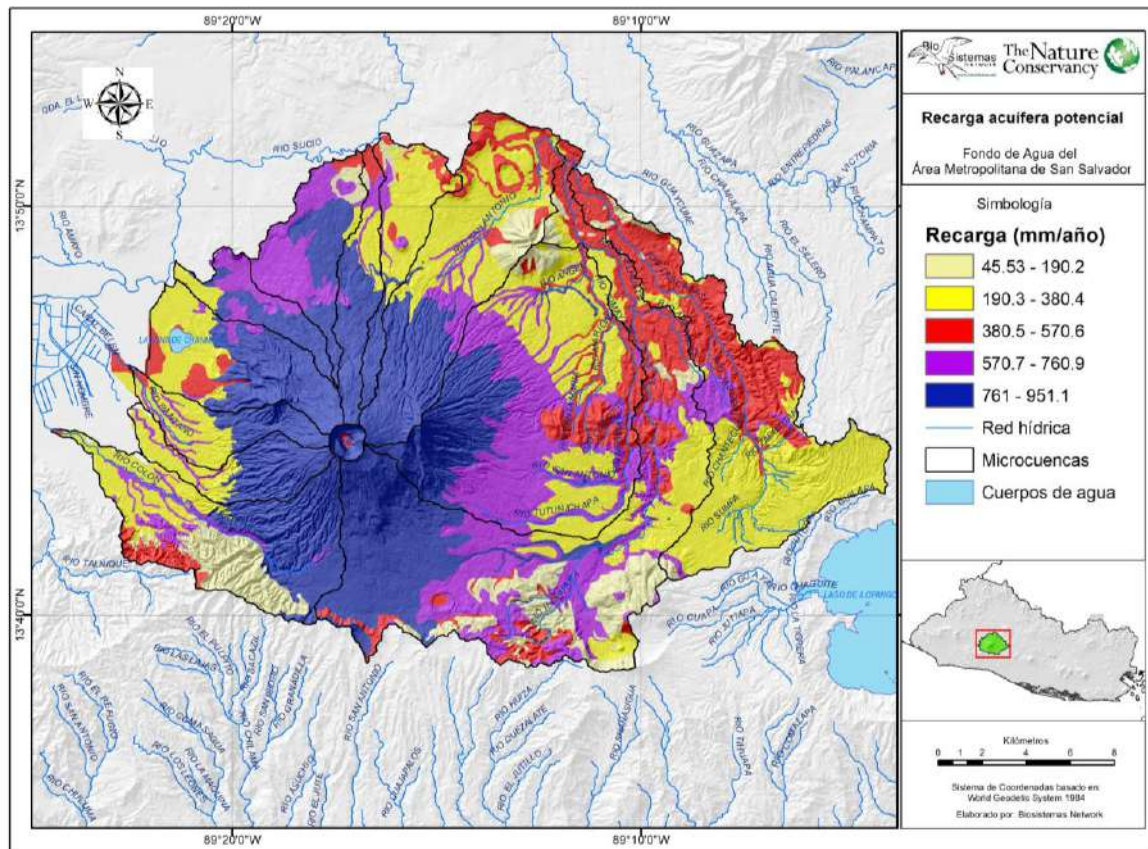


Figura 9. Modelo de elevación digital (DEM: Digital Elevation Model) de la RHGI_AMSS.

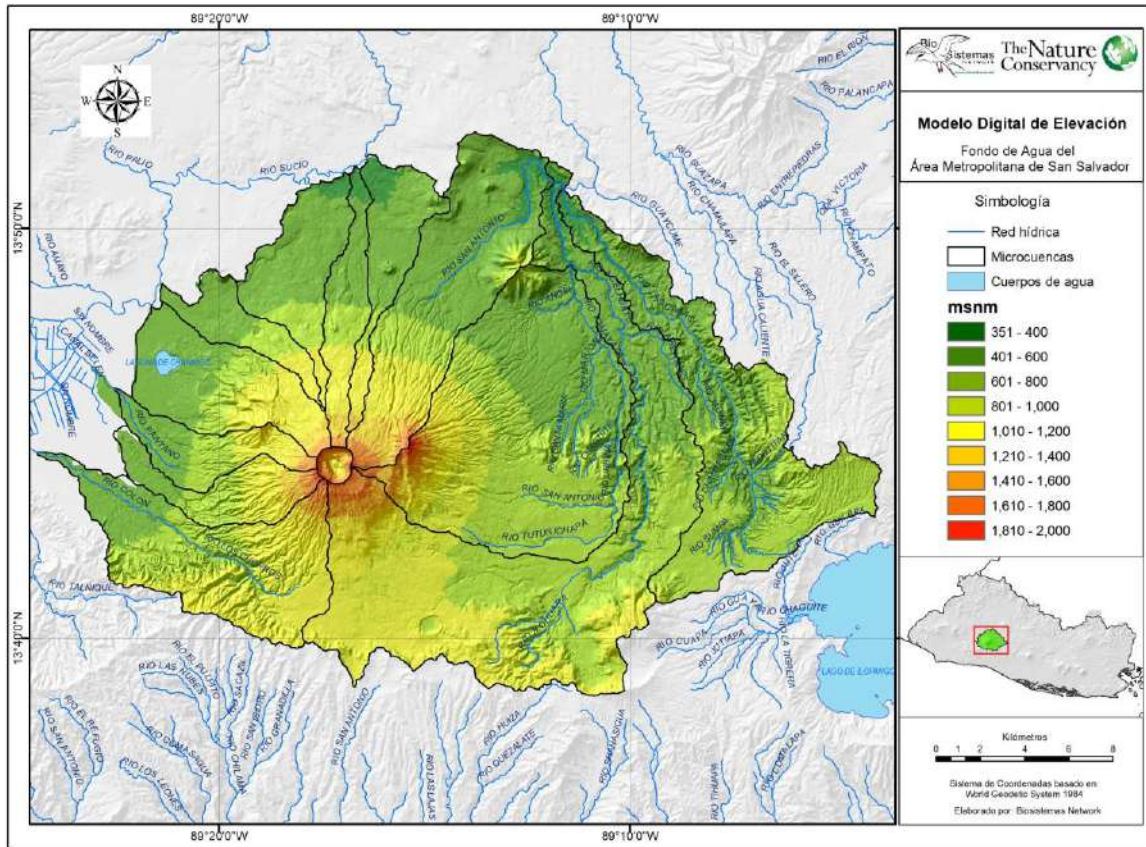


Figura 10. Mapa de pendientes de la RHGI_AMSS.

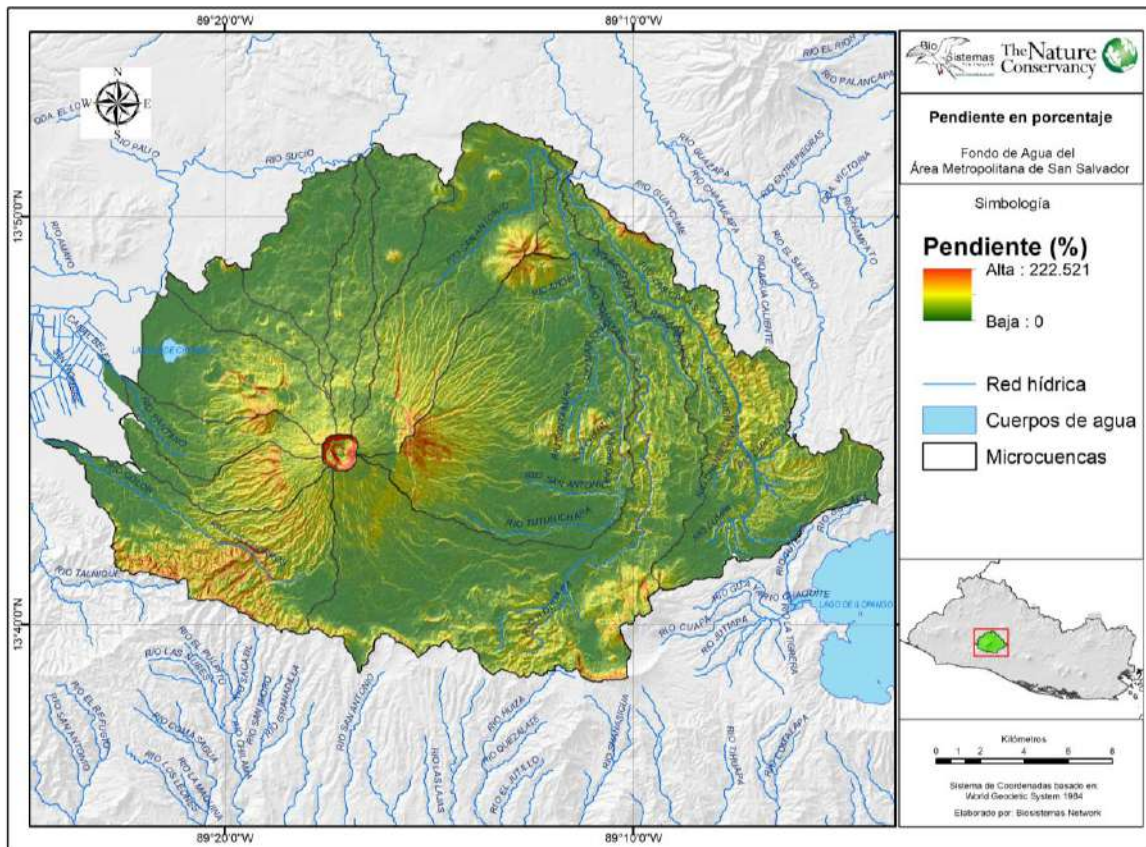


Figura 11. Mapa de captación de agua por pixel en la RHGI_AMSS.

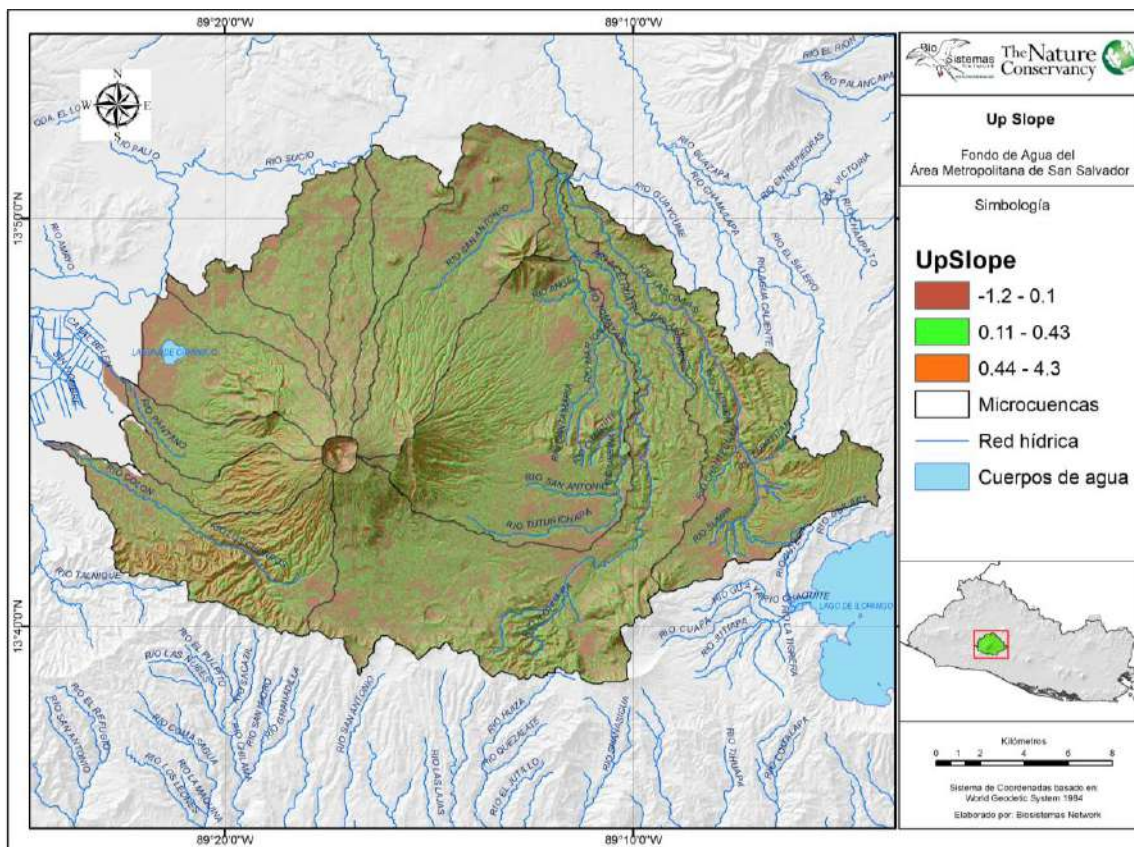


Figura 12. Mapa de conducción de agua por pixel en la RHGI_AMSS.

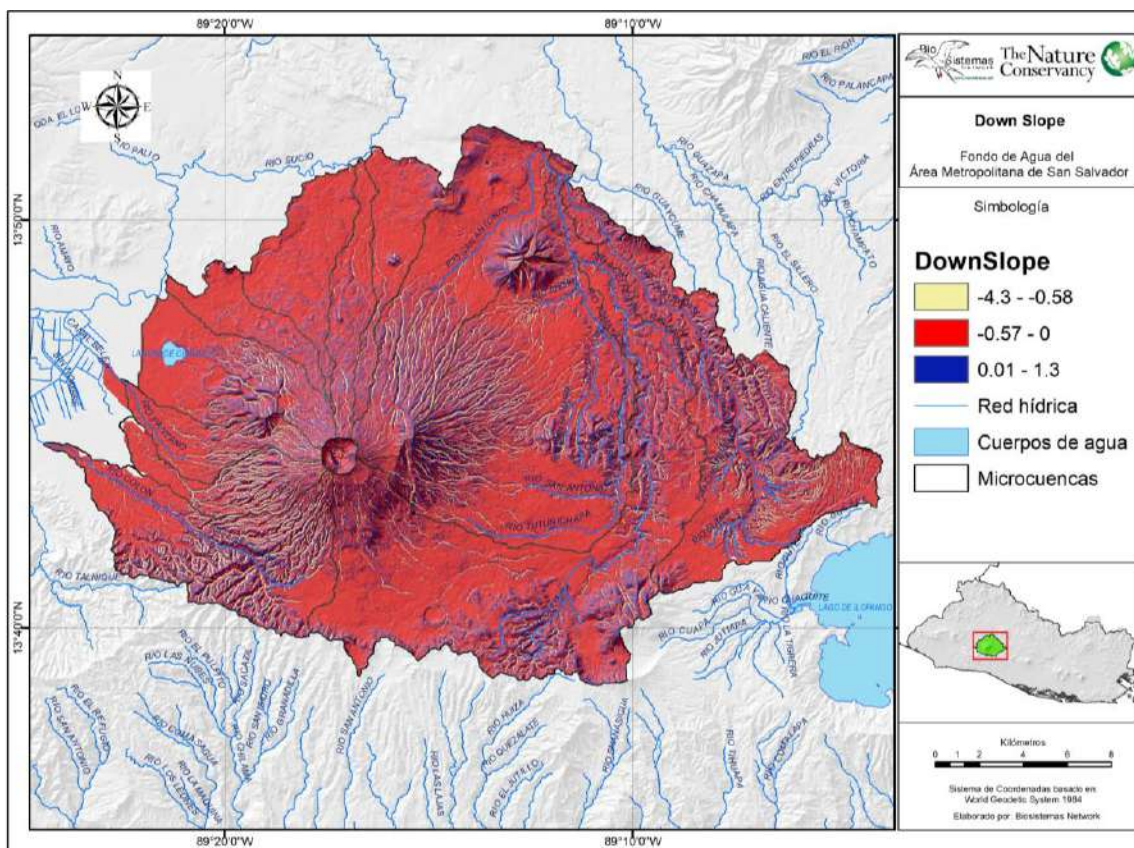


Figura 13. Mapa de tipos de suelos dentro de la RHGI_AMSS.

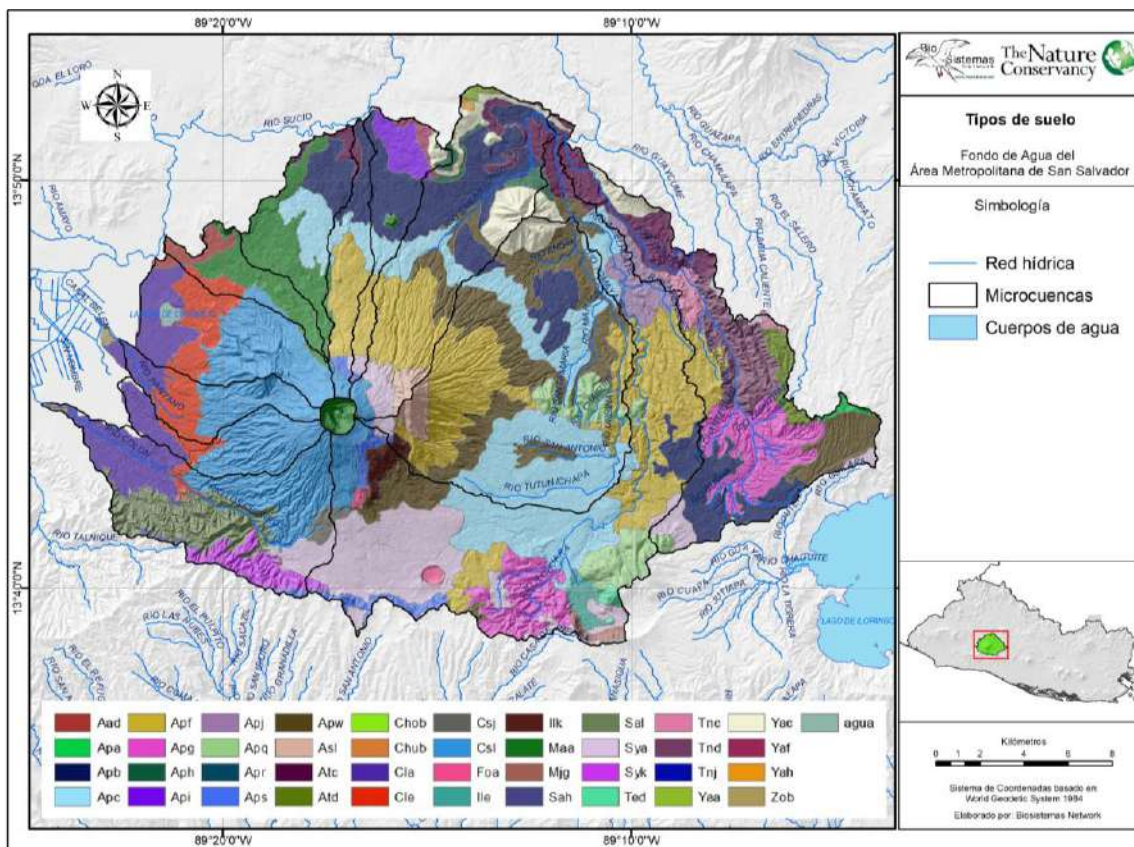


Figura 14. Mapa de profundidad del suelo de la RHGI_AMSS.

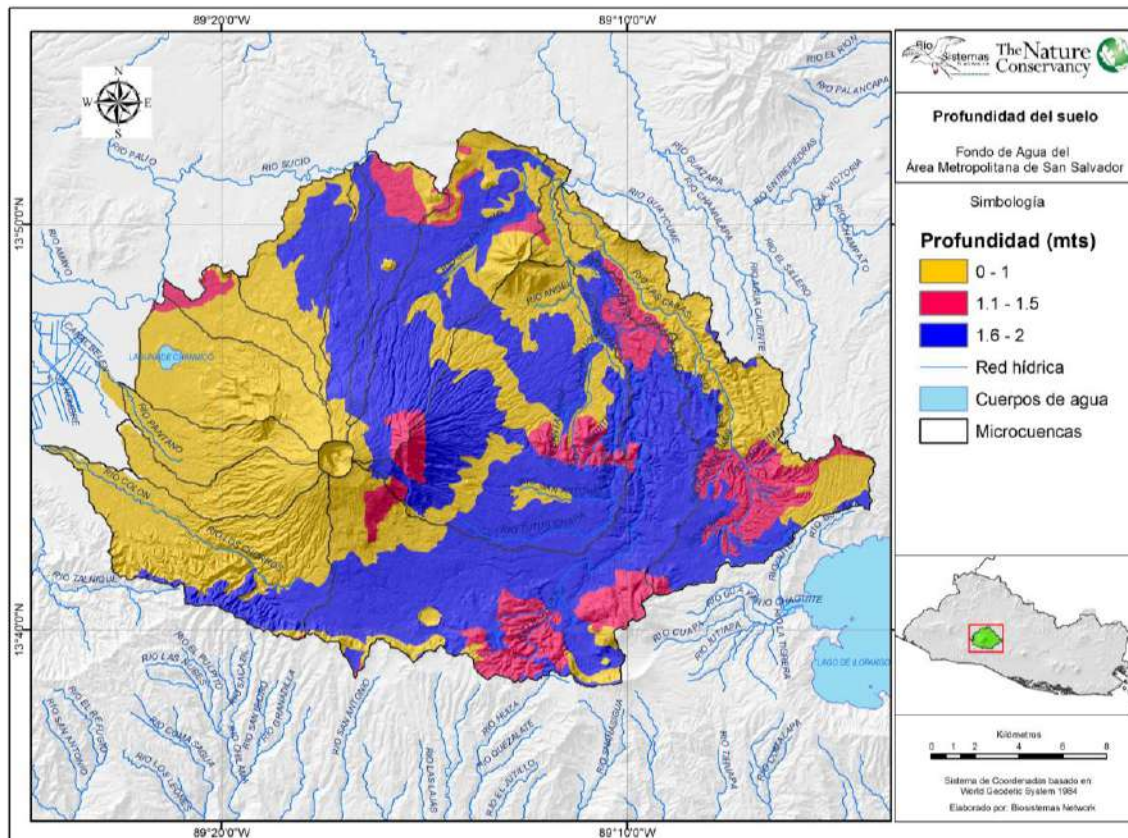


Figura 15. Mapa de texturas del suelo de la RHGI_AMSS.

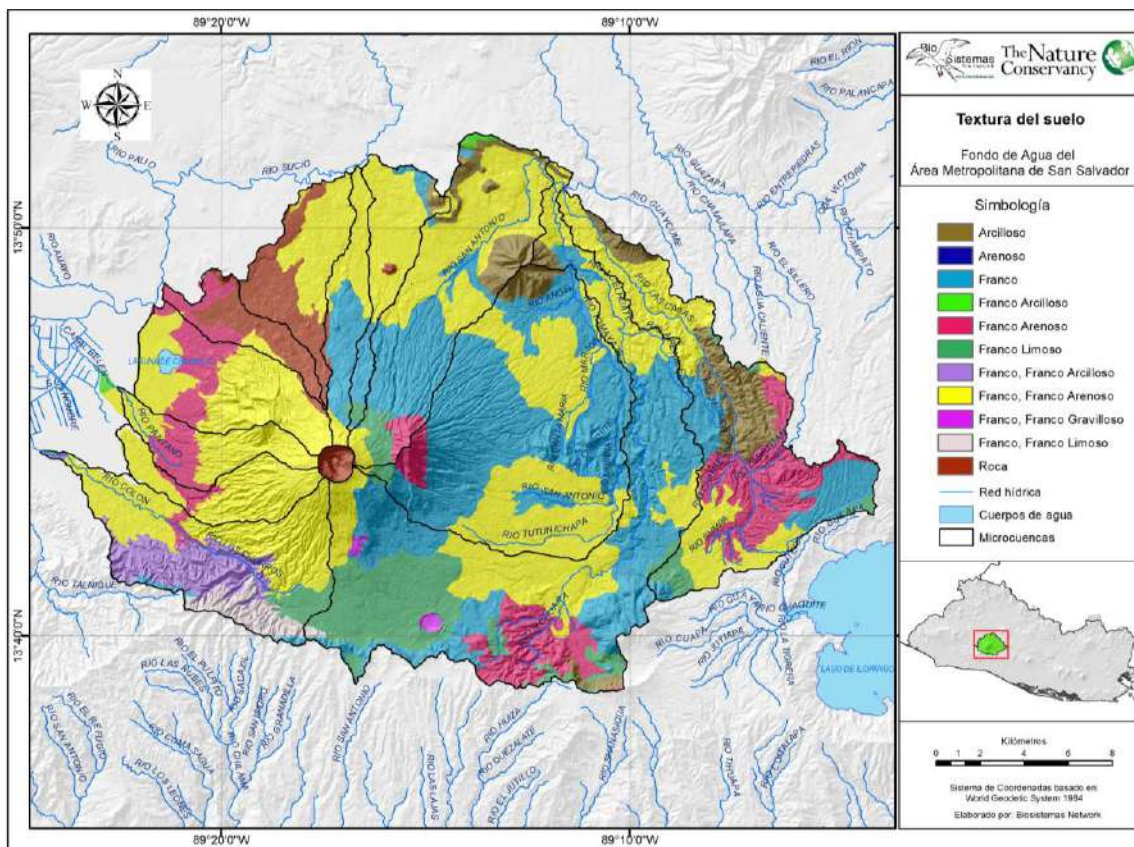


Figura 16. Mapa de índice de texturas de los suelos en la RHGI_AMSS.

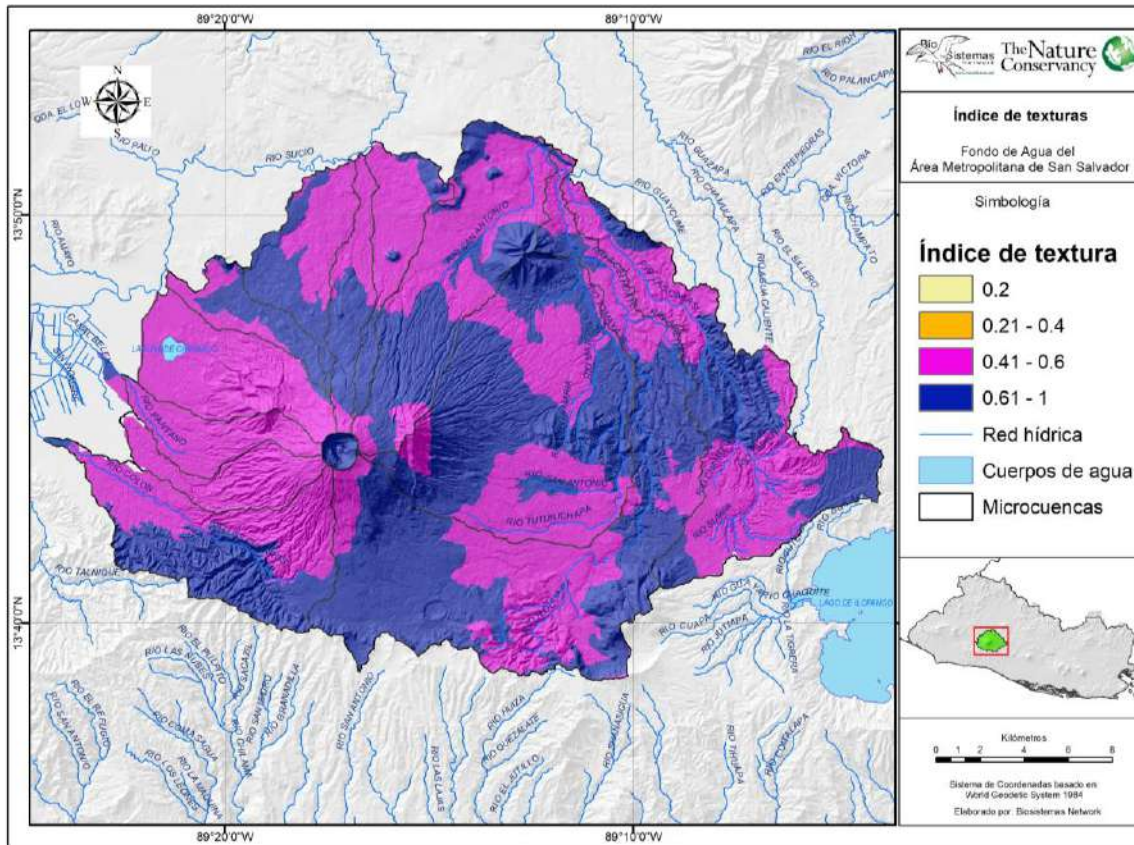


Figura 17. Mapa de erosibilidad de la RHGI_AMSS.

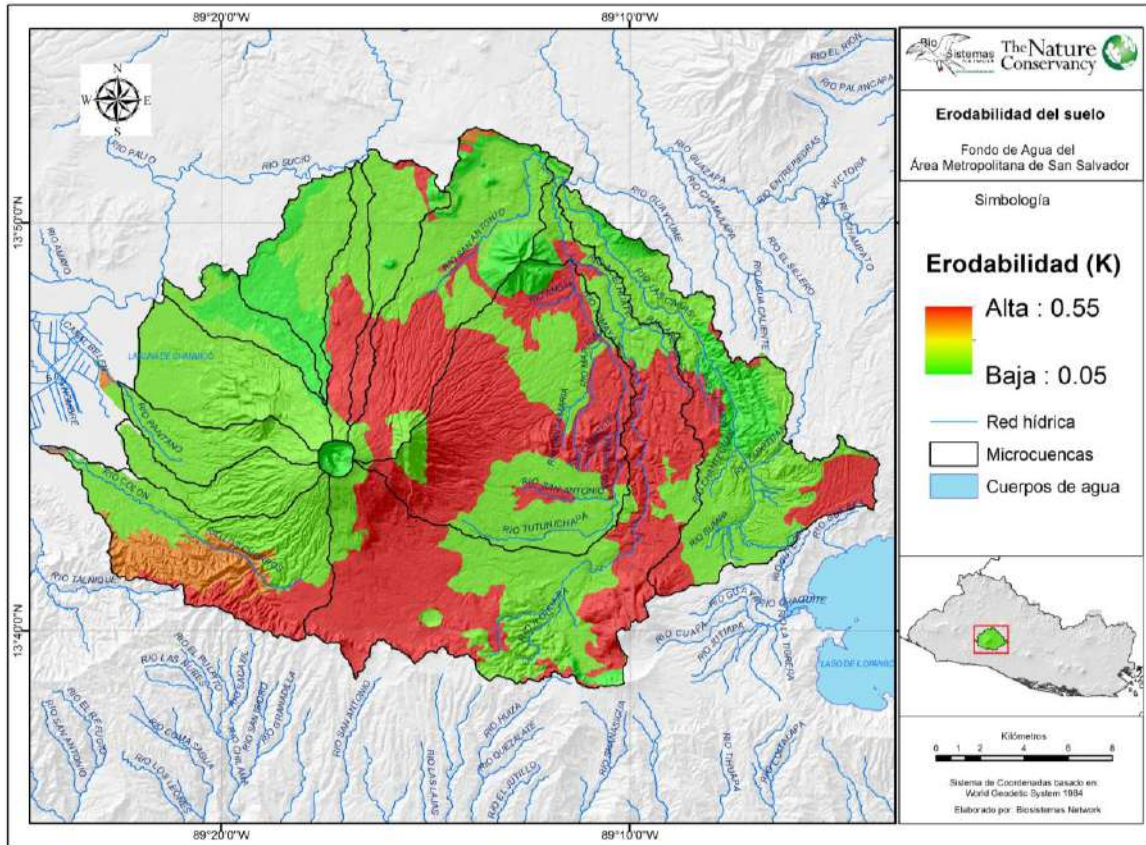
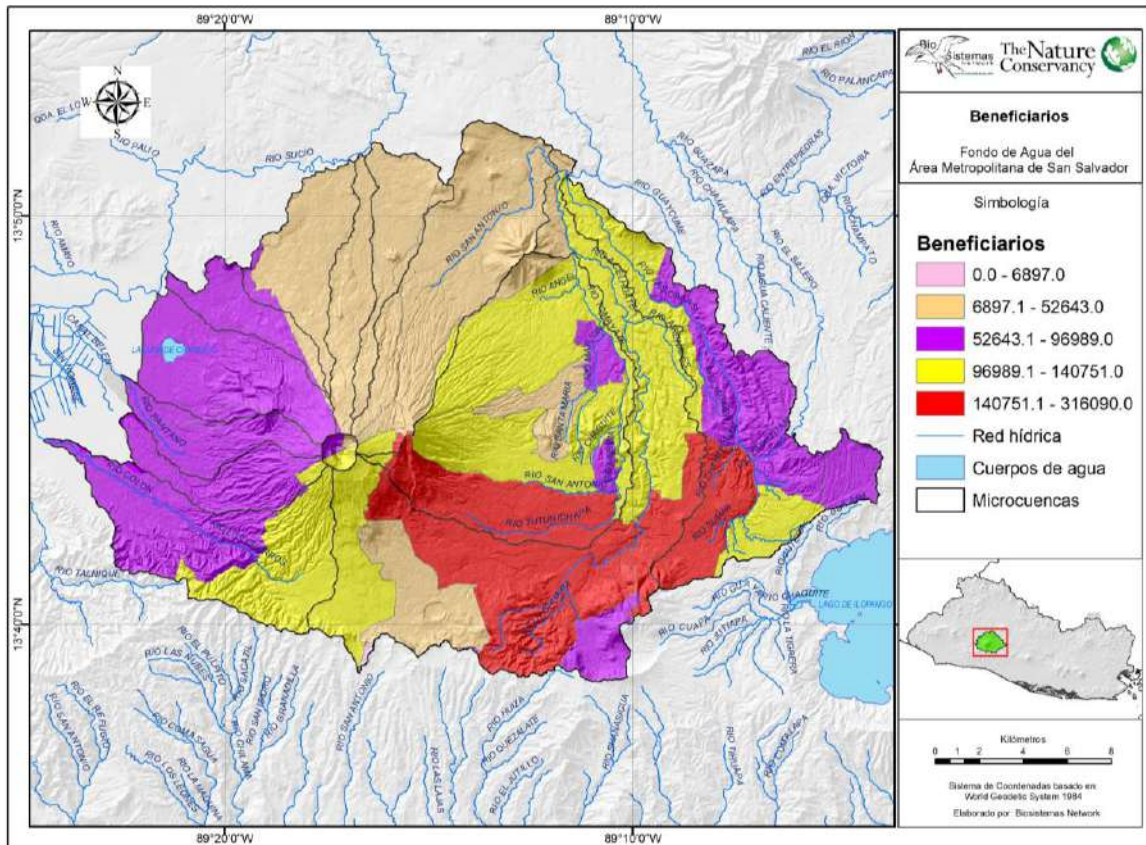


Figura 18. Mapa de beneficiarios dentro de la RHGI_AMSS.



4. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

4.1. Mapas a partir del Módulo Asesor del Portafolio

A partir de los cuatro grupos de actividades identificados: (i) Conservación; (ii) Restauración; (iii) Mejores Prácticas Agropecuarias, y (iv) Control de la Expansión Urbana, y en base al mapa actualizado de usos y coberturas del suelo; se construyeron, utilizando la plataforma del Asesor del Portafolio de RIOS, cuatro mapas – uno por cada grupo de actividades – con las áreas en las que tales actividades resultan pertinentes. Así mismo, el programa asigna prioridades, basado en la importancia que cada pixel representa para la consecución de los objetivos trazados. El programa asigna valores continuos, de entre 0 a 1, correspondientes a la prioridad (mientras más cercano a 1, mayor la prioridad); los cuales fueron agrupados en cinco clases equidistantes, por medio del software QGIS, designadas en orden de prioridad como: (a) prioridad alta, (b) media alta, (c) media, (d) media baja y (e) baja, y representadas por los colores rojo, naranja, amarillo, verde limón y verde, respectivamente, para facilitar su interpretación.

Tales mapas de áreas priorizadas por grupo de actividades, y sus respectivas extensiones, en términos de hectáreas por categoría de prioridad, se muestran a continuación.

Figura 19. Priorización de áreas de implementación_Act.1: Conservación.

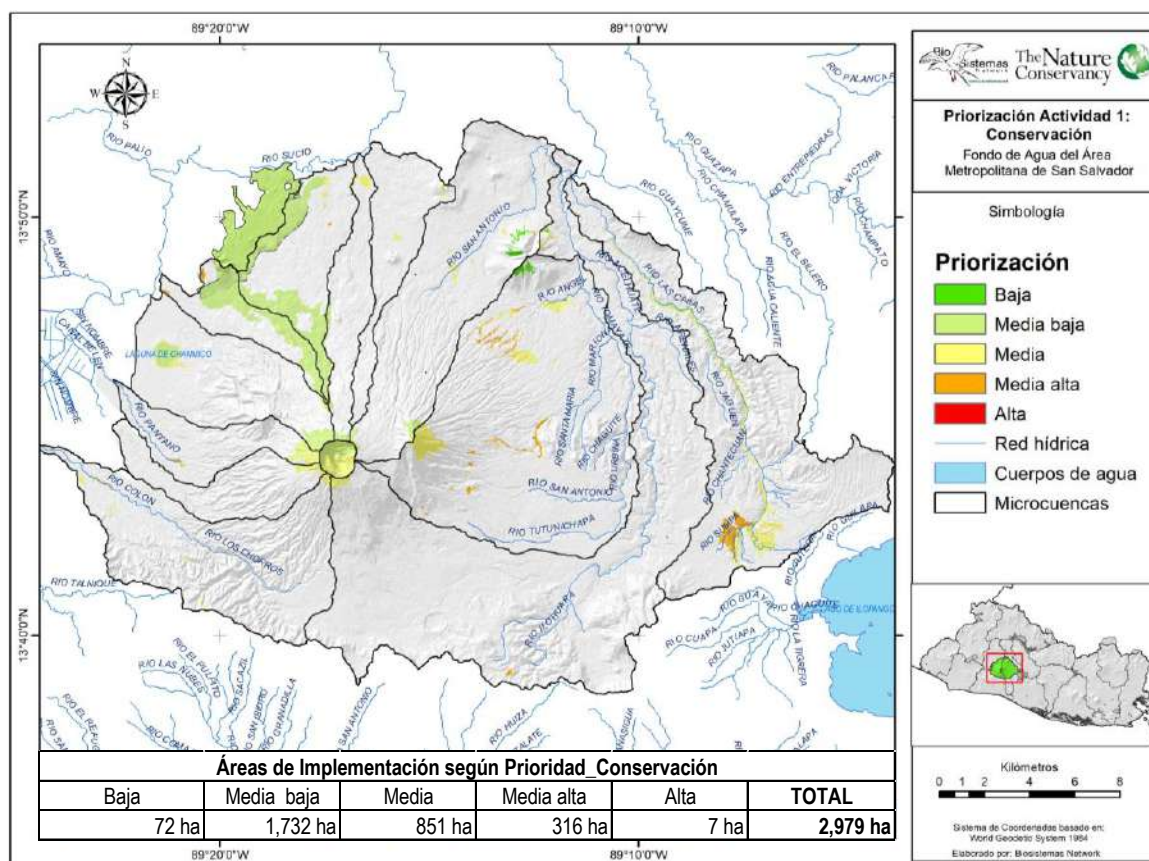


Figura 20. Priorización de áreas de implementación_Act.2: Restauración.

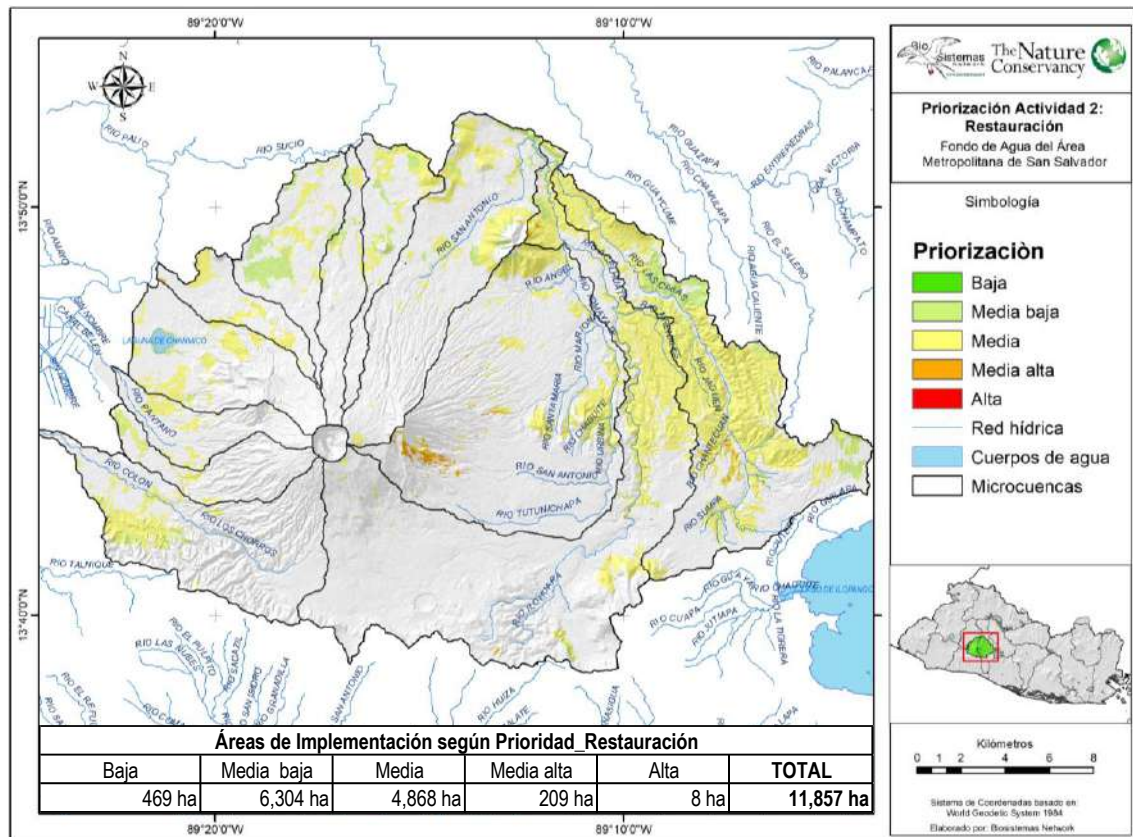


Figura 21. Priorización de áreas de implementación_Act.3: Mejores prácticas agrícolas.

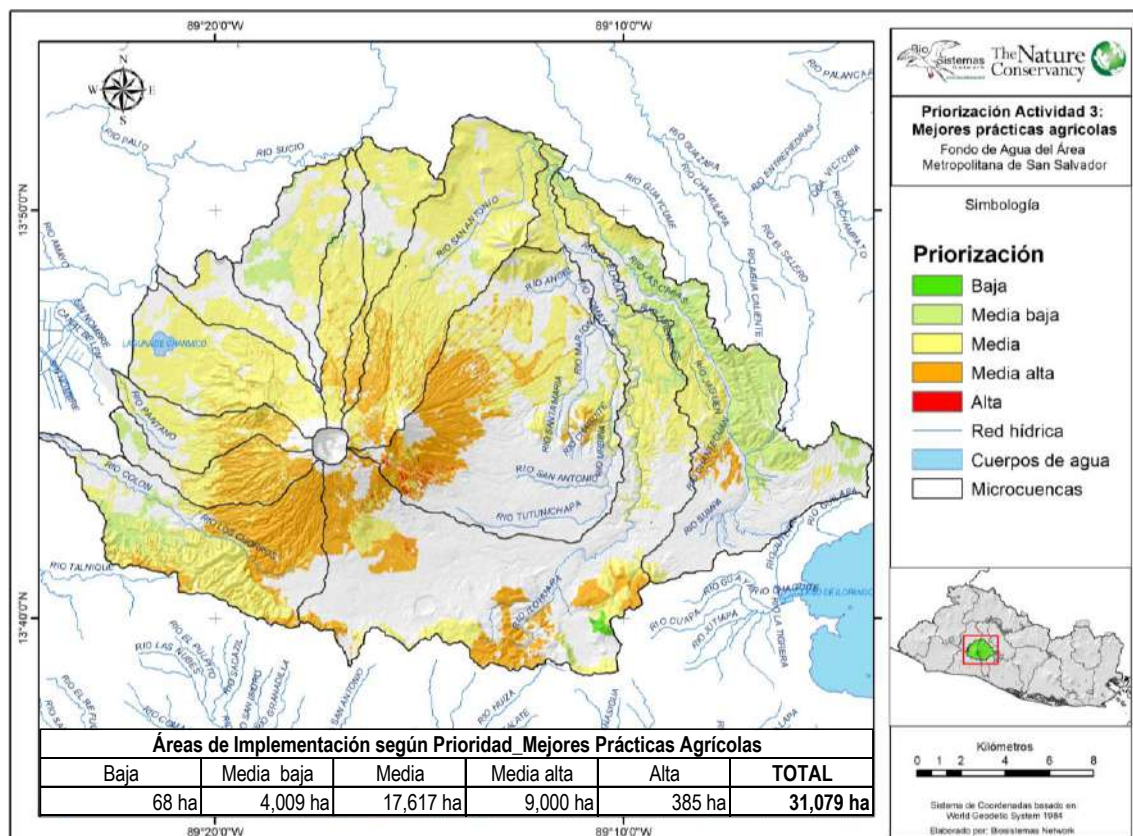
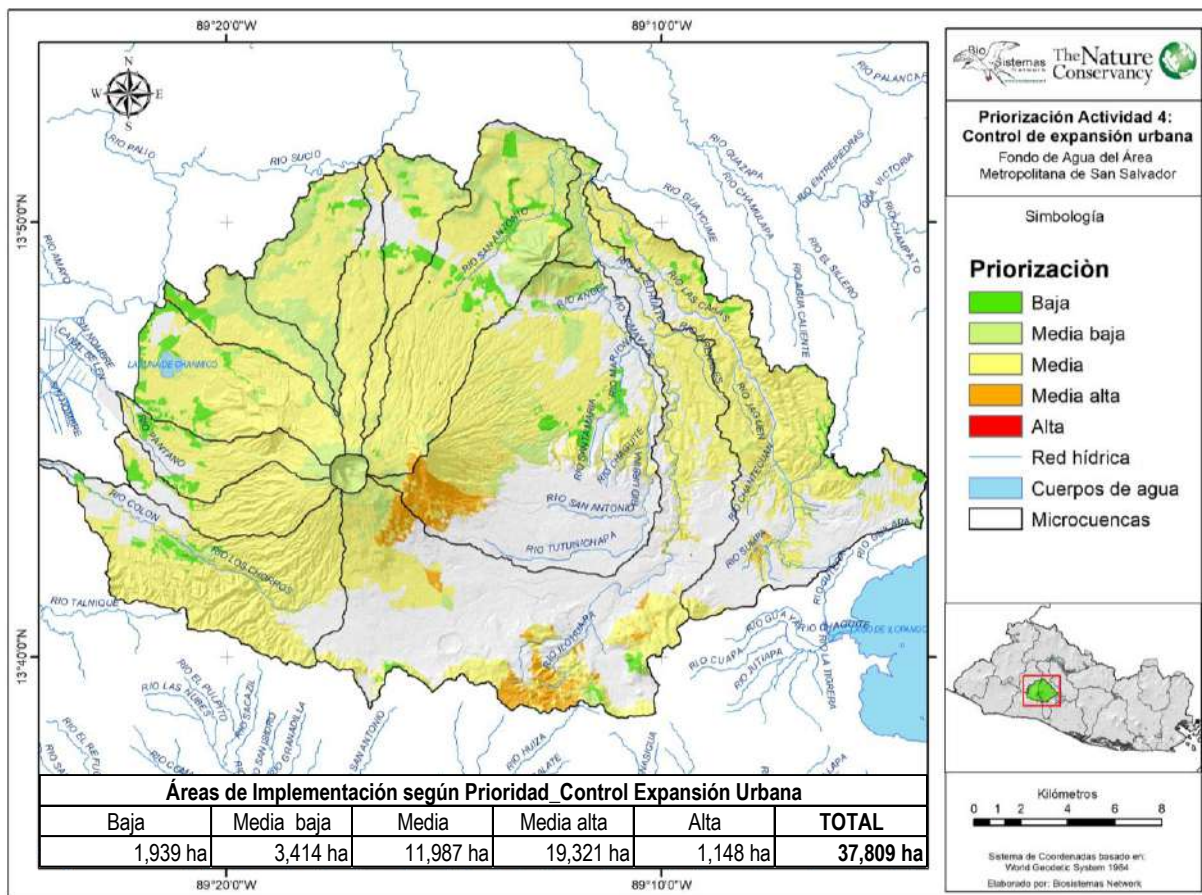


Figura 22. Priorización de áreas de implementación_Act.4: Control de la expansión urbana.



El programa también permite la modelación de portafolios integrados (por los cuatro grupos de actividades identificados). En los que las actividades que se recomienda implementar se priorizan de acuerdo con su relevancia para la consecución de los objetivos trazados, en términos de la cantidad de recursos disponibles para invertir.

En tal sentido, se decidió modelar cinco escenarios con una extensión incremental de áreas a intervenir de: 2,500; 5,000; 10,000; 25,000 y 50,000 hectáreas (ha). Los mapas resultantes y sus respectivas extensiones, en términos de hectáreas por grupo de actividades, se muestran a continuación.

Figura 23. Portafolio de actividades prioritarias según área de intervención: 2,500 ha.

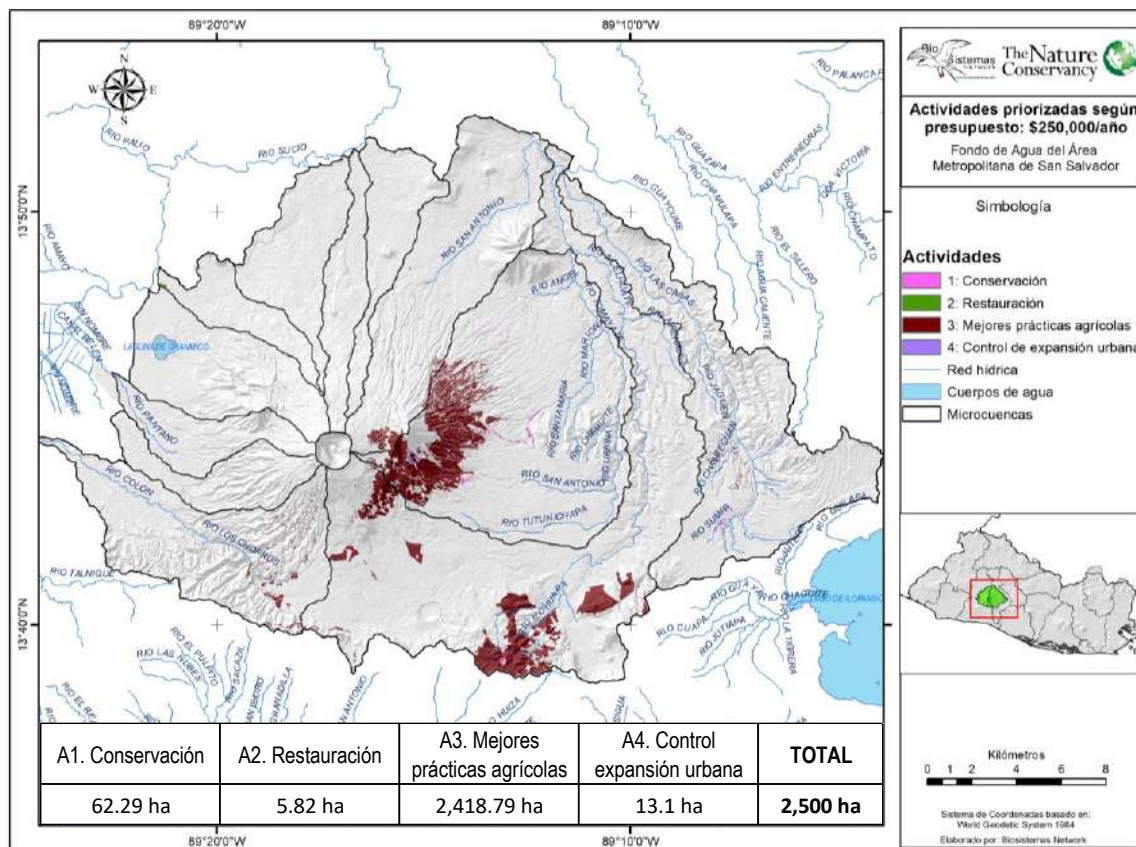


Figura 24. Portafolio de actividades prioritarias según área de intervención: 5,000 ha.

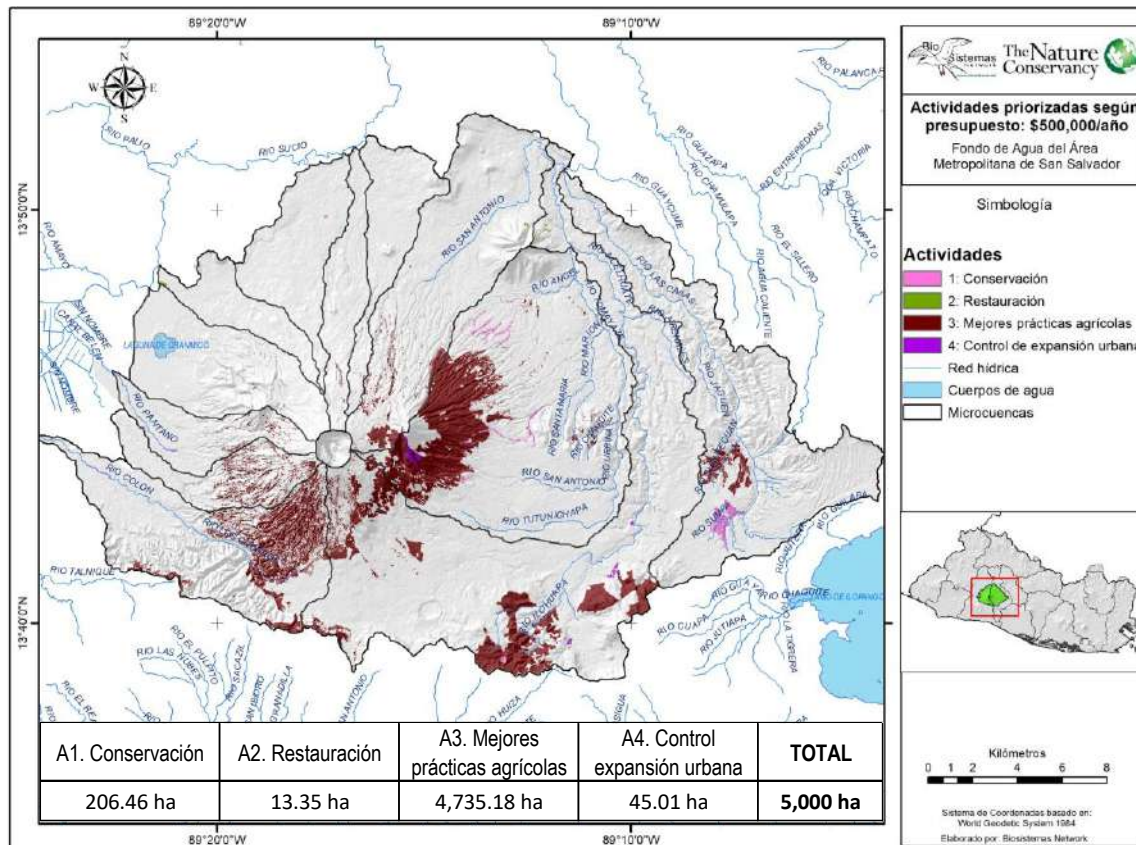


Figura 25. Portafolio de actividades prioritarias según área de intervención: 10,000 ha.

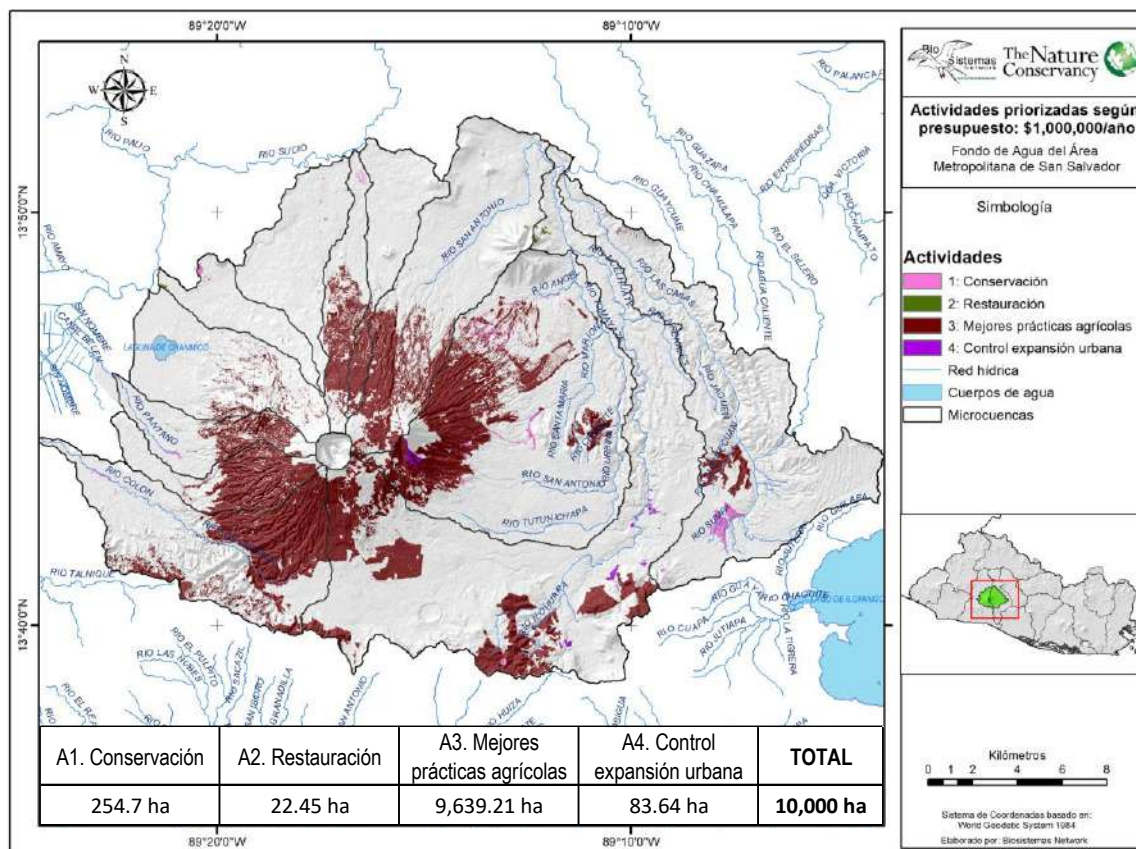


Figura 26. Portafolio de actividades prioritarias según área de intervención: 25,000 ha.

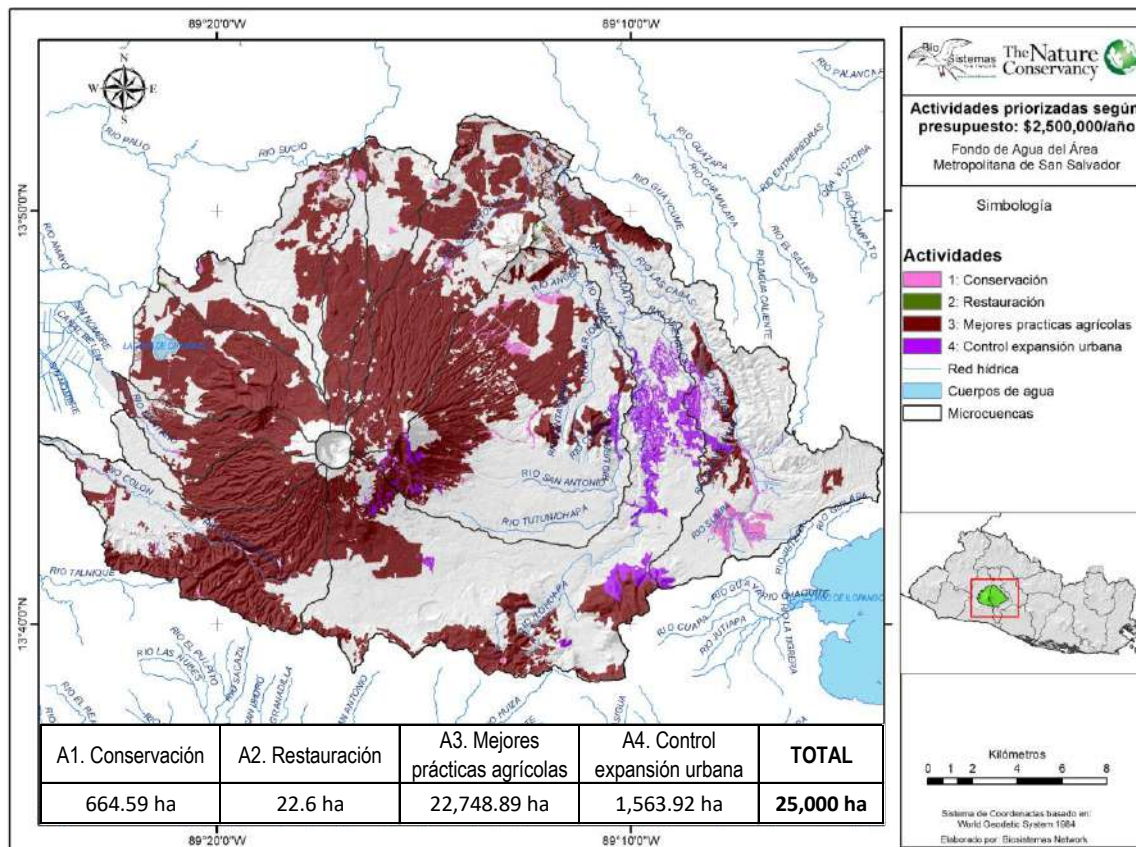


Figura 28. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 2,500 ha. Período: 5 años.

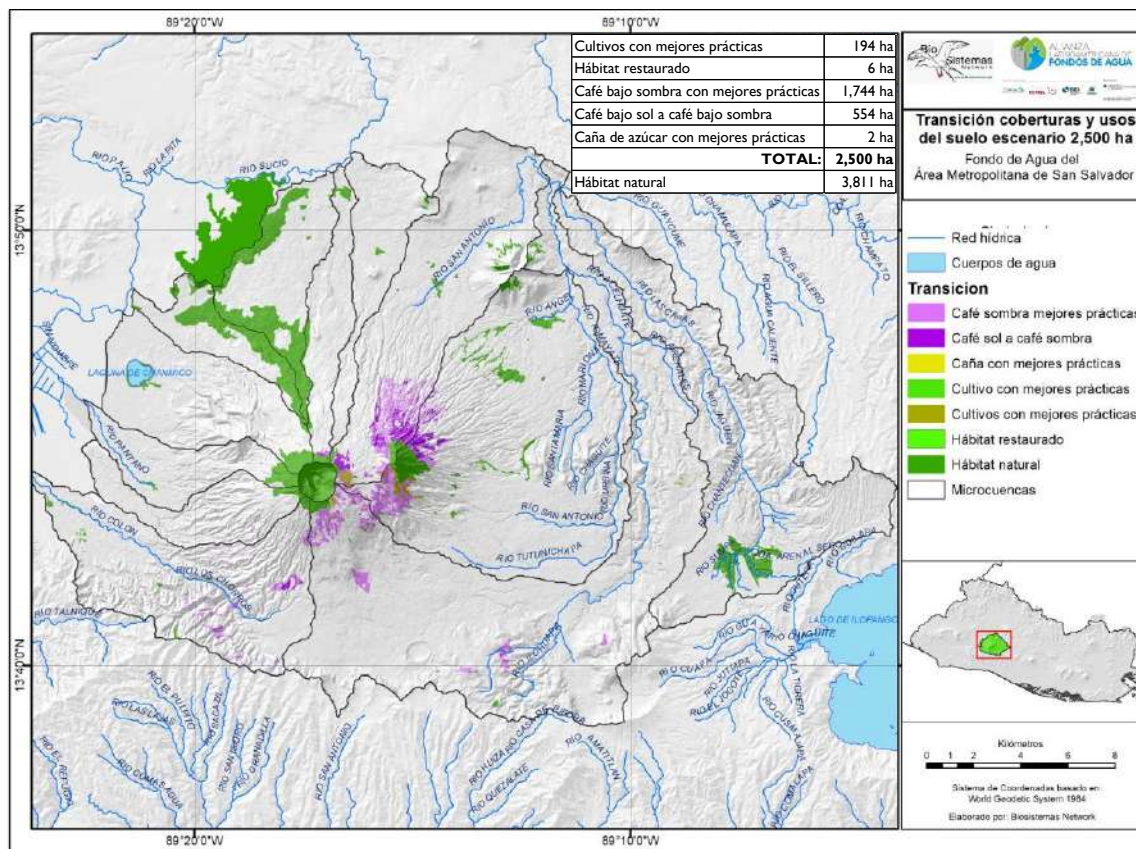


Figura 29. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 2,500 ha. Período: 5 años.

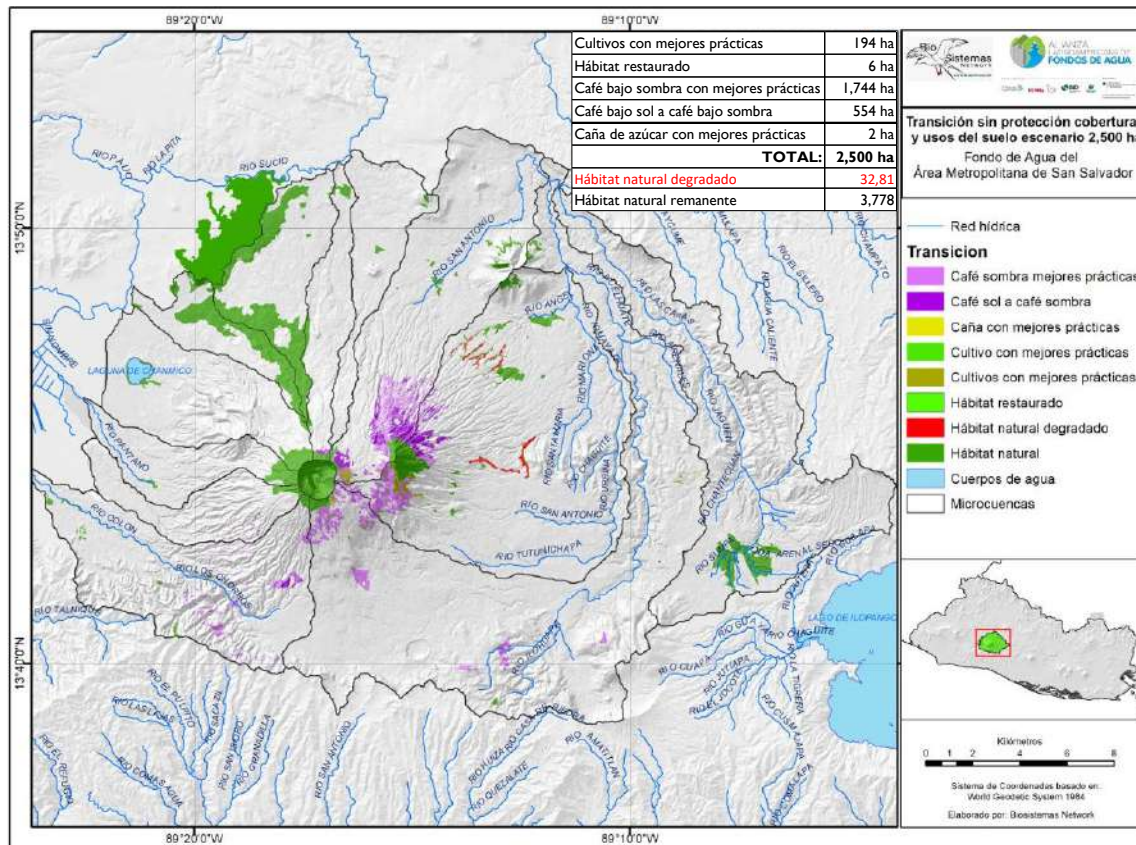


Figura 30. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 5,000 ha. Periodo: 5 años.

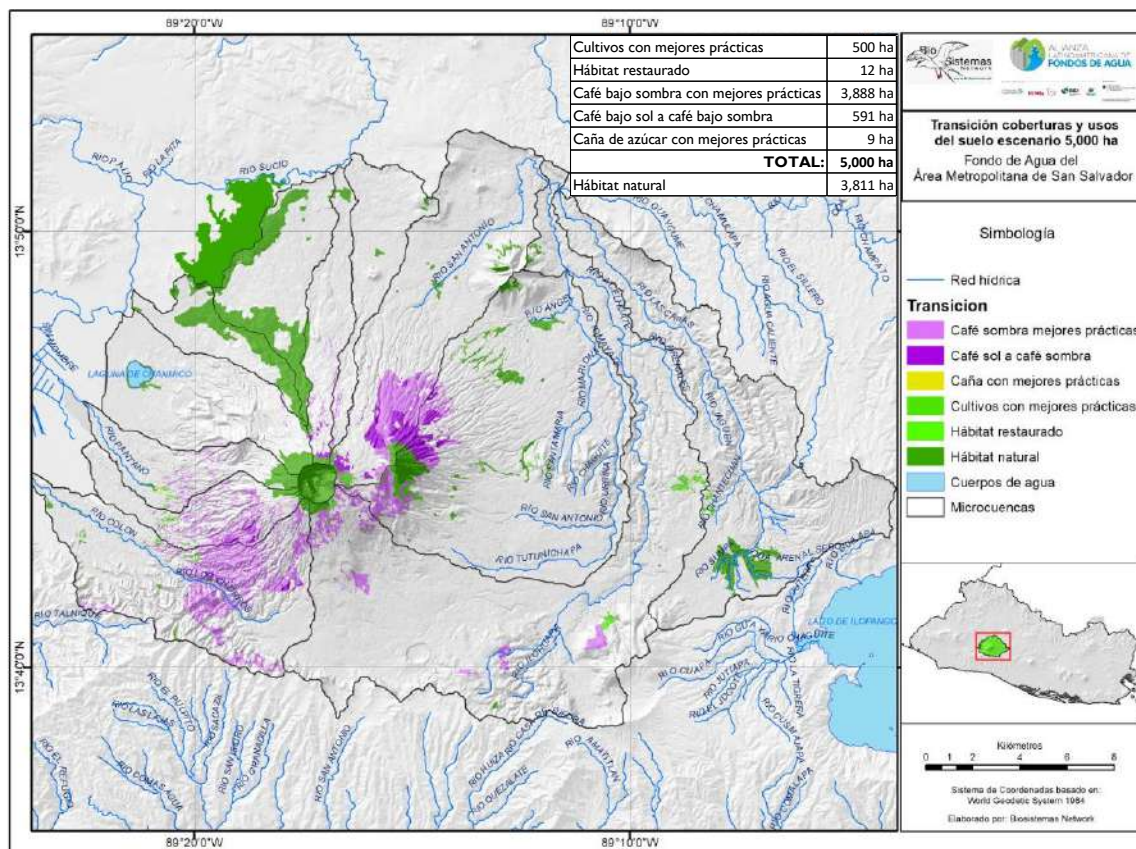


Figura 31. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 5,000 ha. Periodo: 5 años.

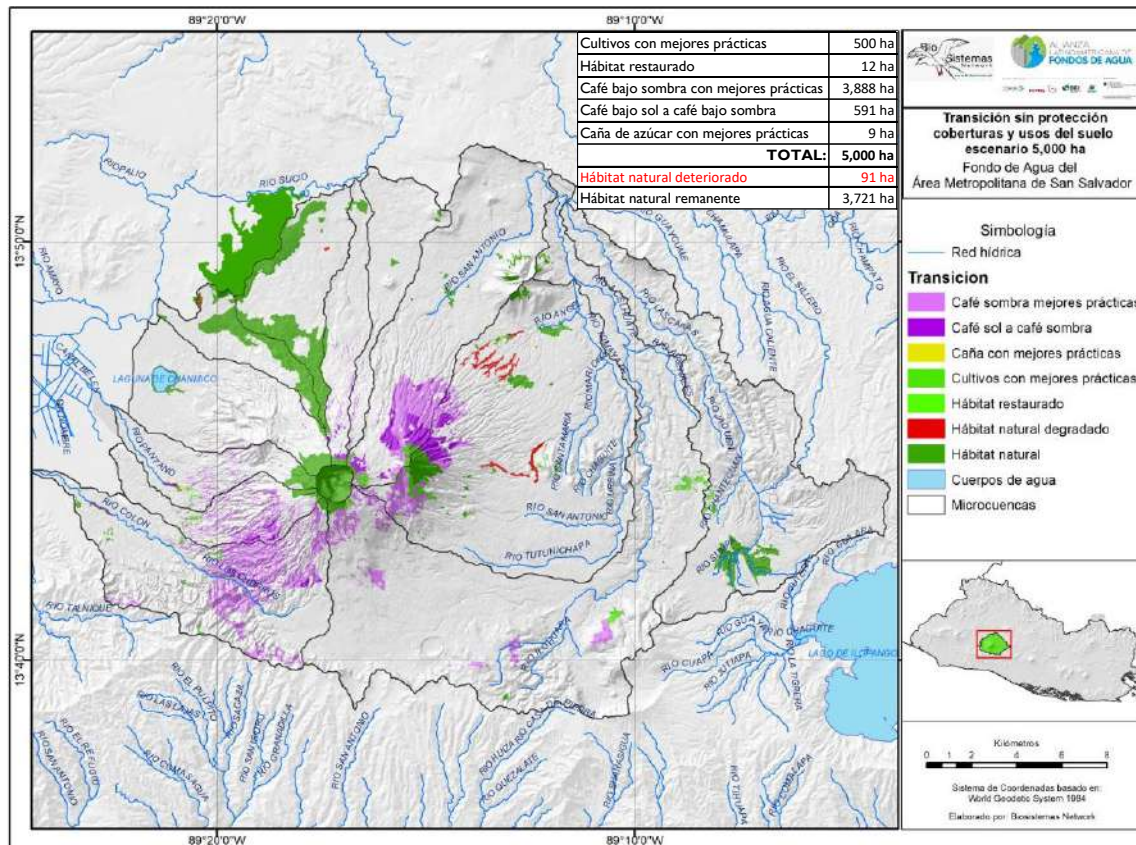


Figura 32. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 10,000 ha. Periodo: 5 años.

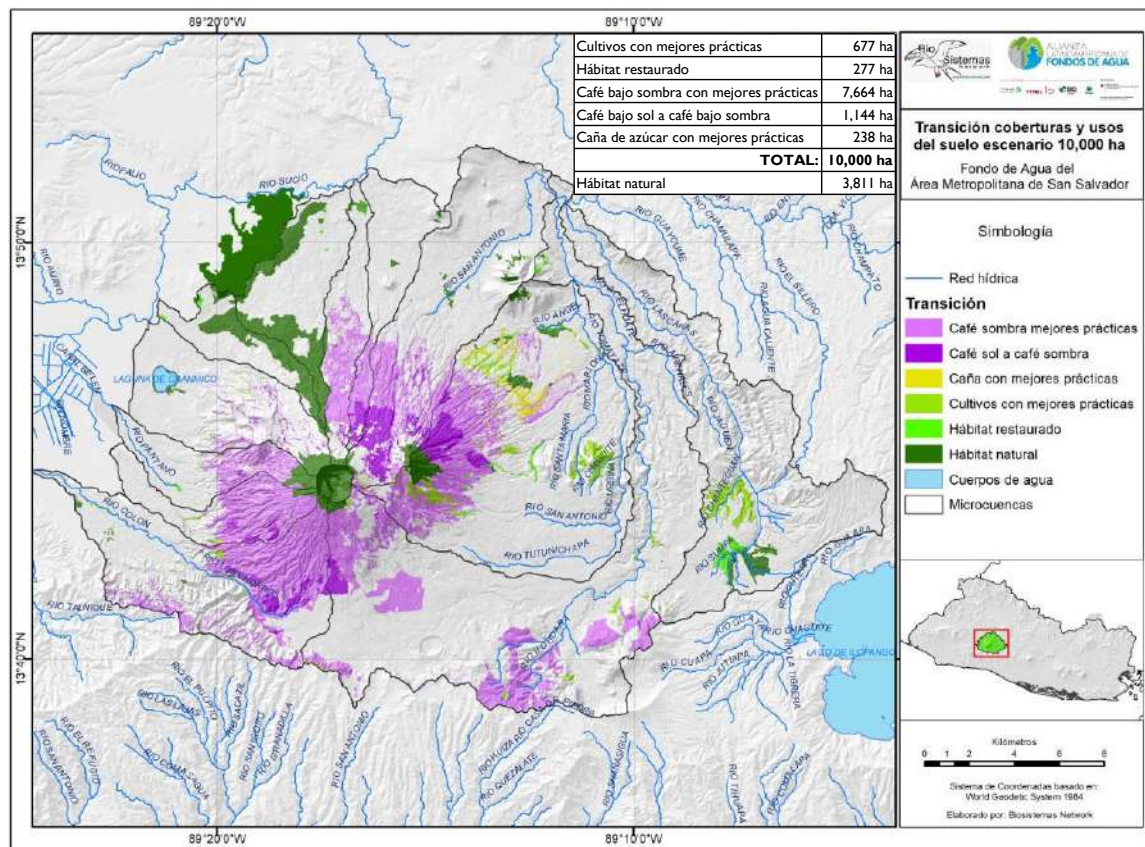


Figura 33. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 10,000 ha. Periodo: 5 años.

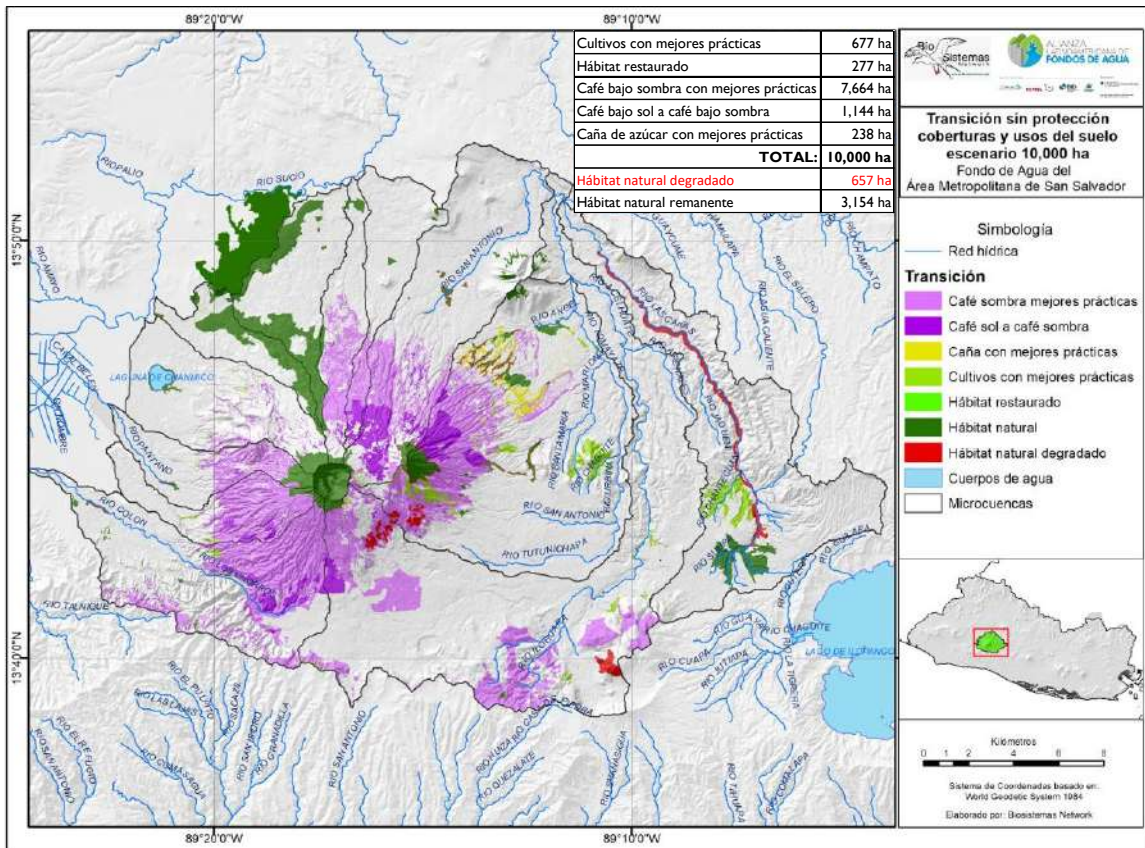


Figura 34. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 25,000 ha. Período: 5 años.

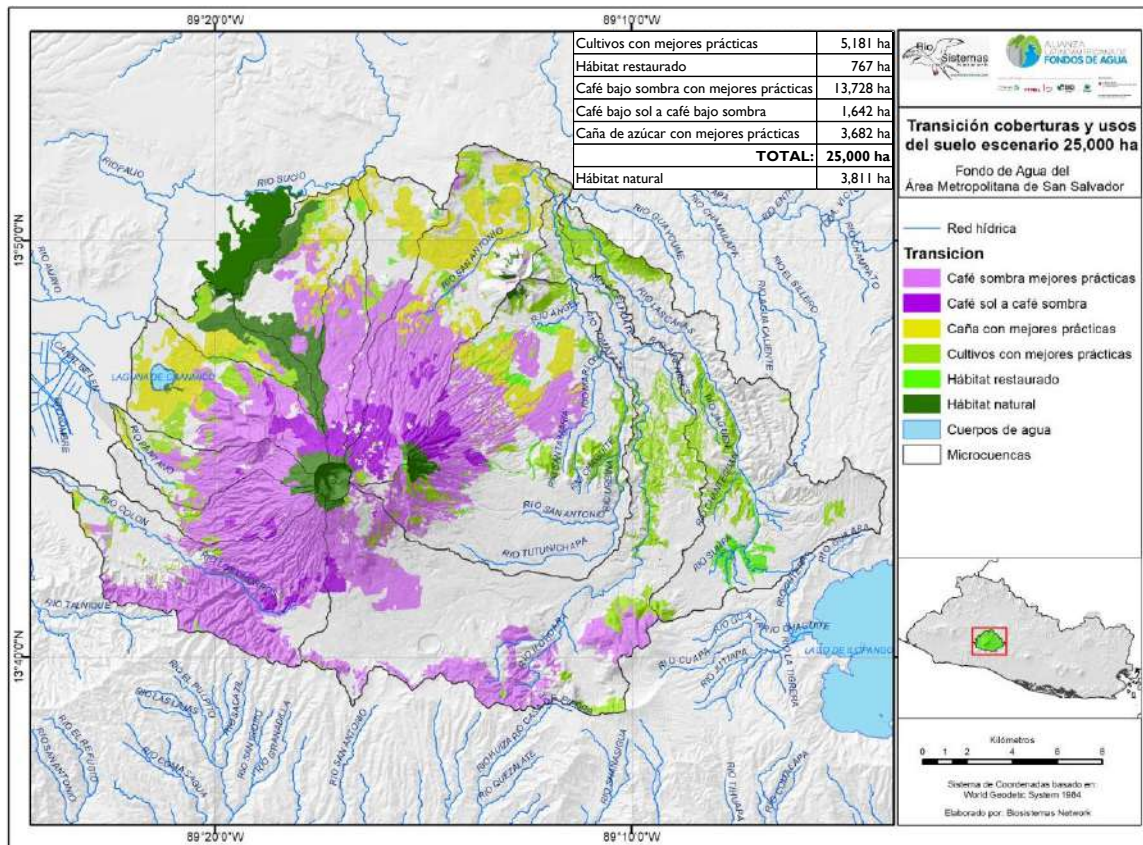


Figura 35. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 25,000 ha. Período: 5 años.

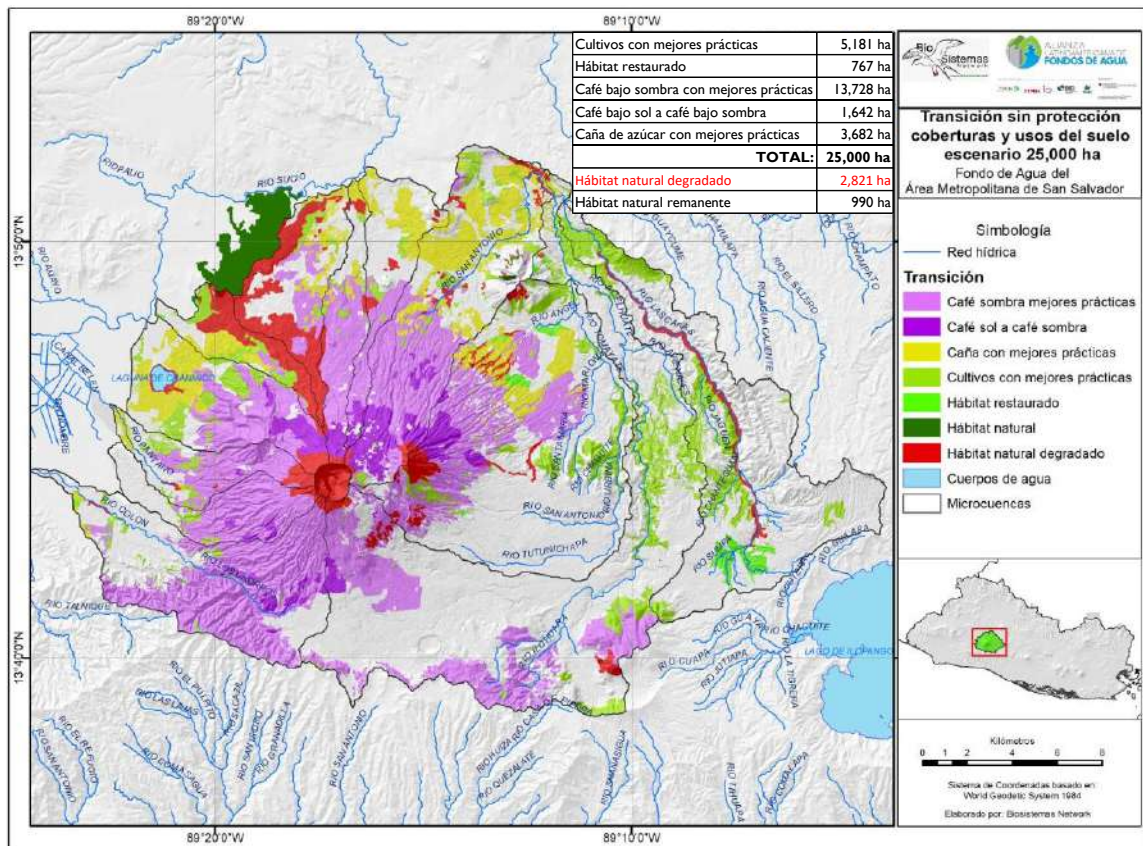


Figura 36. Mapa de Transiciones, sin degradación. Extensión total: 50,000 ha. Periodo: 5 años.

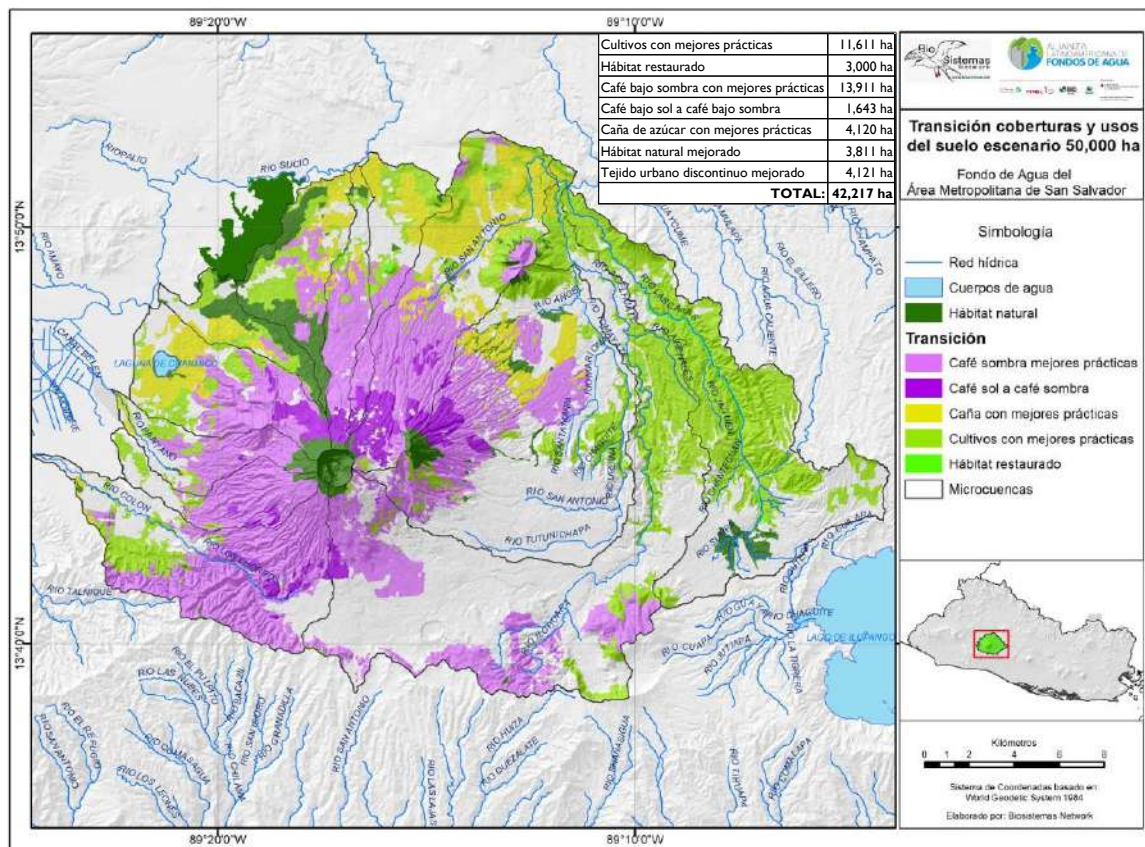
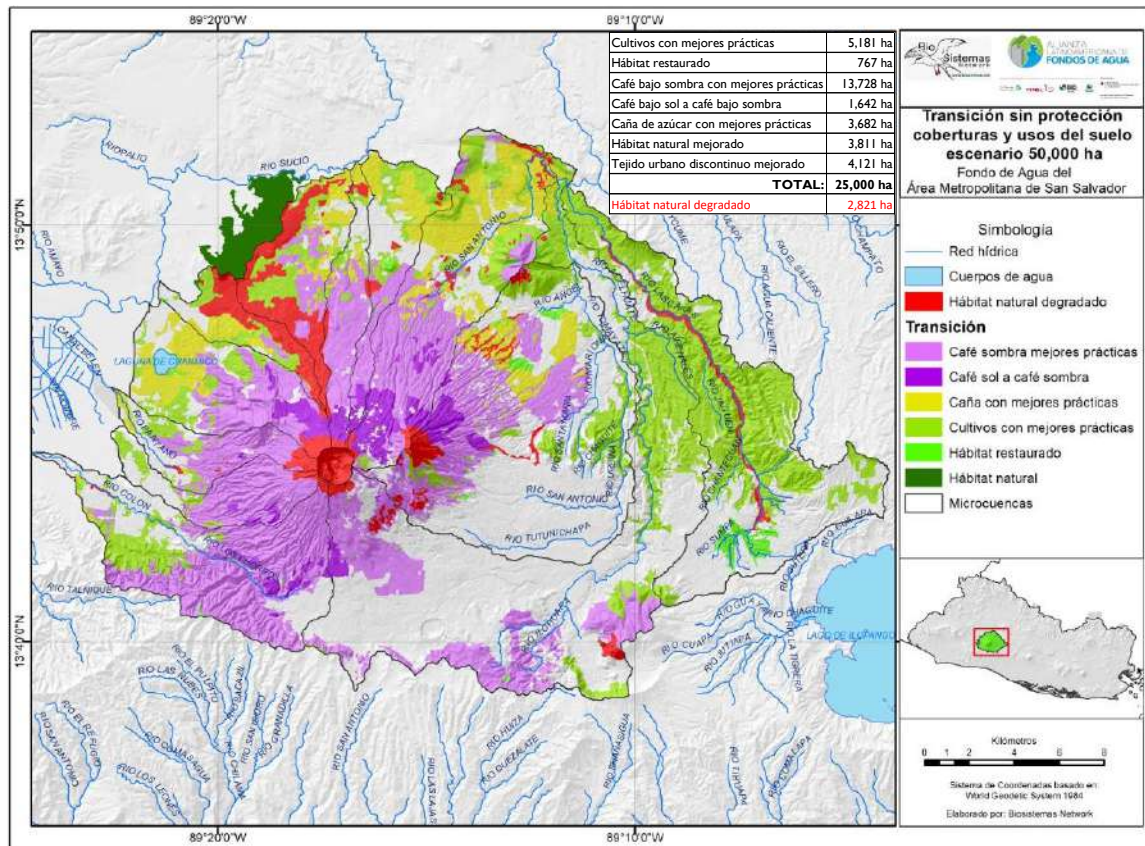


Figura 37. Mapa de Transiciones, con degradación. Extensión total: 50,000 ha. Periodo: 5 años.



4.3. Resultados InVEST

Después de correr la modelación con el software de InVEST, como se describe en la parte metodológica, se obtuvieron los resultados detallados a continuación. Las figuras de la 38 a la 44 muestran cómo la implementación de las actividades propuestas tiene un efecto progresivo significativo reduciendo la escorrentía, que se acentúa al alcanzar la extensión de intervención crítica de las 10,000 ha. La diferencia de la escorrentía total anual producida en un escenario de intervención de 50,000 ha, a un horizonte de 5 años, con respecto a la línea base actual, se estima en 4.9 millones de metros cúbicos; es decir, un promedio de 98 m³ por hectárea intervenida o 10 mm/m².

Figura 38. Escorrentía total anual esperada (m³) en la RHI_AMSS, por escenario de intervención.

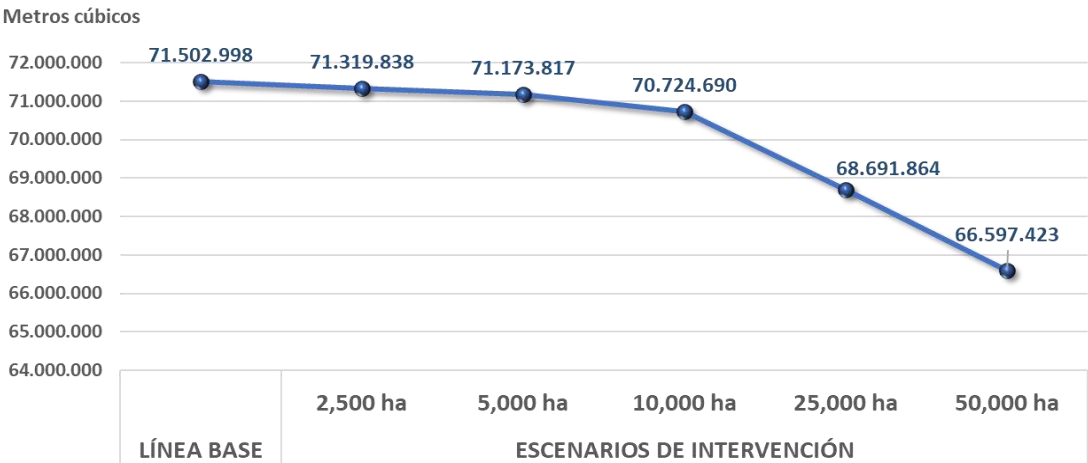


Figura 39. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Línea Base.

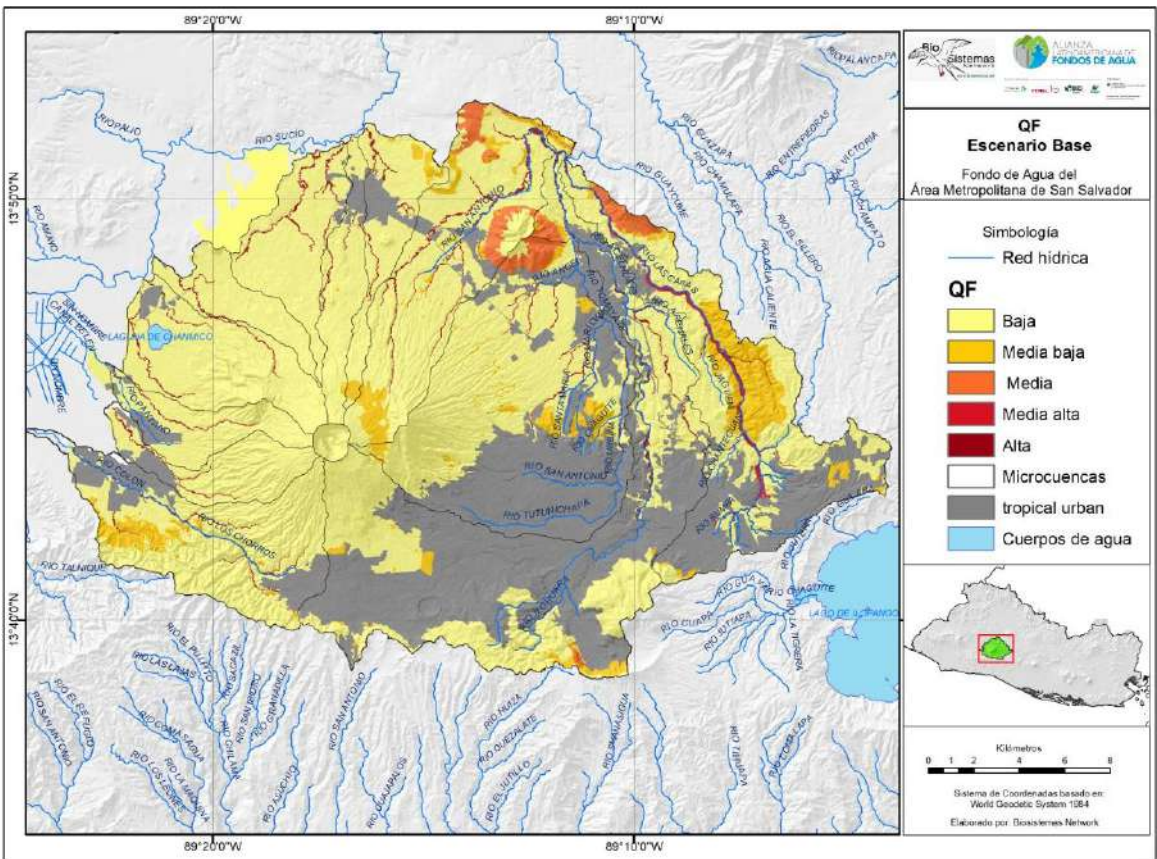


Figura 40. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 ha.
Período: 5 años.

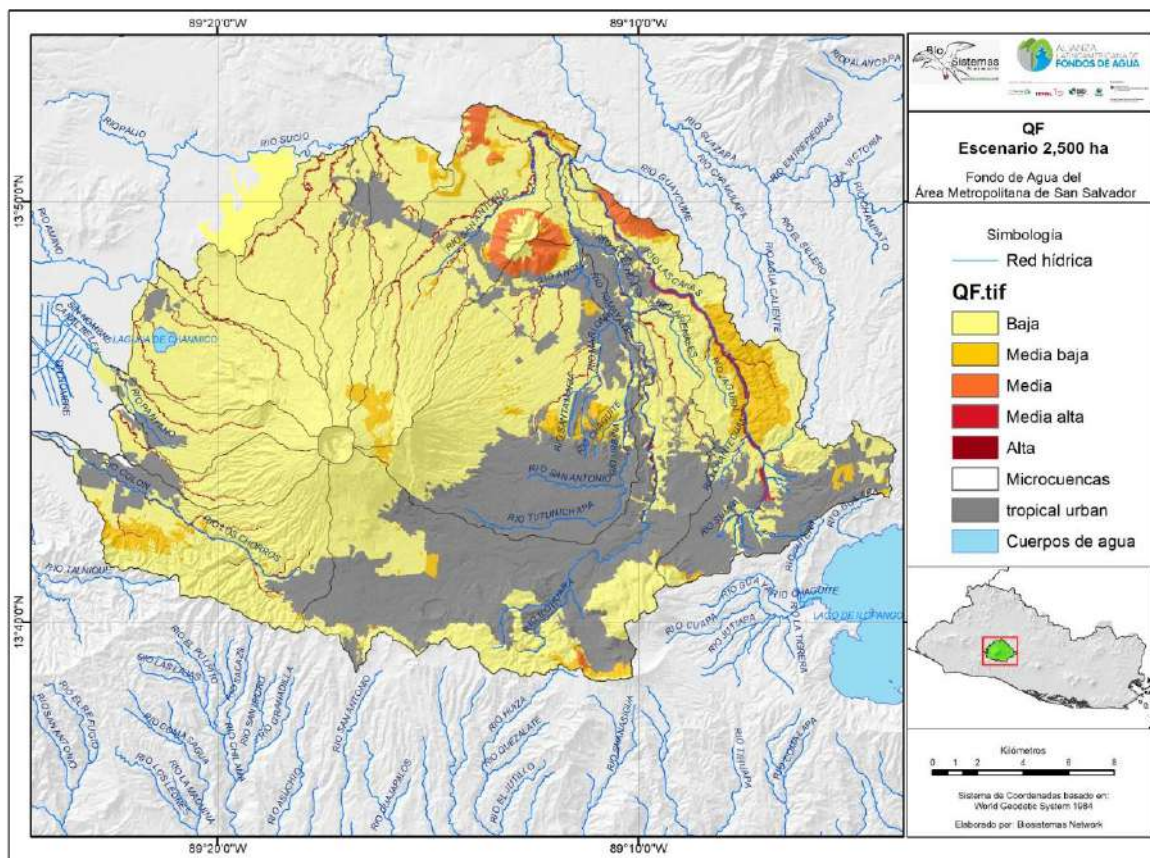


Figura 41. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Escenario 5,000 ha.
Período: 5 años.

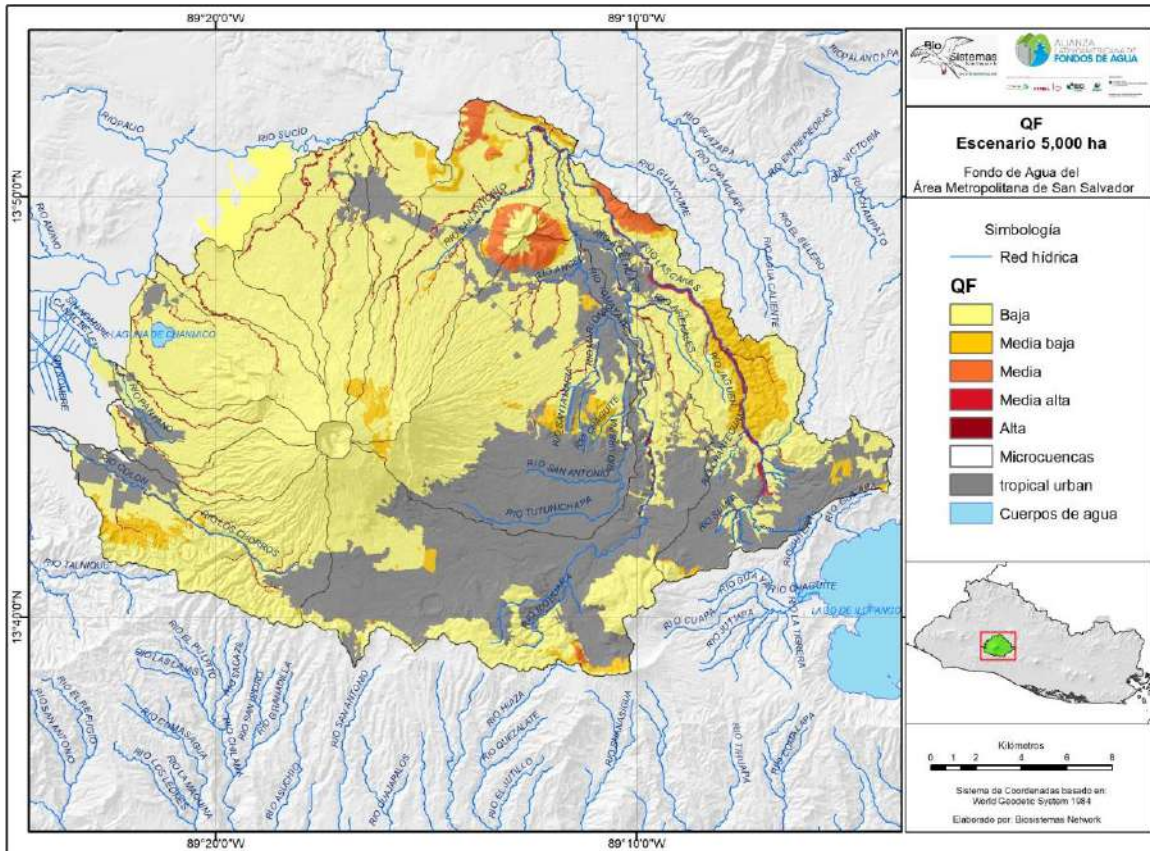


Figura 42. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Escenario 10,000 ha.
Período: 5 años.

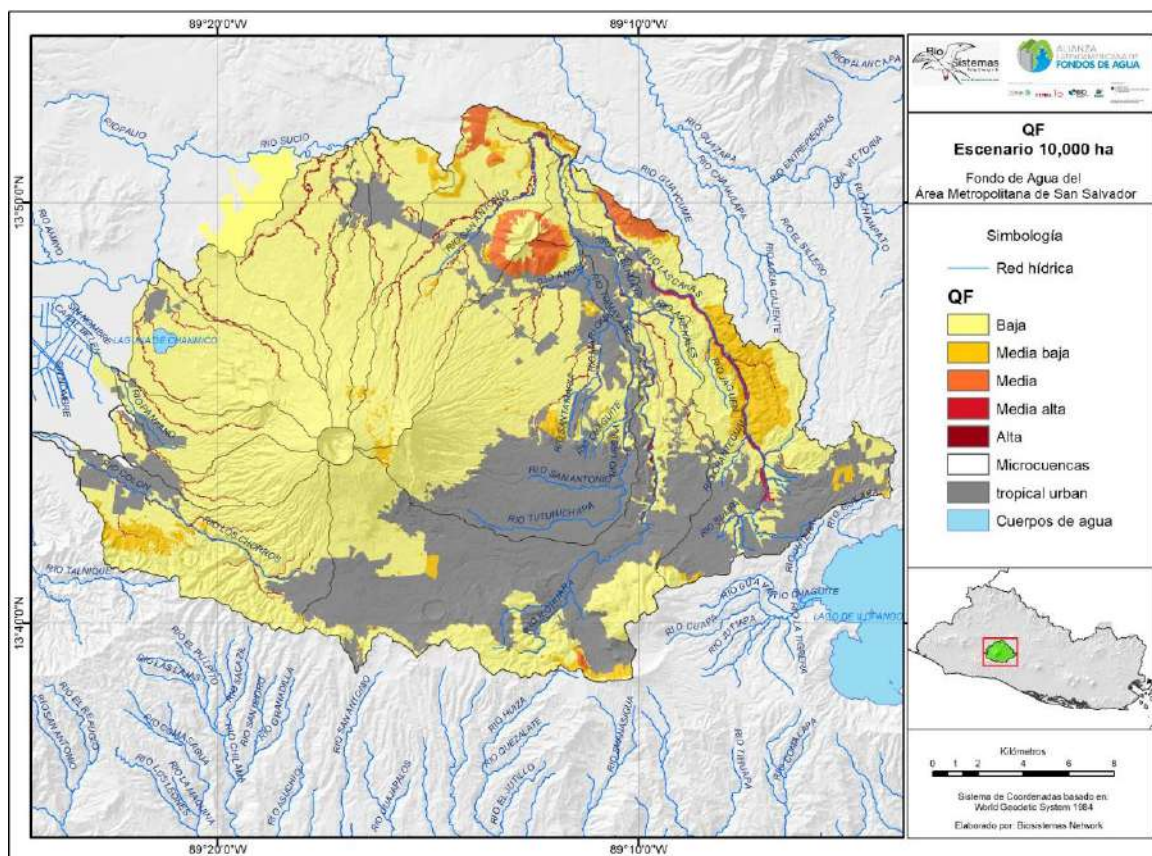
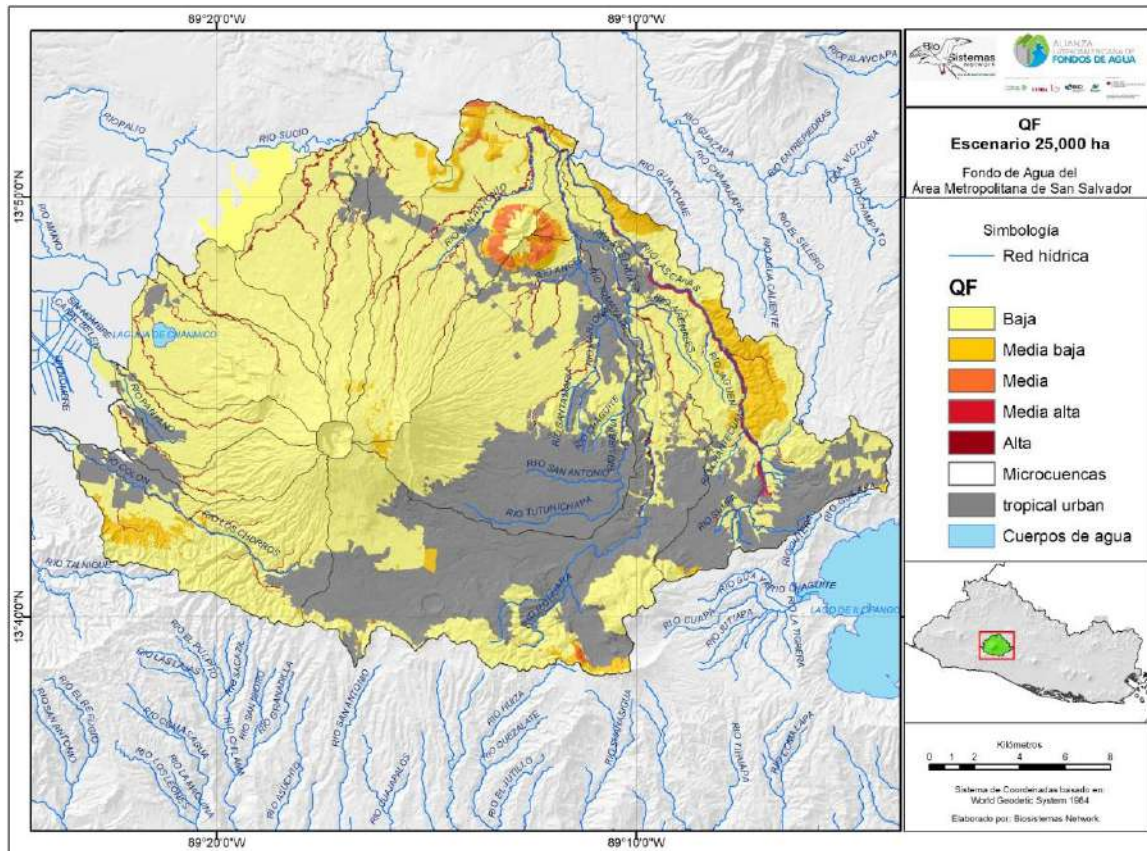


Figura 43. Mapa de escorrentía en la RHI_AMSS, Escenario 25,000 ha.
Período: 5 años.



QF
Escenario 50,000 ha
Fondo de Agua del
Área Metropolitana de San Salvador

Simbología

- Red hídrica

QF

- Baja
- Media baja
- Media
- Media alta
- Alta
- Microcuencas
- tropical urban
- Cuerpos de agua

Kilómetros
0 2 4 6 8

Sistema de Coordenadas basado en:
World Geodetic System 1984
Elaborado por: BioideaNetwork

Figura 45. Flujo lateral base anual esperado (m^3) en la RHL_AMSS, por escenario de intervención.

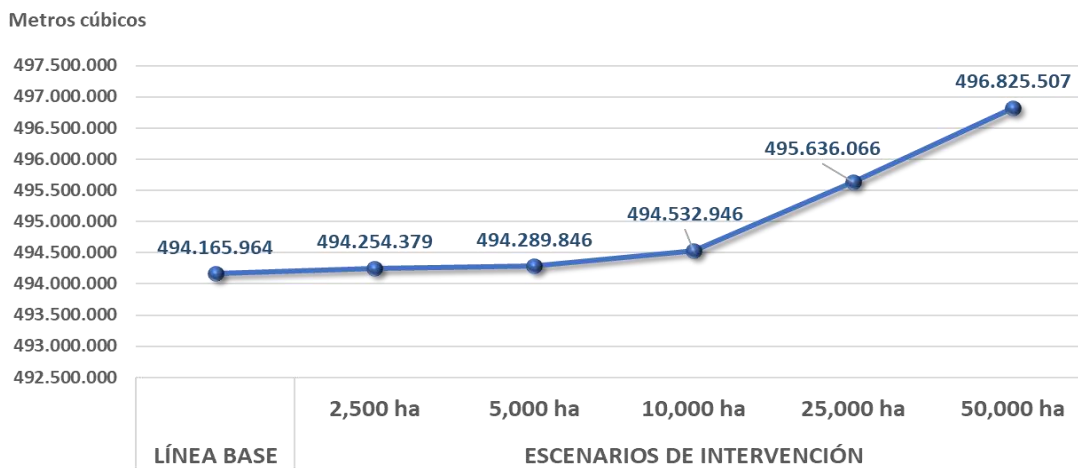


Figura 46. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Línea Base.

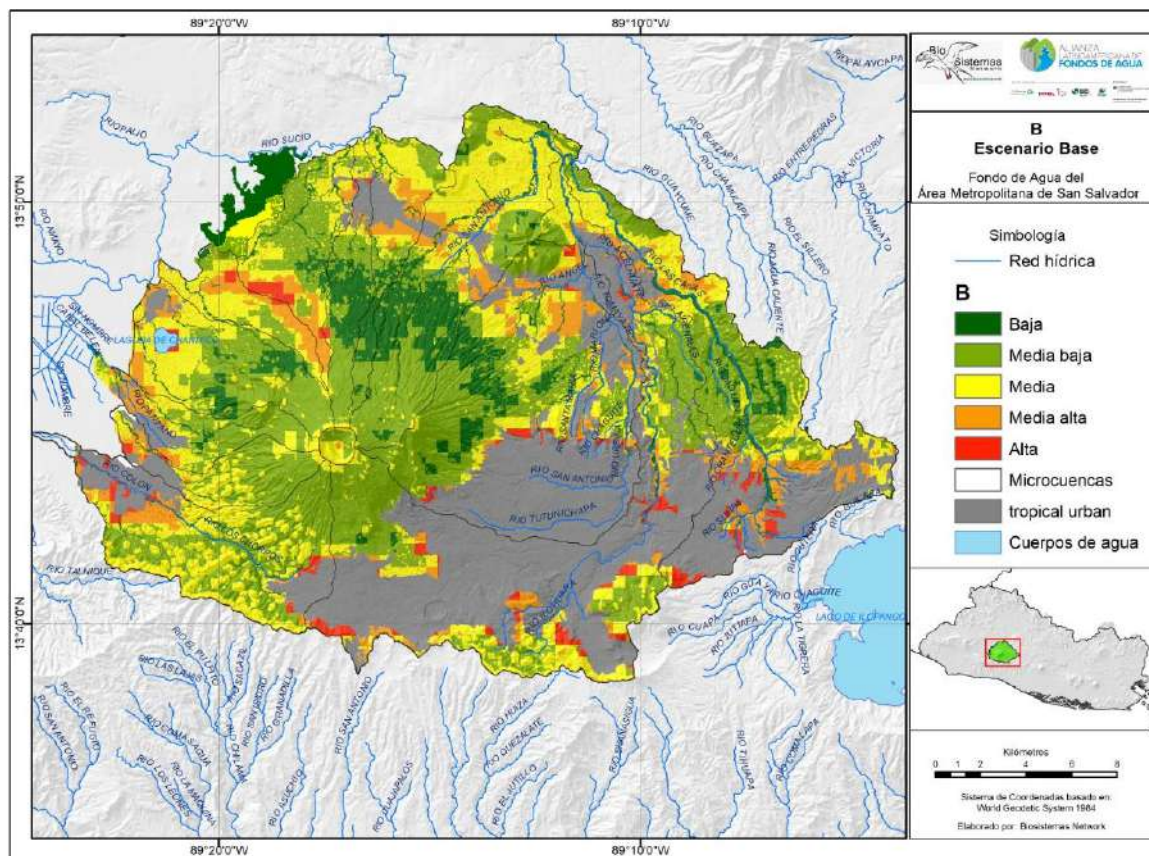


Figura 47. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 ha. Período: 5 años.

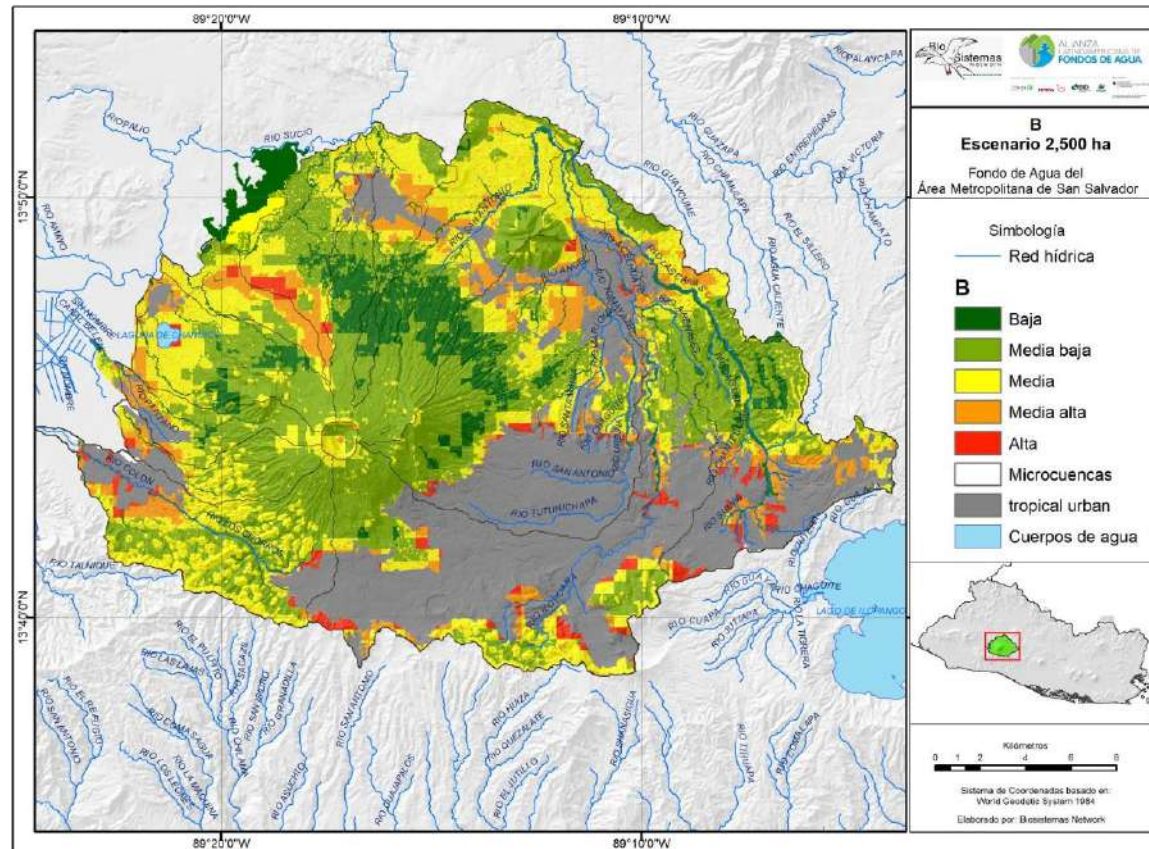


Figura 49. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 10,000 ha.
Período: 5 años.

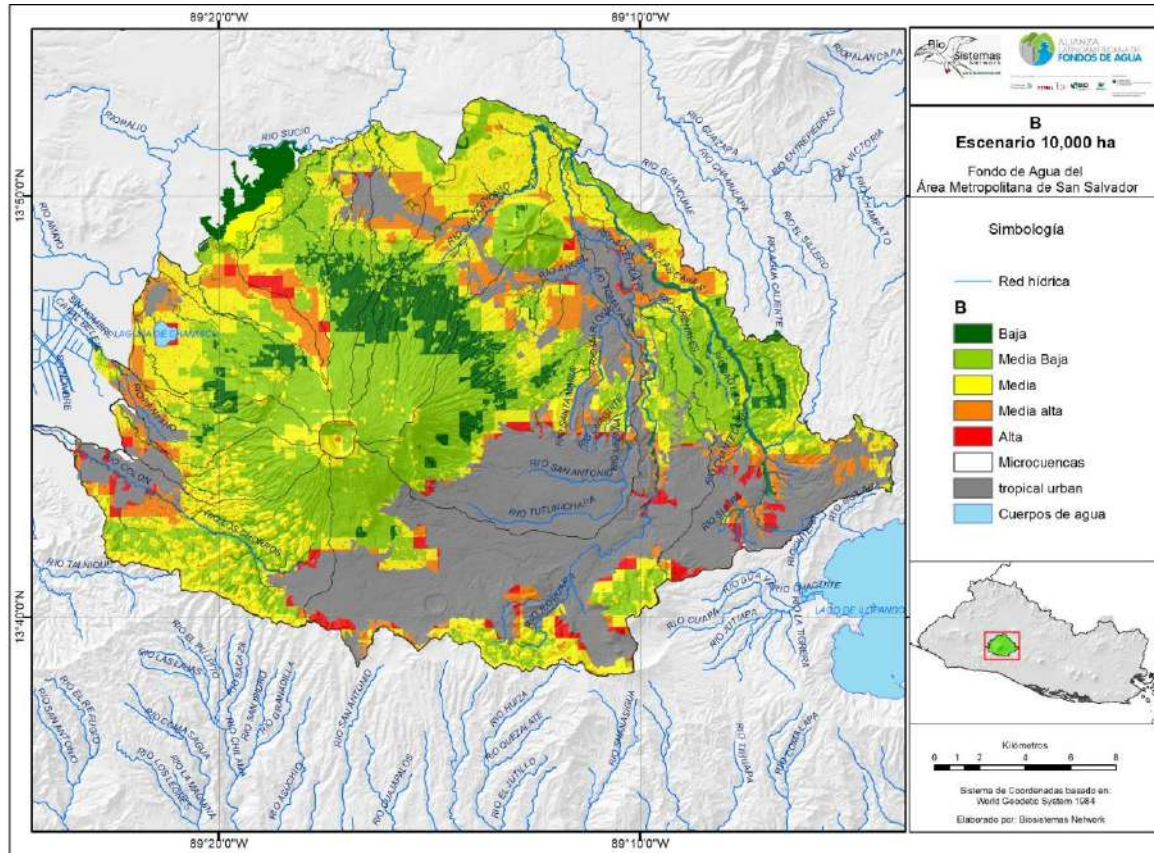


Figura 48. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 5,000 ha.
Período: 5 años.

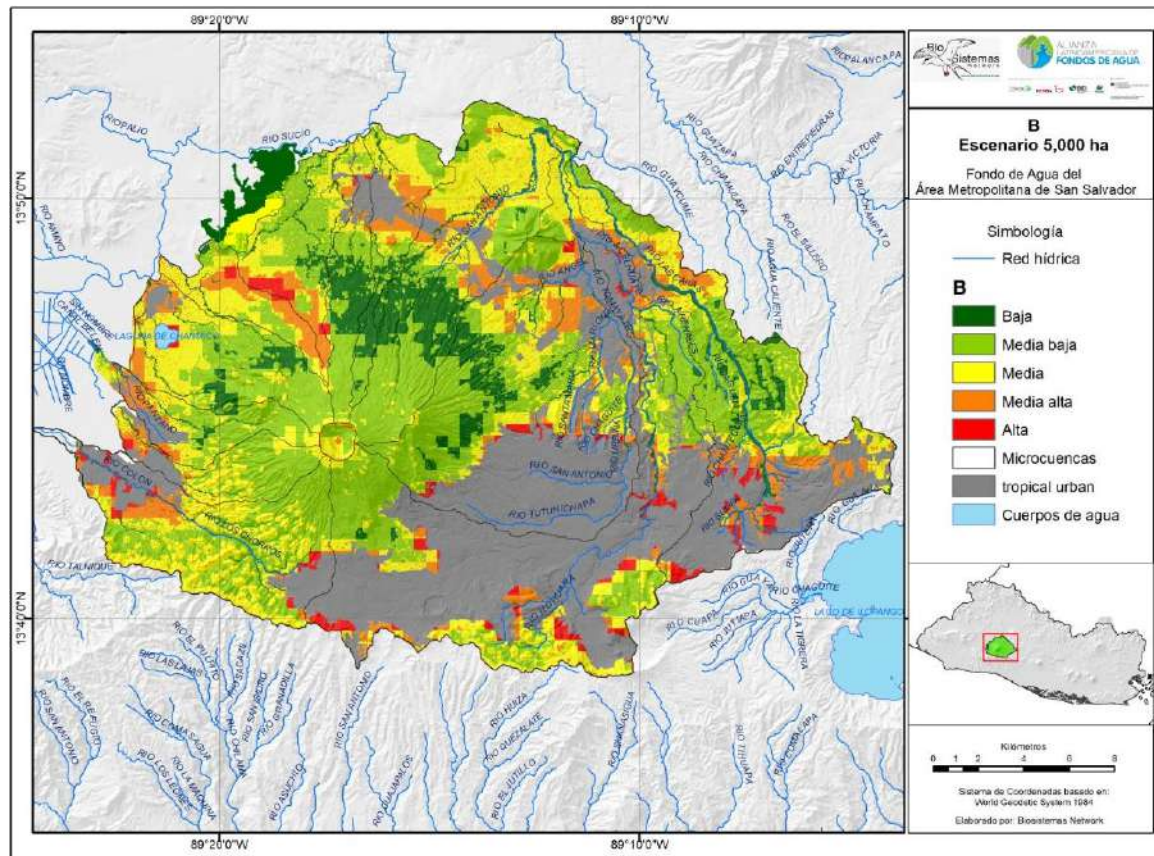


Figura 51. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 50,000 ha.
Período: 5 años.

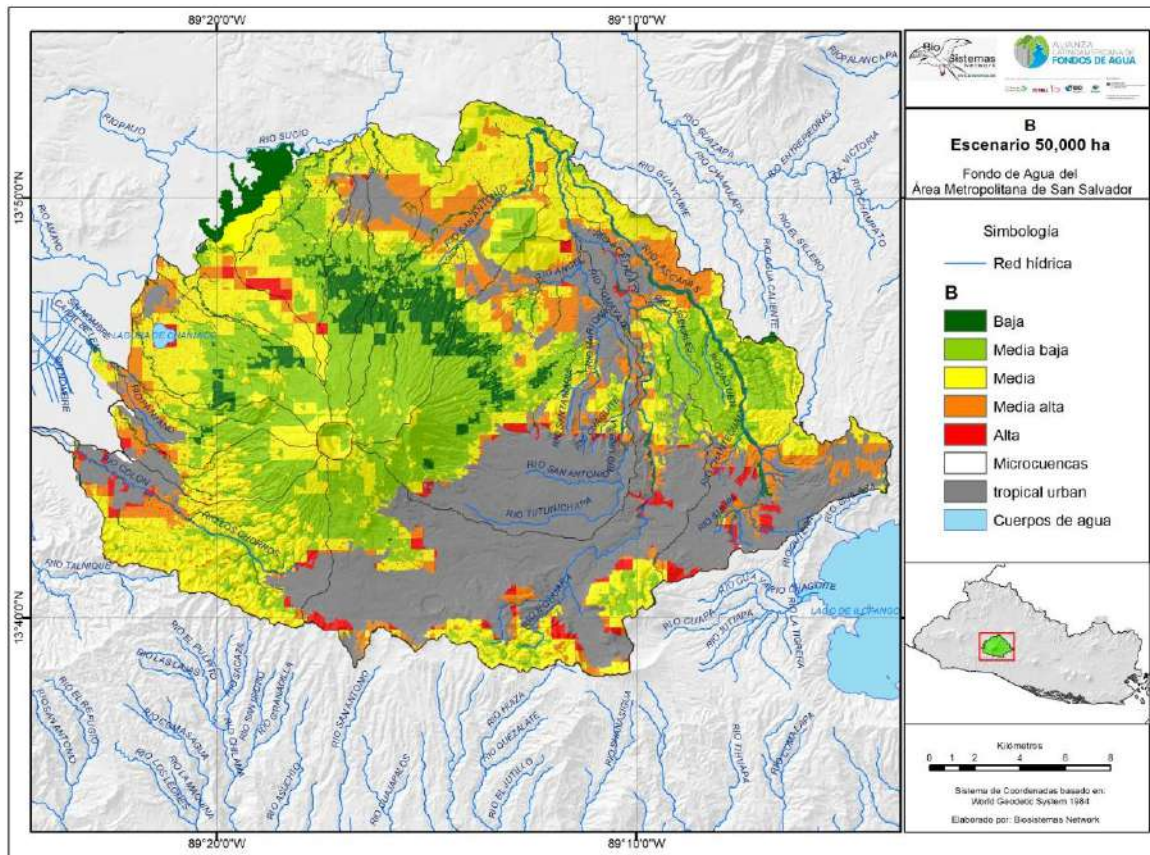
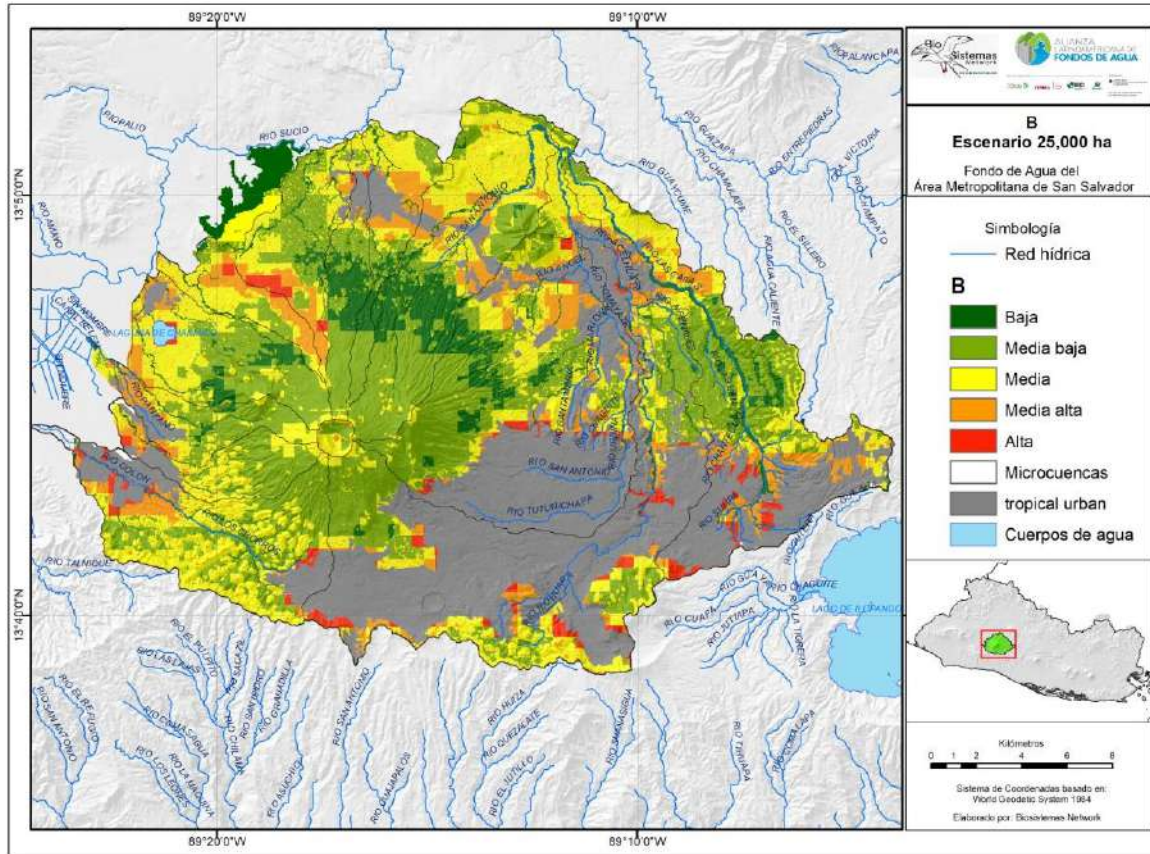


Figura 50. Mapa de Flujo lateral base en la RHI_AMSS, Escenario 25,000 ha.
Período: 5 años.



De forma similar, las figuras de la 52 a la 58 muestran un significativo incremento de la evapotranspiración a medida aumenta la superficie de intervención, debido al incremento propuesto en cobertura vegetal. En este caso, la diferencia de la evapotranspiración total anual entre un escenario de intervención de 50,000 ha, a un horizonte de 5 años, y la línea base actual, es de unos 2.2 millones de metros cúbicos; es decir, un promedio de 44.7 m³ por hectárea intervenida o 4.47 mm/m².

Figura 52. Evaporación total anual esperada (m³) en la RHI_AMSS, por escenario de intervención.

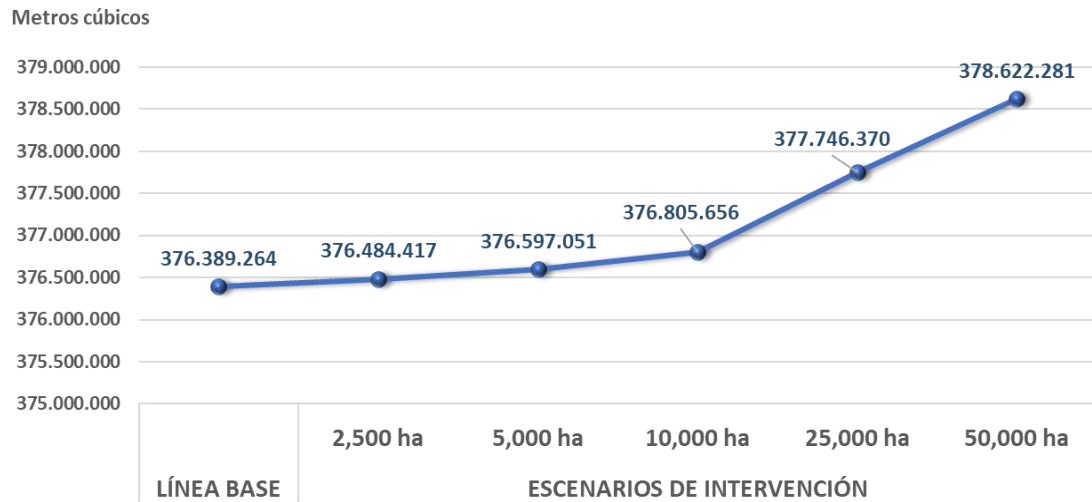


Figura 53. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Línea Base.

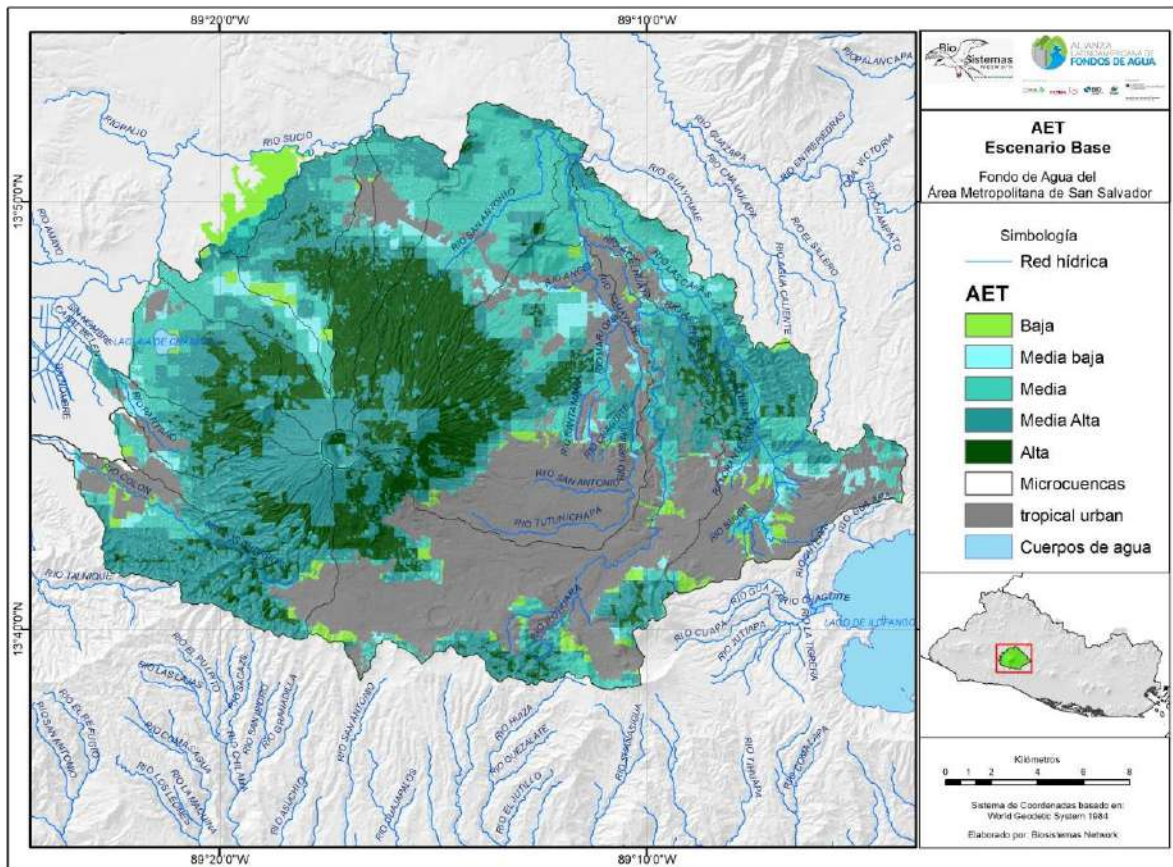


Figura 55. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 5,000 ha. Período: 5 años.

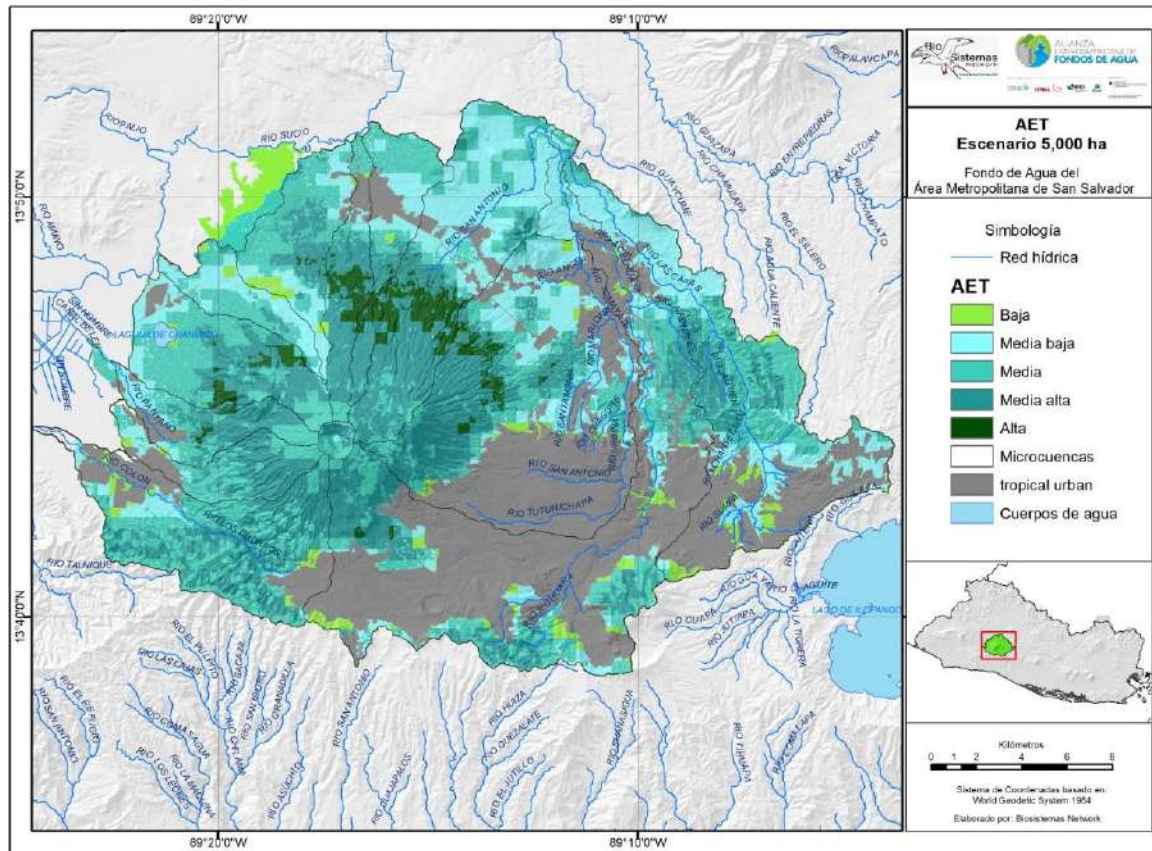


Figura 54. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 ha. Período: 5 años.

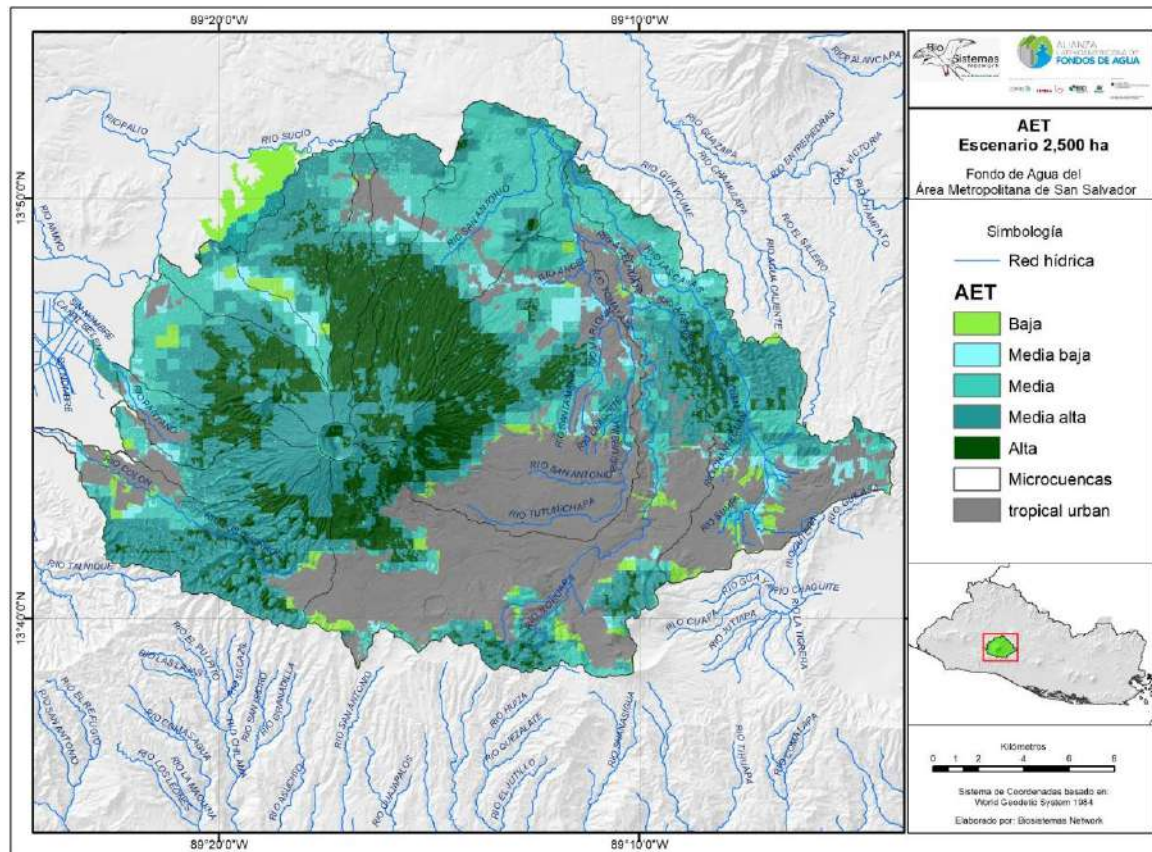


Figura 56. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 10,000 ha. Período: 5 años.

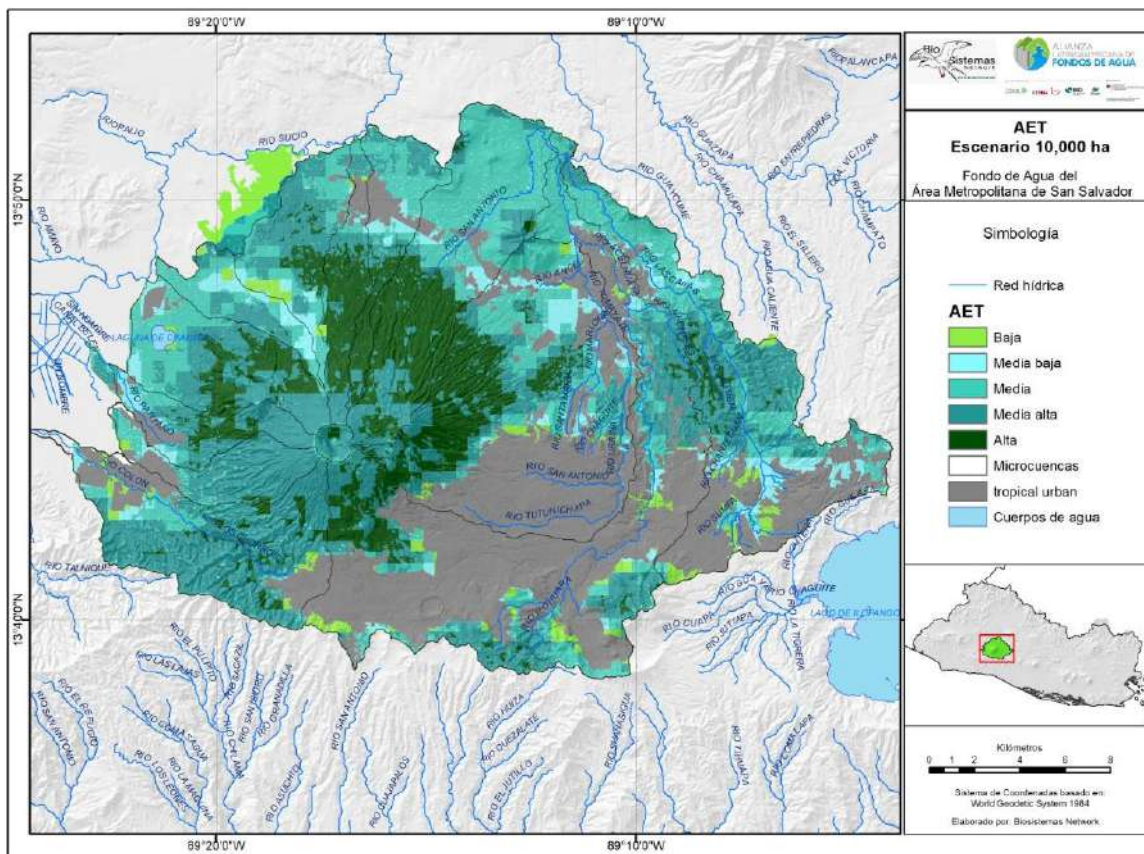


Figura 57. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 25,000 ha. Período: 5 años.

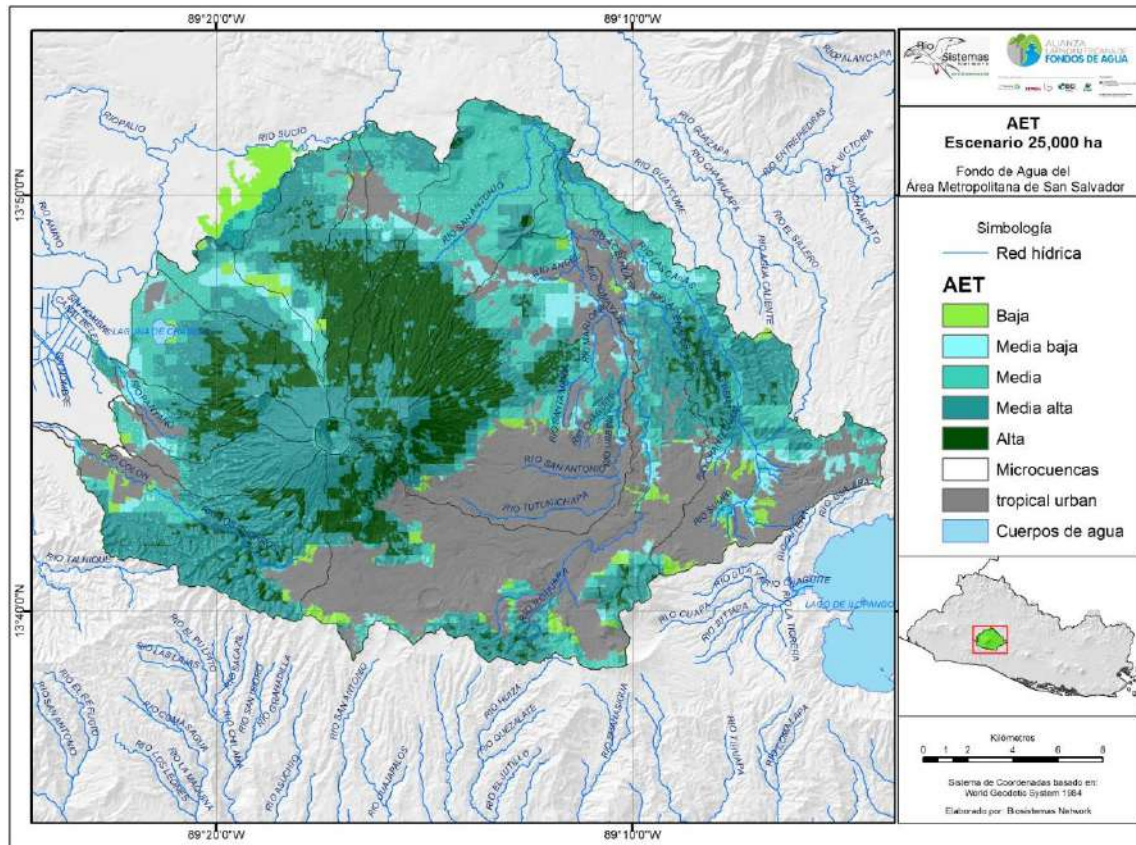
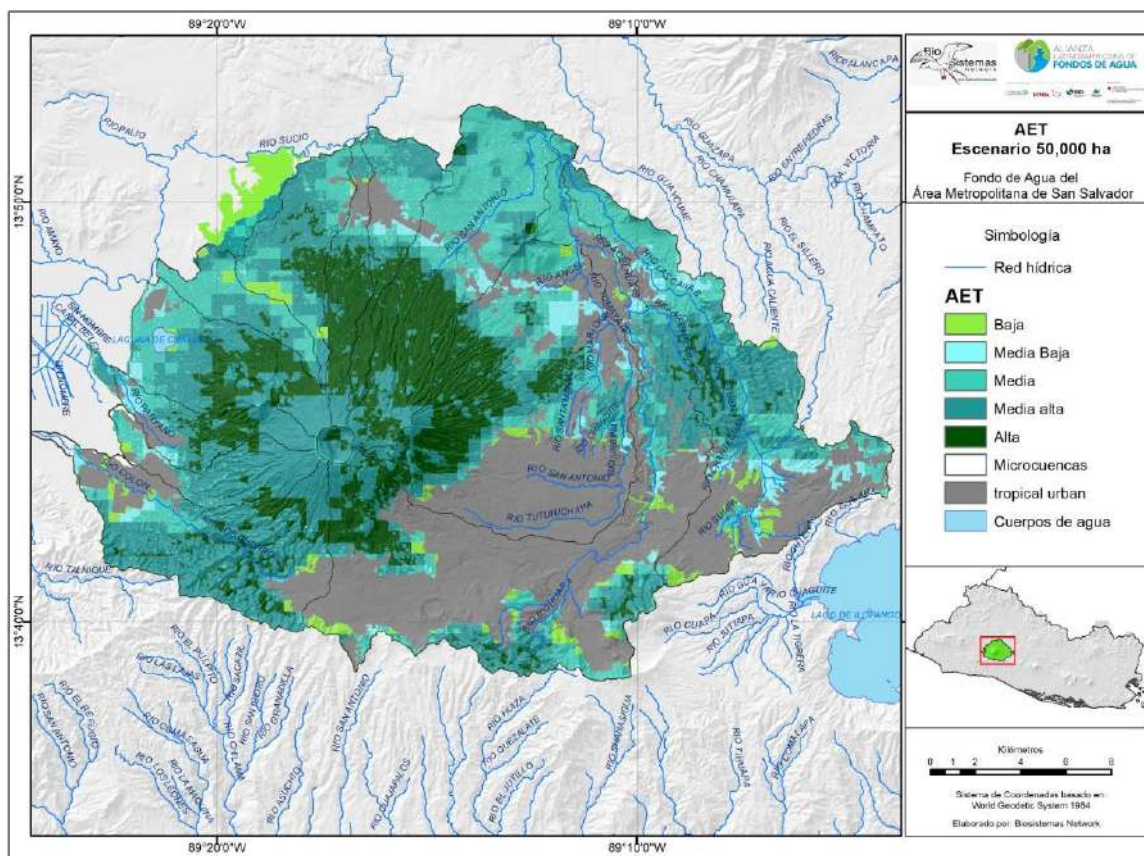


Figura 58. Mapa de Evapotranspiración en la RHI_AMSS, Escenario 50,000 ha. Período: 5 años.



El factor más significativo para este estudio, la cantidad de agua disponible para la infiltración profunda, también muestra un significativo incremento, directamente proporcional a las intervenciones propuestas. De acuerdo al modelo, se puede esperar un incremento del orden de los 2.7 millones de metros cúbicos del agua lluvia que se infiltra, comparando un escenario óptimo de intervención de 50,000 ha, a un horizonte de 5 años, con respecto a la línea base actual; es decir, un promedio de 53.2 m³ por hectárea intervenida o 5.3 mm/m² adicionales, disponibles para la infiltración y eventual recarga de acuíferos subterráneos. Figuras de la 59 a la 65.

Figura 59. Agua disponible para la infiltración (m³) en la RHI_AMSS, por escenario de intervención.

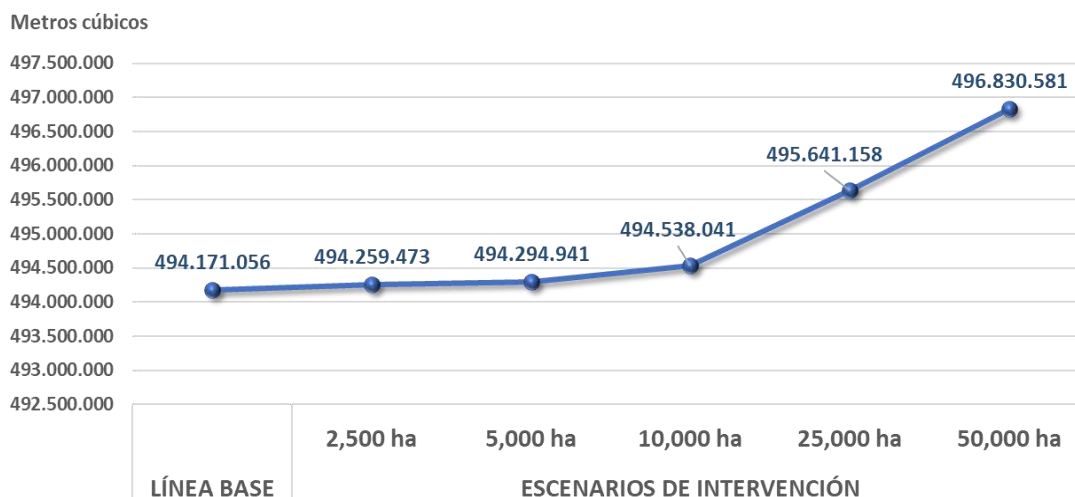


Figura 60. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, línea base.

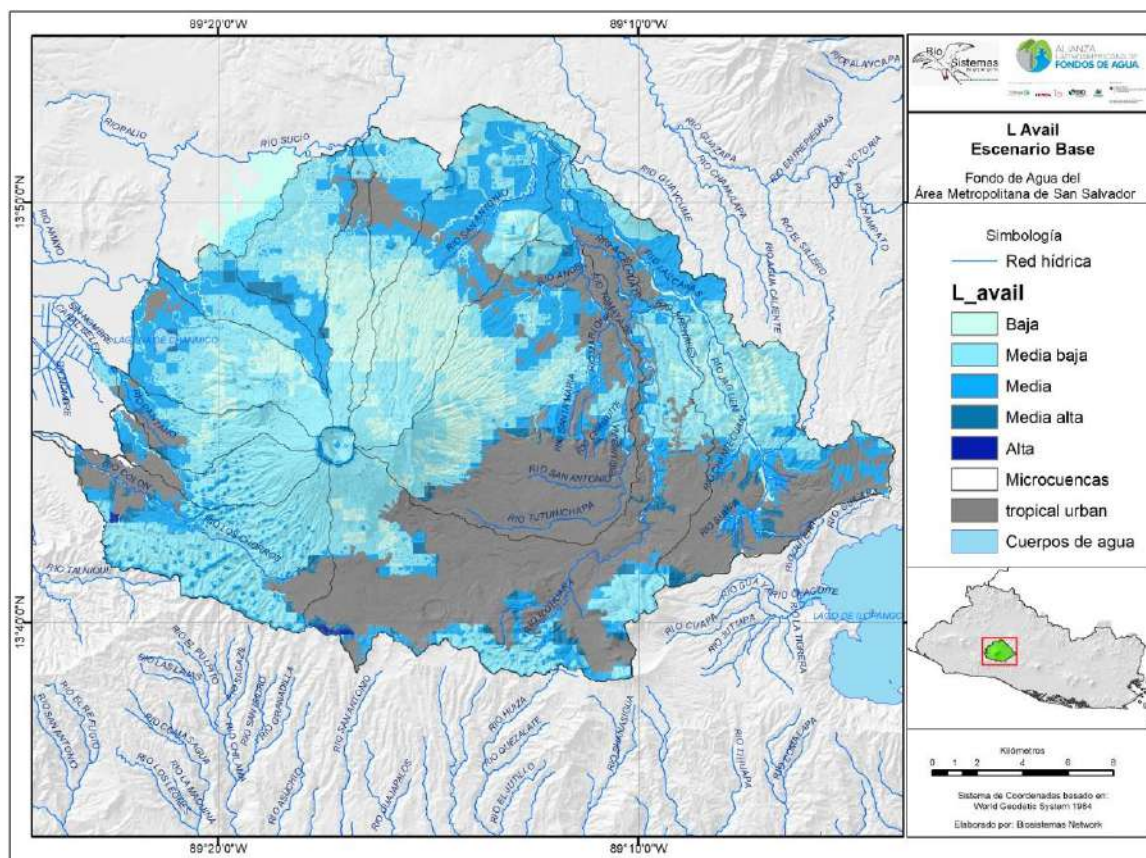


Figura 61. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 2,500 ha. Período: 5 años.

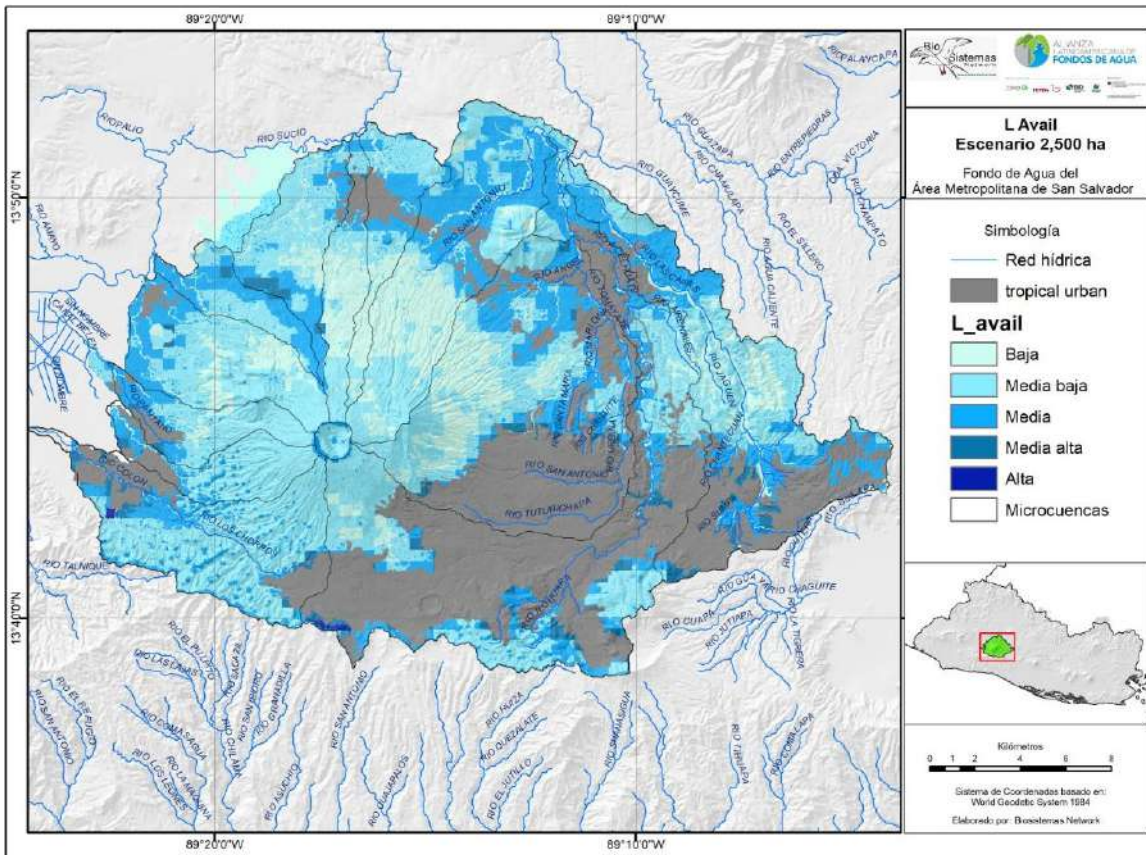


Figura 62. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 5,000 ha. Periodo: 5 años.

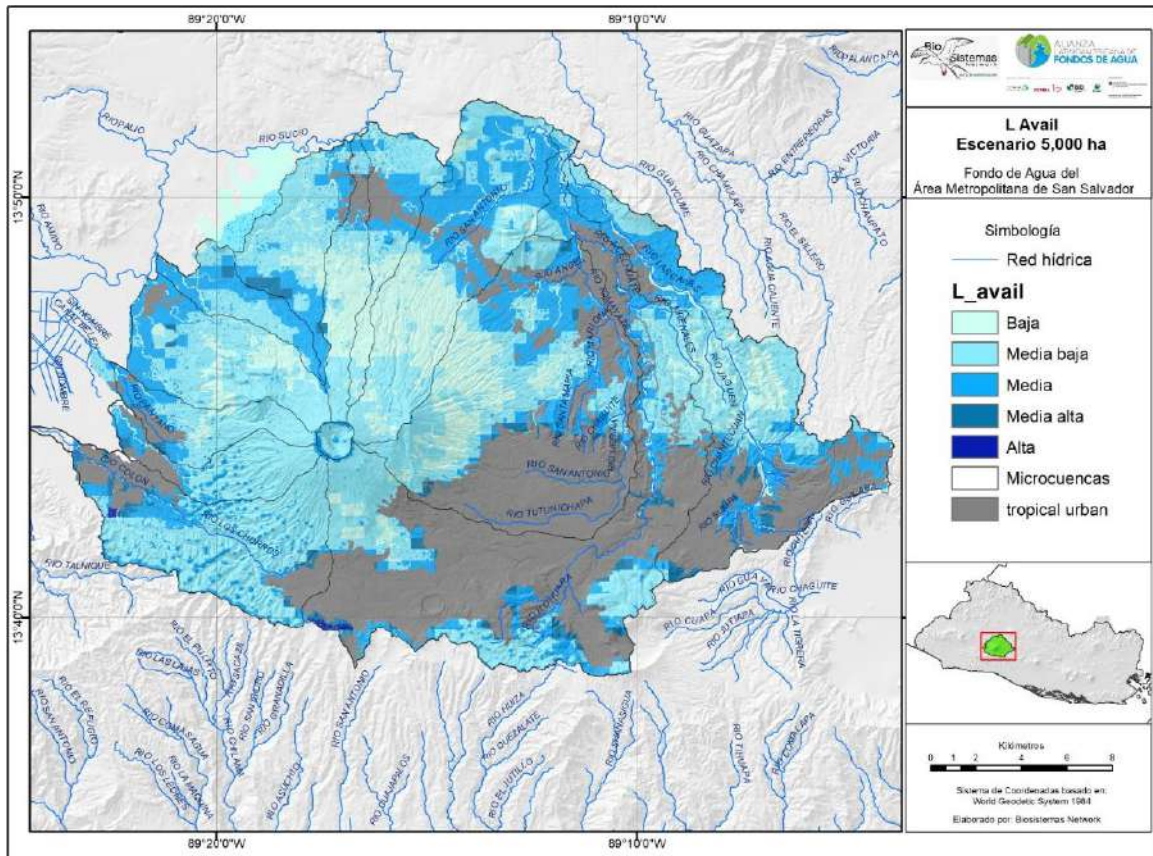


Figura 63. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 10,000 ha. Periodo: 5 años.

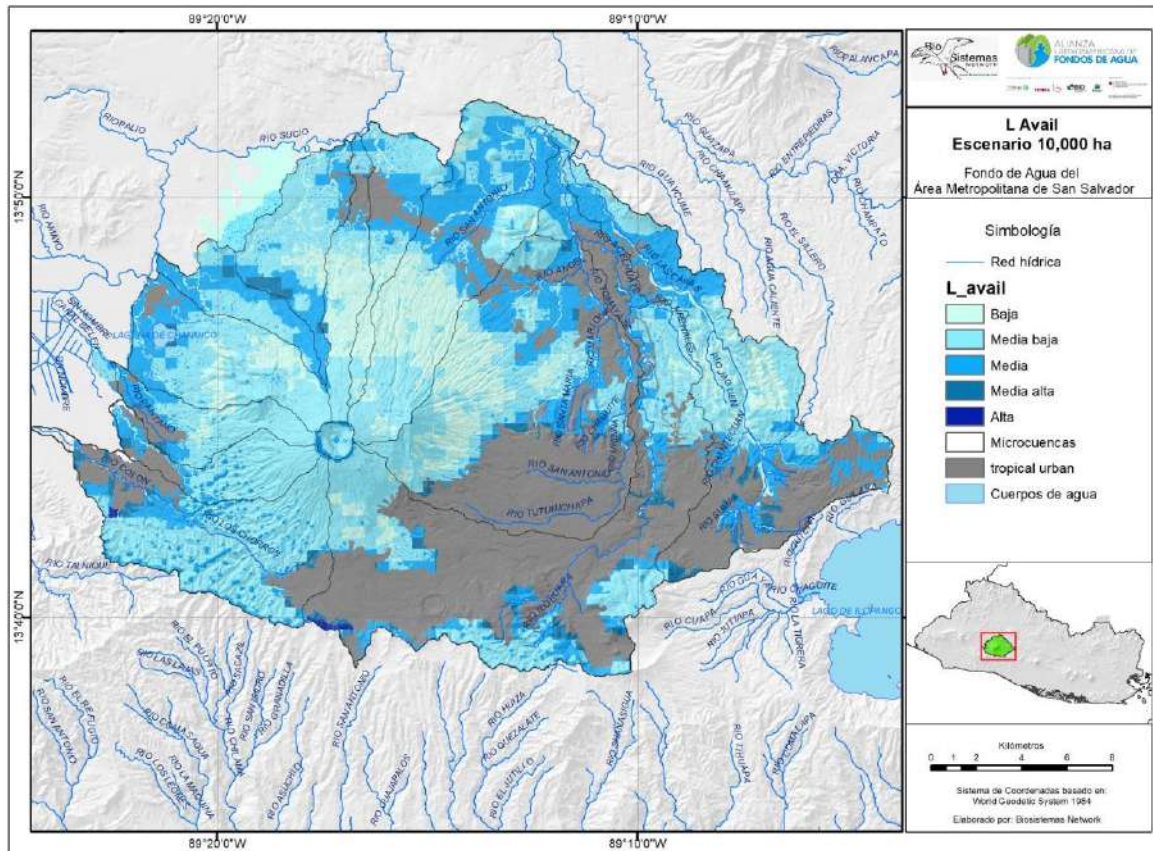


Figura 64. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 25,000 ha. Periodo: 5 años.

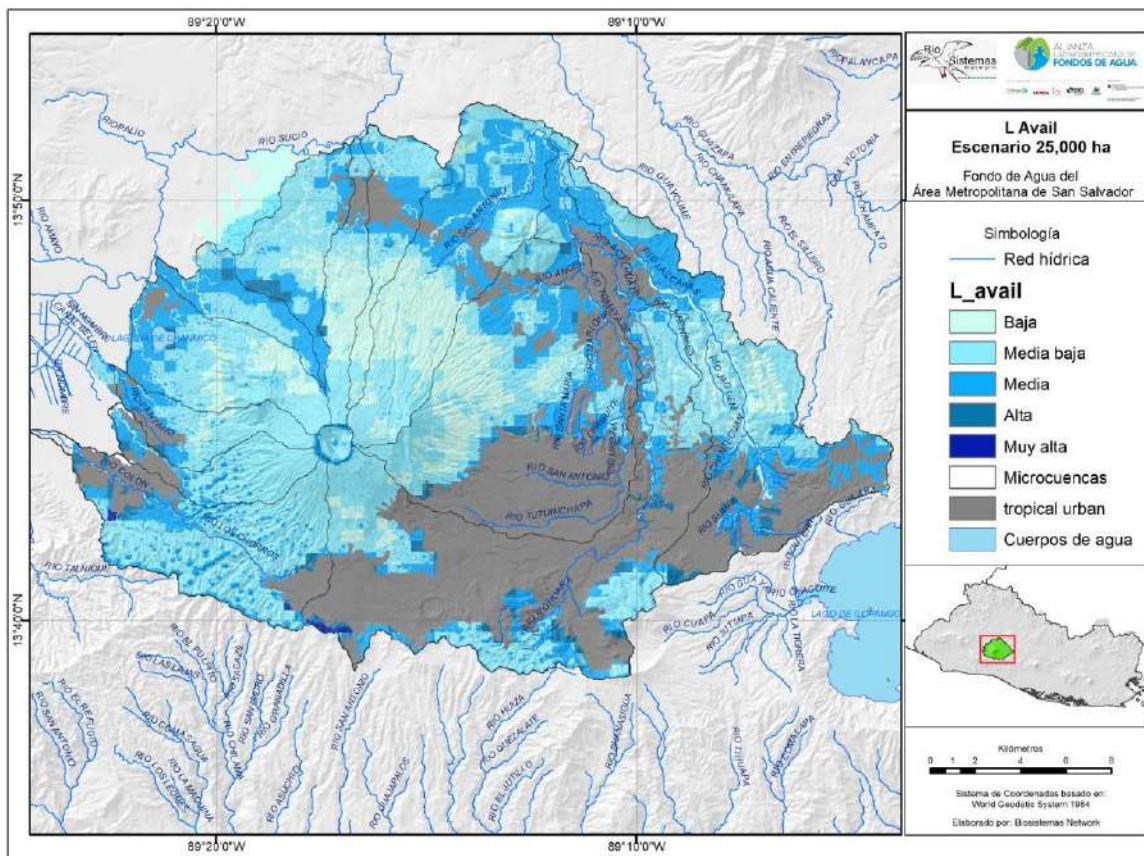
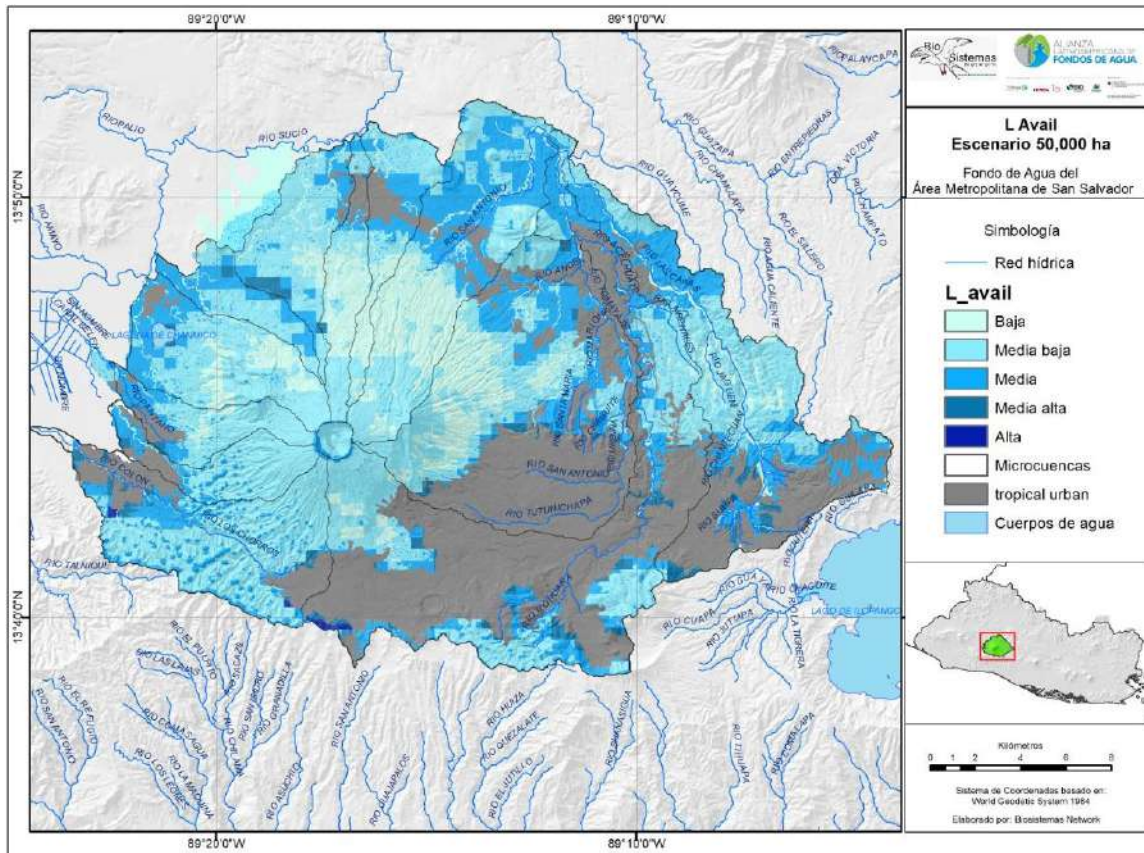


Figura 65. Agua disponible para la infiltración en la RHI_AMSS, Escenario 50,000 ha. Periodo: 5 años.



4.4. Escenario de NO Intervención

73

Dado que las condiciones socioeconómicas y dinámicas que han suscitados tales cambios se mantienen a la fecha y, con un considerable grado de certidumbre, se mantendrán en el futuro cercano, es posible concluir que los tipos y cantidades (tasas) de cambios registrados serán los mismos, o muy similares, durante los próximos 5 y quizá 10 años.

Los resultados muestran que las mayores pérdidas de cobertura (86.2% del total observado) se han dado en cuatro categorías: (a) Café bajo sombra, (b) Mezcla de bosques y agricultura, (c) Predios baldíos (suelo desnudo) y (d) Caña de azúcar; siendo la primera de éstas por mucho la más dominante (Fig. 66). Estos resultados indican que la pérdida de cafetales bajo sombra se está dando a un ritmo promedio de 108 ha por año; es decir, una tasa de deforestación anual de 0.720%, considerando la cobertura inicial de 14,991 ha de café bajo sombra a inicios del referido periodo. Sumando las pérdidas en todas las categorías con cobertura arbórea y arbustiva (Café bajo sombra, Mezcla de bosques y agricultura, Vegetación arbustiva, Café bajo sol, Bosque mixto semicaducifolio y Cultivos permanentes), la tasa anual promedio de deforestación corresponde al 0.675%.

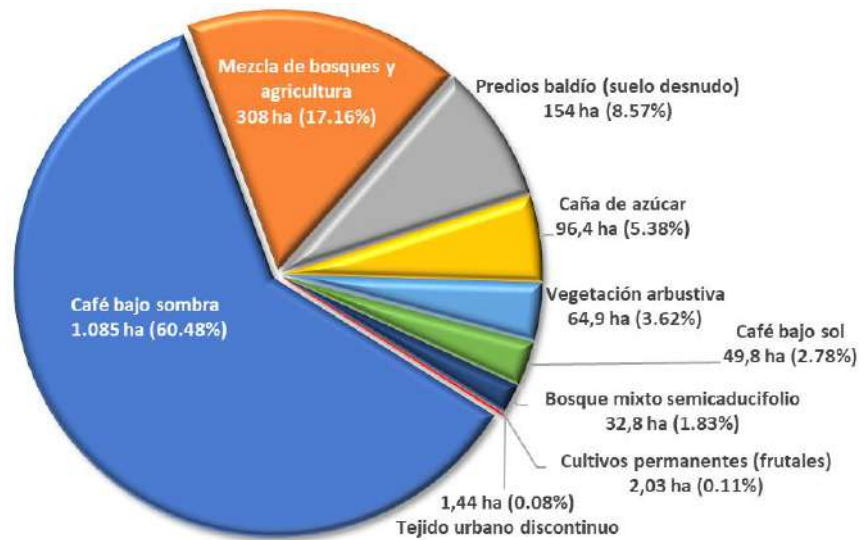


Figura 67. Pírdidas de usos y coberturas del suelo en la región hidrogeográfica de influencia del AMSS, entre 2010 y 2020.

Los usos y coberturas que, por otra parte, más se han expandido a raíz de tales cambios son cinco: (a)

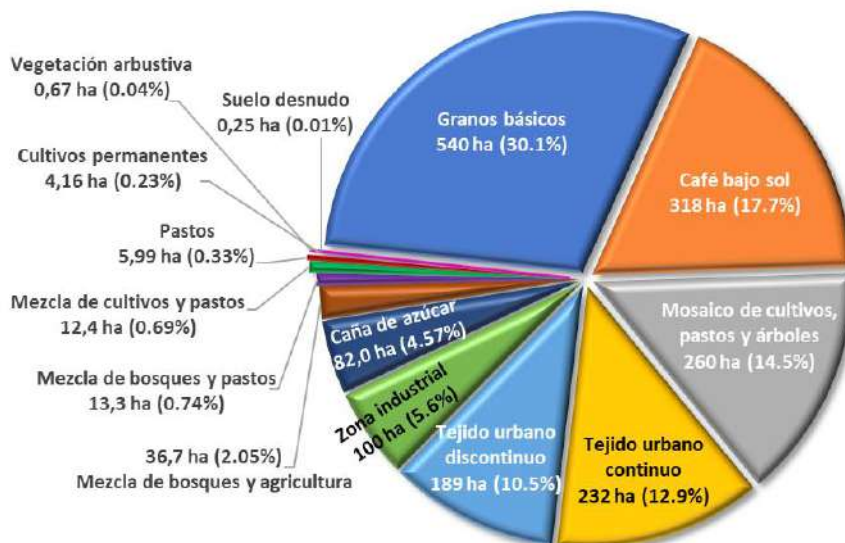


Figura 68. Ganancias en usos y coberturas del suelo en la región hidrogeográfica de influencia del AMSS, entre 2010 y 2020.

(a) Granos básicos, (b) Café bajo sol, (c) Mosaico de cultivos, pastos y árboles, (d) Tejido urbano continuo y (e) Tejido urbano discontinuo o mixto. En este caso, si bien predomina la expansión de cultivos de granos básicos (con un 30.1% del total), las cuotas están más homogéneamente distribuidas entre las restantes categorías (con crecimientos de entre 10.5% y 17.7%). En todo caso,

resulta claro que la expansión de la frontera agropecuaria, con un crecimiento combinado del 70.93%, domina sobre la expansión urbana, durante el periodo de tiempo analizado. (Fig. 67)

Cabe aclarar, que los datos antes presentados corresponden a los datos reales observados; por lo que resulta normal que algunas categorías se registran como reducciones en el primer caso, pero como incrementos en el segundo, como por ejemplo los cultivos de Café bajo sol, que si bien en algunos sitios disminuyeron, aumentaron en muchos otros; de manera que el resultado neto es hacia la expansión. En todo caso, como antes se señaló, es de esperar que, tanto las tendencias hacia la reducción como hacia la expansión, se mantengan durante los próximos años a razón de tasas anuales cercanas a los promedios calculados.

Utilizando la metodología Limotech (Neitsch *et al.*, 2005), que se basa en los Números Curva o coeficientes del escurrimiento del suelo para diferentes coberturas/usos y tipos de suelos, es posible estimar que los cambios antes descritos en la composición y estructura del paisaje de la RHI_AMSS durante la última década, han tenido como consecuencia un incremento neto de la esorrentía – y por tanto una disminución igual en el volumen de agua disponible para la infiltración y recarga de mantos acuíferos – del orden de los cinco millones de metros cúbicos por año. (Tabla de cálculo en Anexo 4)

IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



A pesar de la falta de datos detallados que permitieran la calibración de los modelos utilizados, los resultados obtenidos están en concordancia con lo esperado, y los valores numéricos calculados son consistentes con rangos conservadores, que pueden considerarse de alta probabilidad.



Los modelos aplicados permiten tener una estimación objetiva de las tendencias y volúmenes de los principales indicadores de rendimiento hídrico (escorrentía, evapotranspiración, flujo lateral y agua disponible para la infiltración/recarga) que podrían esperarse como consecuencia de la implementación de las actividades de intervención propuestas, bajo diferentes escenarios de alcance (2,500; 5,000; 10,000; 25,000 y 50,000 hectáreas) y su comparación con la situación actual (línea base).



Si bien estos datos numéricos, especialmente en cuanto a los volúmenes de agua, arrojados por los modelos, son – como ya se dijo – consistentes entre ellos y con lo esperado, y se encuentran dentro de rangos de alta probabilidad, los mismos deben ser vistos con cautela y ser adecuadamente recalculados una vez se cuente con información detallada de campo.



Las áreas priorizadas por los modelos coinciden casi en su totalidad con lo esperado por los especialistas del equipo consultor.



Aunque la situación hídrica del Área Metropolitana de San Salvador no es alarmante aún, si nada se hace y las dinámicas continúan la misma tendencia de deterioro observada durante los últimos 10 años, la seguridad hídrica local podría verse amenazada en un futuro cercano.



La expansión y transformación de la frontera agrícola es, y ha sido en las últimas décadas, el proceso dominante de transformación del paisaje en la región hidrogeográfica de influencia del Área Metropolitana de San Salvador.



A partir de los resultados de las modelaciones desarrolladas, puede concluirse que las soluciones propuestas por el Fondo de Agua tienen la capacidad de frenar y, en algunos casos, incluso revertir la actual tendencia al deterioro, haciendo un aporte decisivo para la seguridad hídrica futura.



De las tablas y gráficos de los principales indicadores hídricos calculados (escorrentía, evapotranspiración, flujo lateral y agua disponible para la infiltración/recarga) para los diferentes escenarios de intervención, se puede inferir que el escenario de intervención de 10,000 *ha* marca un punto de inflexión en la efectividad de las medidas propuestas y podría por tanto considerarse como el umbral mínimo deseado del alcance de las intervenciones.



Se recomienda concentrar inicialmente las intervenciones en un área relativamente pequeña; esto con el fin de lograr una mayor efectividad y eficiencia (relación costo/beneficio) de las intervenciones, así como para concentrar impactos y evidenciar más fácilmente los efectos transformadores de las intervenciones propuestas.



La coordinación con el MARN, el apoyo de posibles benefactores, y la activa participación de la mayoría de propietarios privados de tierras, serán indispensables para alcanzar las ambiciosas metas en términos de las extensiones que es necesario intervenir para lograr impactos significativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDA. 2017. Boletín Estadístico. Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. 156 pp.
- Calvache, A., S. Benítez y A. Ramos. 2012. Fondos de Agua: Conservando la Infraestructura Verde. Guía de Diseño, Creación y Operación. Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua. The Nature Conservancy, Fundación FEMSA y Banco Interamericano de Desarrollo. Bogotá, Colombia. 144p.
- CNR. 2005. Modelo Digital de Elevación, a partir de mapas topográficos escala 1:25000 de 1978. Centro Nacional de Registros (CNR). San Salvador, El Salvador.
- Denys, J.R. & Bourne, W. 1962. Levantamiento General de Suelos. Dirección General de Recursos Naturales Renovables, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). San Salvador. 64 pp.
- Castillo, J.; D. Arévalo; A. Hernández; J.R. Duarte y J.P. Domínguez. 2019. Análisis de la Situación para un Fondo de Agua, Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador: Fase de Factibilidad. San Salvador, El Salvador. 88 pp.
- DIGESTYC. 2017. VI Censo de Población y V de Vivienda. Dirección General de Estadística y Censos / Ministerio de Economía – MINEC. San Salvador, El Salvador.
- MARN. 2015. Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 279 pp.
- Miranda, K.; Santos, P. 2014. The mayor council and the Planning office for Metropolitan Area of San Salvador, as a model for urban management. Lincoln Institute of Land Policy. 44 pp.
- Neitsch, S.L.; J.G. Arnold; J.R. Kiniry & J.R. Williams. 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory – Agricultural Research Service. Temple, Texas. 494 pp.
- PNAPS, 2017. Plan Nacional de Agua y Saneamiento. Administración Nacional de Acueductos y alcantarillados. Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de España. 240 pp.
- Renard, K.G. & Freimund, J.R. 1994. Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R Factor in the Revised USLE. Journal of Hydrology, 157, 287-306.
- Schosinsky, G.N. 2006. Cálculo de la Recarga Potencial de Acuíferos Mediante un Balance Hídrico de Suelos. Revista Geológica de América Central, 34-35: 13-30. ISSN: 0256-7024.

Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D., and Douglass, J. 2018. InVEST 3.7.0.post22+ug.h3b687e57fad0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.

Vogl, A.; H. Tallis, J. Douglass, R. Sharp, S. Wolny, F. Veiga, S. Benítez, J. León, E. Game, P. Petry, J. Guimerães, J.S. Lozano. 2015. Resource Investment Optimization System: Introduction & Theoretical Documentation. Natural Capital Project, Stanford University / The Nature Conservancy / Fauna & Flora International. 101 pp.

Referencias digitales:

<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

<https://swat.tamu.edu/>

<https://www.limno.com/portfolio-posts/quantifying-watershed-restoration-benefits-in-community-water-partnership-projects/>

ANEXO I

Descripción de Parámetros a Evaluar

Topografía / Pendiente. El grado de inclinación del terreno es un factor determinante en la velocidad de desplazamiento de la escorrentía; lo que también afecta el tiempo que el agua tiene para infiltrarse o ser absorbida. En terrenos con suelos de igual textura/permeabilidad y cobertura, la velocidad de la escorrentía es directamente proporcional a la pendiente e inversamente proporcional al grado de infiltración.

Precipitación. Es claro que la cantidad de lluvia es directamente proporcional a la capacidad de recarga de los sistemas hídricos, tanto superficiales como subterráneos, que dependen o se conectan con una cuenca; pero la estacionalidad y dispersión de la lluvia también resultan determinantes. Al presentarse de manera más dispersa y homogénea (mayores períodos de lluvia de menor intensidad) la lluvia puede ser absorbida e incorporada por el sistema de manera más eficiente; mientras que las lluvias cortas e intensas aumentan el volumen y velocidad de la escorrentía, incrementando así el riesgo de inundaciones.

Erosividad de la Lluvia. El poder erosivo de la lluvia incrementa según su volumen e intensidad, debido a la energía (energía cinética) que ésta acumula al caer. A mayor fuerza mayor erosión del suelo, mayor escorrentía y menor infiltración.

Erodabilidad del Suelo según Tipo. Las características propias de un suelo (textura, cohesión, composición, etc.) están íntimamente ligadas a la facilidad o dificultad con que éste se erosiona o no. Si el suelo se erosiona, también su capacidad de infiltración disminuye.

Profundidad del Suelo. Como antes se mencionó, a medida el suelo se erosiona disminuye su capacidad de absorción, infiltración y retención de agua. La profundidad también influencia significativamente el tipo, efectividad y eficiencia de las medidas a implementar. Así, por ejemplo, se puede esperar que el costo y de acciones como la reforestación y restauración aumentará, en tanto que su efectividad disminuirá a medida disminuye la profundidad del suelo.

Textura / Permeabilidad del Suelo. La textura (en parte derivada de la composición, pero también del nivel de compactación) es el factor más determinante en la permeabilidad o capacidad de infiltración de un suelo dado. A mayor porosidad, mayor absorción, infiltración y retención.

Cobertura / Uso del Suelo. La cobertura presente o el uso que de un suelo dado se hace tiene un gran efecto sobre la capacidad de infiltración, la susceptibilidad a sufrir erosión y formar escorrentía que éste presenta. Una cobertura densa amortigua la lluvia, reduciendo por tanto la energía cinética de ésta; también disminuye la penetración de los rayos solares y la acción del viento, reduciendo así la evaporación y aumentando el tiempo que el agua tiene para poder infiltrarse; también puede bloquear físicamente el avance de la escorrentía, disminuyendo así la erosión y aumentando la infiltración potenciales; puede sumar al grado de cohesión y por tanto de estabilidad del suelo. Además, las raíces de las plantas evitan la compactación del suelo y forman “canales” que facilitan la infiltración del agua lluvia.

Actividades Viables según Uso. No todas las actividades que se desea impulsar resultan aplicables, necesarias o beneficiosas en todos los terrenos. Por lo que este es un factor básico a tomar en cuenta al

momento de planificar las intervenciones.

Erodabilidad del Suelo según Uso. Si bien la susceptibilidad de un suelo dado a sufrir erosión depende en primera instancia de sus características propias, como antes se mencionó, la naturaleza de la cobertura presente o de los usos que de él se hagan pueden afectar dicha susceptibilidad, disminuyéndola o aumentándola.

Escorrentía según Uso. La cobertura o uso también afectan en gran medida el volumen y la velocidad de la escorrentía que se genera; lo que a su vez afecta, como ya se ha dicho, la erosión del suelo y la facilidad/dificultad con que el agua se infiltra.

Evapotranspiración Real. La cantidad de agua que se evapora del suelo y transpira por la vegetación afecta directamente la cantidad de agua disponible para la recarga de los sistemas naturales.

Susceptibilidad al Cambio de Uso del Suelo. No todos los terrenos tienen la misma probabilidad de sufrir cambios en el uso del suelo. Por su fertilidad algunos terrenos tendrán más probabilidades de ser convertidos al uso agropecuario, en tanto que otros por su facilidad de acceso pueden ser urbanizados. Por la baja rentabilidad experimentada durante los últimos años en el cultivo del café, muchas fincas están sufriendo una conversión acelerada. En algunos casos el cambio en el uso puede ser favorable, como en el caso de los pastizales que son transformados a sistemas agrosilvopastoriles, mientras que en hábitat naturales cualquier cambio será negativo.

Grado de Conservación / Deterioro de Ecosistemas Naturales. La extensión, ubicación, conectividad, grado de conservación y protección de los ecosistemas naturales son la base para la conservación/restauración de la biodiversidad, así como para la cantidad y calidad de los servicios ambientales de los cuales depende la calidad de vida de los habitantes humanos.

Presencia / Ausencia de Especies de Particular Interés para la Conservación (EPIC). La presencia/ausencia de Especies de Particular Interés para la Conservación (EPIC: especies bajo algún grado de amenaza, endémicas, de importancia socio-económica o cultural, etc.) es el mejor indicador de la salud de los ecosistemas de los cuales depende la provisión de los servicios ambientales.

N° de Beneficiarios. El fin último de un Fondo de Agua es mejorar el aprovisionamiento y la calidad del agua necesaria para las diferentes actividades del desarrollo y bienestar humano, por lo que el número de beneficiarios de las intervenciones es un parámetro principal. Sin embargo, por las características propias de las microcuencas que conforman la Región Hidrogeográfica de Influencia del AMSS, el agua que se infiltra recarga el gran sistema hídrico subterráneo y es por tanto difícil señalar beneficiarios asociados a X o Y área o microcuenca, para el caso del primero de los objetivos seleccionados. Lo mismo sucede con el objetivo secundario de conservar y restaurar la biodiversidad nativa, pues los beneficios los experimentará toda la población. El único caso en que se puede hablar de beneficiarios asociados a zonas específicas es en el del control de la escorrentía y reducción de los riesgos asociados, puesto que se cuenta con mapas fiables del drenaje de toda la región.

ANEXO 2

Informe de Procedimientos en Q-SWAT

1. Instalación de aplicaciones

Se instalaron las siguientes aplicaciones: QGIS 3.10, SWAT+ , Microsoft MPI, SQLiteStudio (para el manejo de la base de datos FAO User Soil y Plant) y JAMES+ (utilizado para la calibración del modelo hidrológico mediante 1 estación de monitoreo de caudal localizada en Guazapa).

2. Preparación de los datos

Los datos utilizados en SWAT+ fueron principalmente 2:

a) Mapa de cobertura y uso de la tierra

Para el escenario “Base”, se utilizó el mismo mapa de Cobertura y uso de la tierra preparado para correrlo en RIOS y posteriormente personalizado para utilizarlo en QSWAT+.

Para los escenarios de portafolio, se utilizaron los obtenidos mediante RIOS Investment Portfolio, habiéndose utilizado los escenarios de 2,500 ha, 5,000 ha, 10,000 ha, 25,000 ha y 50,000 ha. En resumen, se utilizaron 6 escenarios (base + portafolios).

A cada escenario se le agregó su correspondiente campo “name” que contiene la codificación estandarizada de SWAT, los cuales a manera de ejemplo se muestran los del escenario Base:

b) mapa de texturas

Los mapas de texturas utilizados fueron obtenidos a partir del Levantamiento General de Suelos de El Salvador escala 1:50000 (Ministerio de Agricultura y Ganadería), al cual se le creó un campo nuevo que contendría la codificación de texturas según la base de datos FAO_User_Soil de QSWAT (figura 1).

OID	Value	Count	NAME
0	1	919053	LS
1	3	470656	L
2	5	7553	S
3	6	359669	SL
4	7	253401	R
5	8	431800	LS1
6	9	262234	C1
7	10	374954	L1
8	11	1302831	LS2
9	12	744985	L2
10	13	17506	CL1
11	14	135789	CL2
12	15	60297	SL1

OID	Value	Count	NAME
0	1	1490	PERM_CROP
1	2	4994	SHRB
2	3	154594	COFF_SML
3	4	18242	COFF
4	5	73787	ORWO
5	6	223762	URHO
6	7	10599	BASE_LAVA
7	8	30783	CORR_SV
8	9	2279	PAST
9	10	20862	PAST_MOSAK
10	11	45769	SUGC
11	12	1140	Free_Suit
12	13	3217	WATR
13	14	227	BARR
14	15	2225	Free_Suit
15	16	12685	LAVA_VEG
16	17	7469	Free_Suit

Figura 1. Campos Name y SNAM creados a los mapas.

3. Modelación en QSWAT+

La modelación en QSWAT+ fue desarrollada mediante la instalación del Plugin respectivo en QGIS, que al activarlo se muestran los 4 pasos del proceso que hay que completar (figura 2), los cuales se describen:



Figura 2. Interfase de QSWAT+

Paso 1. Delinear la cuenca o territorio en estudio

Para ello se utilizó un DEM de 30 metros de pixel (obtenido a partir de ASTER IMAGE), con el cual se obtienen las subcuencas del territorio y los drenajes principales (figura 3).

Mediante el QGIS 3.10, se utilizó el QSWAT+, delimitando las subcuencas de trabajo del área de estudio cada 100 hectáreas, rangos de pendientes de 5, 15, 25 y 50%, para crear las Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU).

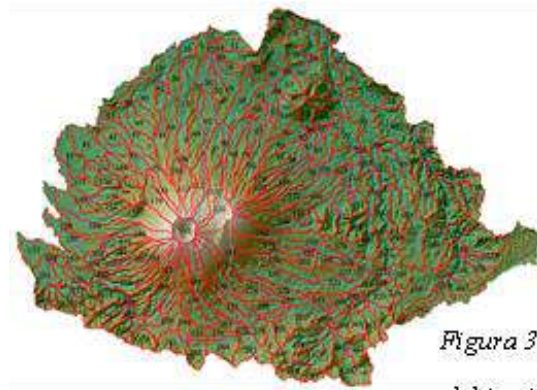


Figura 3. Microcuencas del territorio de trabajo

Paso 2 Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRUs)

Para este paso se necesitan dos insumos principales: el mapa de cobertura y uso de la tierra y el mapa de texturas, cada uno de ellos con su respectiva tabla de códigos que vinculen los mapas con las bases de datos **FAO User Soil** y **Plant**, de **SWAT+** (figuras 4, 5, 6 y 7).

LANDUSE_ID	SWAT_CODE
1	urhd
2	PAST_MOSAIC
3	SUGC
4	frst_sums
5	crwo
6	SHRB
7	COFF_SHA
8	CORN_SV
9	BARE_LAVA
10	BARR
11	LAVA_VEG
12	frse_sums
13	COFF_BEST
14	WATR
15	PAST_BEST
16	PERM_CROP
17	COFF
18	PAST
19	AGRL_BEST
20	frse_suhf
21	SUGC_BEST

SOIL_ID	SNAM
1	LS
2	CL
3	L
4	S
5	SIL
6	R
7	LS1
8	C1
9	L1
10	LS2
11	L2
12	CL1
13	CL2
14	SIL1

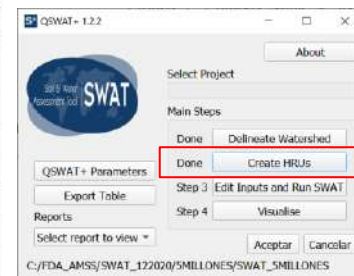


Figura 4. Tablas de códigos SWAT+ de cobertura y uso de la tierra y de texturas utilizadas en los mapas de trabajo

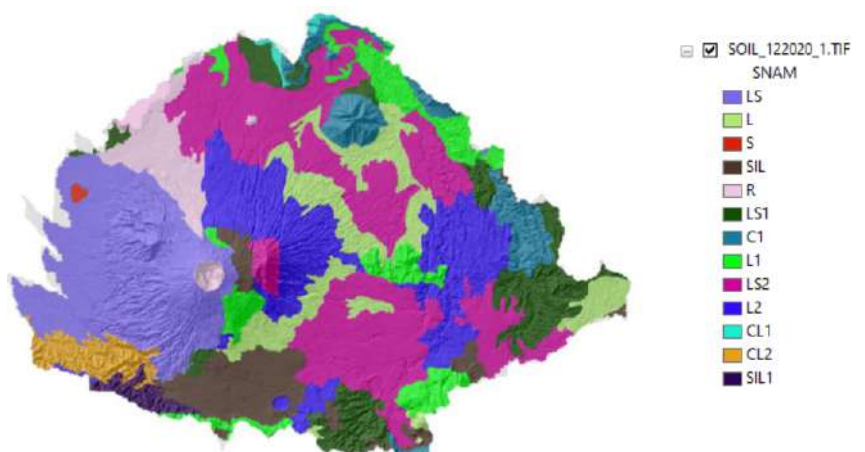


Figura 5. Mapa de texturas utilizado en SWAT+

modificando los parámetros de **Climate, Simulation y Basin**:

La definición de los parámetros del componente **CLIMATE** fue la siguiente:

WEATHER GENERATION

a) **Weather Generator**: se utilizó la opción “**using observed weather data**”

b) **Weather Station**: basada en los datos de lluvia del período de 1979 al 2014, de 4 estaciones meteorológicas obtenidas de la pagina de Global Weather Generator for SWAT: <https://globalweather.tamu.edu/> (figura 8 y 9)

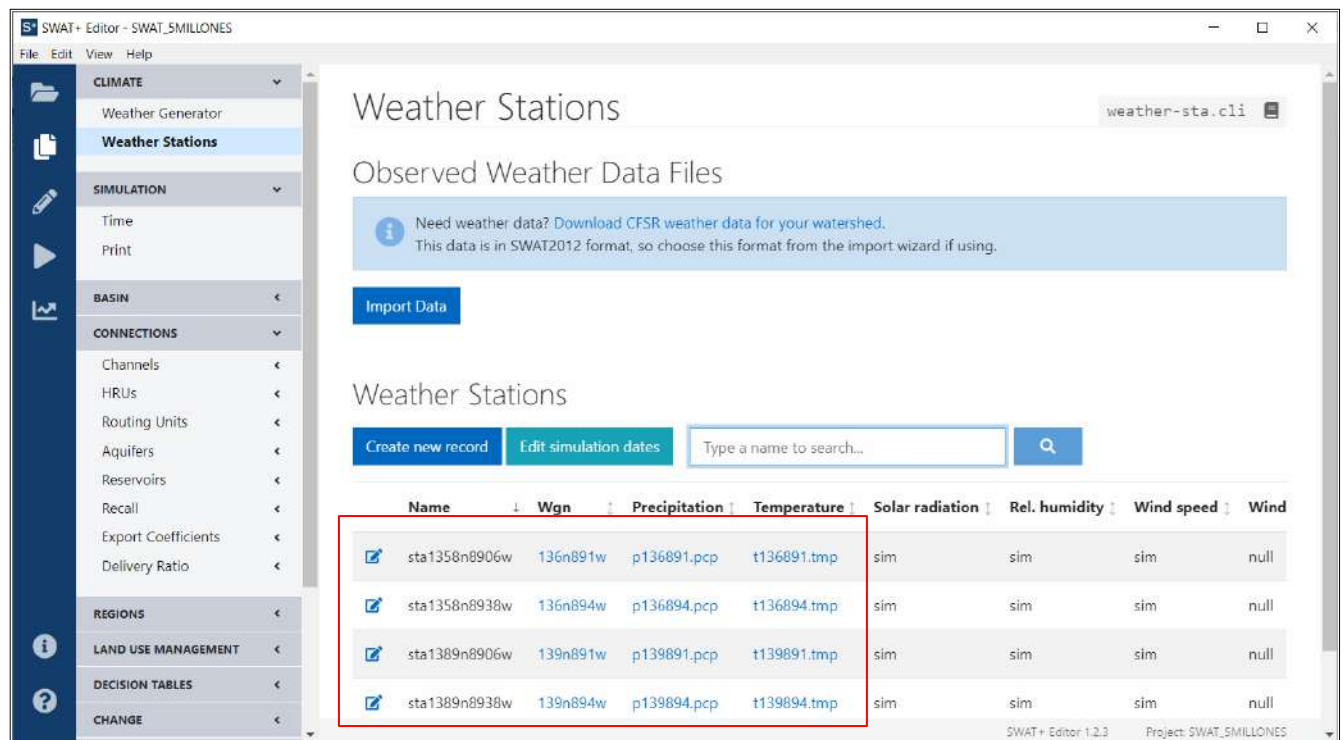


Figura 8. Cuatro estaciones meteorológicas utilizadas a partir de <https://globalweather.tamu.edu/>

SIMULATION

La definición de los parámetros del componente **SIMULATION** fue la siguiente:

Se definió el inicio y el final del período de los datos de lluvia y temperatura con la cual el modelo se calibrará.

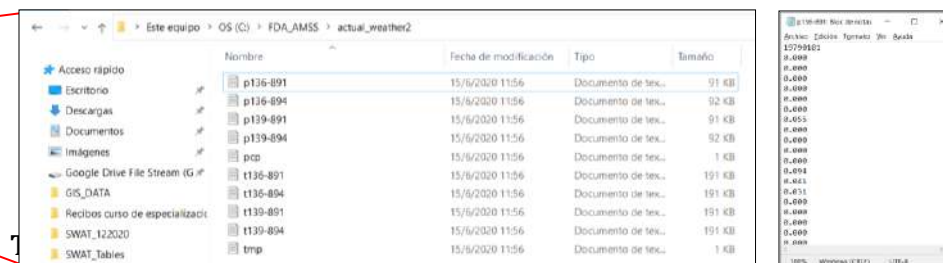


Figura 9. Base de datos de lluvia y temperatura a partir de <https://globalweather.tamu.edu/>

La opción **Time**, fue definida a partir del 01 de enero de 1979, quedando configurado de la forma siguiente (figura 10):

Value	Description	SWAT+ Variable
0	Beginning Julian day of simulation (0 = Jan. 1)	day_start
1979	Beginning year of simulation (e.g., 1980)	year_start
212	Ending Julian day of simulation (0 = Dec. 31)	day_end
2014	Ending year of simulation (e.g., 1980)	year_end
Daily	Time steps in a day for rainfall, runoff and routing	step

Save Changes

Figura 10. Configuración de la opción Time en SIMULATION

PRINT

La opción **Print**, tuvo dos etapas: la primera para definir la época de análisis, es nuestro caso se analizó en forma diaria, por tal razón se configuró tal como se muestra en la figura siguiente:

Value	Description	SWAT+ Variable
0	Number of years to not print output	nyskip
0	Beginning Julian day of simulation to start printing output files for daily printing only	day_start
0	Beginning year of simulation to start printing output files	year_start
0	Ending Julian day of simulation to stop printing output files for daily printing only	day_end
0	Ending year of simulation to stop printing output files	year_end
1	Daily print within the period (e.g., interval=2 will print every other day)	interval

Save Changes

Print Objects

☐ soilout ☐ mgtout

☐ hydcon ☐ fdcout

Figura 11. Primera etapa de configuración de la opción Print

Productos a obtener del modelo QSWAT+

Para la obtención de resultados a partir de los datos de entrada y necesidades de análisis de la infiltración (percolación) en el área de estudio, se definieron los siguientes requerimientos:

1. Water balance basin output | Monthly y Yearly: series temporales de percolación y recarga para toda la cuenca (en nuestro caso toda el area de estudio que contenía varias cuencas), en paso de tiempo mensual y anual

2. Channel basin output | Daily y Monthly: series temporales de caudal, sedimentos, nutrientes, para el canal principal que drena la cuenca de interés, en paso de tiempo diario. En nuestro caso no se tenía definido un solo canal principal, sin embargo, el parámetro se calculó.

3. Water Balance HRU | Yearly y Annual Average: Shapefile con los valores de balance hídrico promedio anual, para visualizar evapotranspiración (, precipitación, rendimiento hídrico, etc.

4. Channel output | Daily: similar a channel basin output, pero para todos los drenajes presentes.

Nota: No todos los parámetros requeridos en esta configuración fueron utilizados para el análisis en este ejercicio, siendo que el interés se centró en la Percolación.

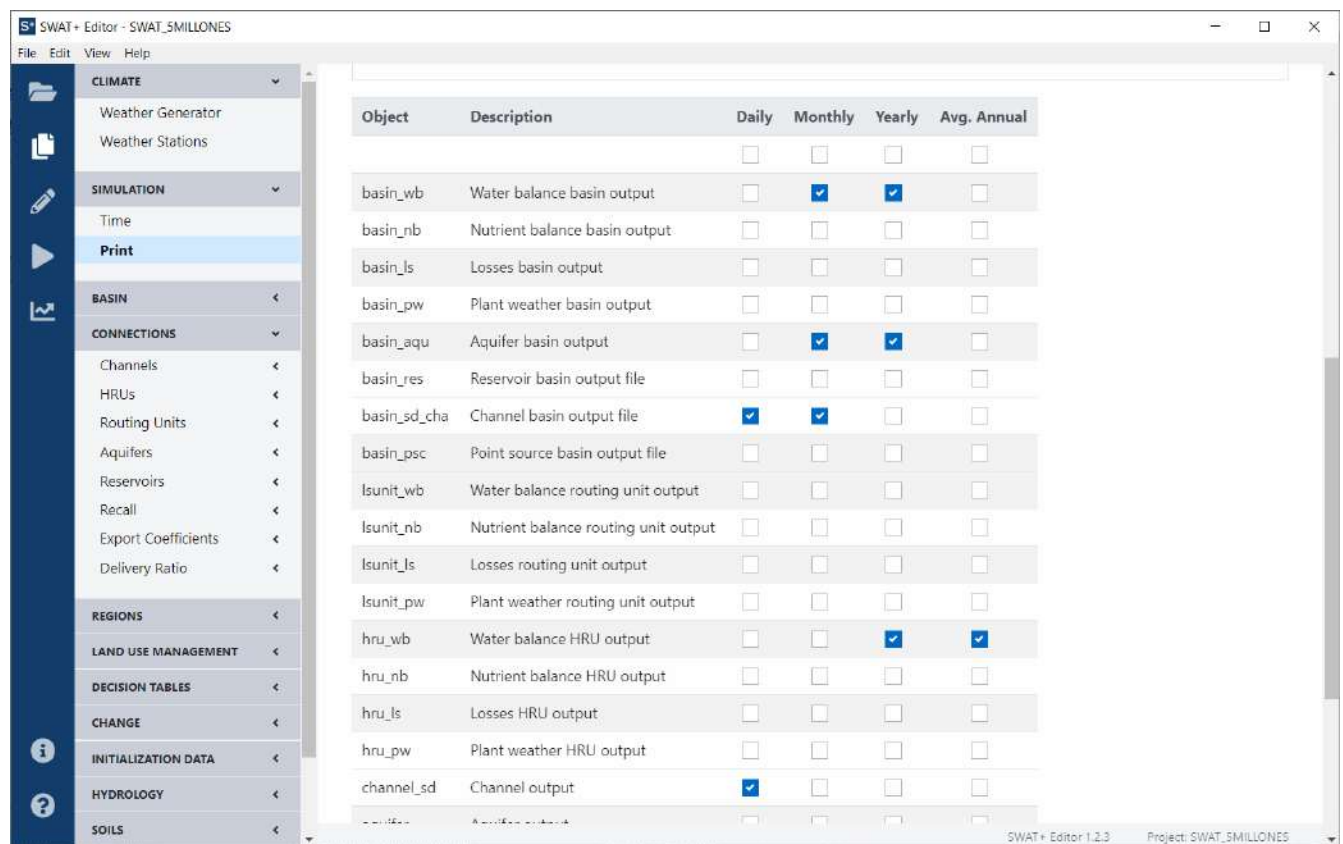


Figura 12. Definición de los productos de la modelación hidrológica en QSWAT+

BASIN

La definición de los parámetros del componente **BASIN** fue la siguiente:

El método utilizado para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial (PET) fue el de **Hargreaves**

El método para analizar los cambios en el hidrograma de las cuencas fue el de **Muskingum**

El resto de parámetros fueron dejados con los valores definidos por defecto.

RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE QSWAT+

cuadro 1. Percolación anual promedio (m³) de todo el área de trabajo

SUBCUENCA	BASE	250K	500K	1MILLÓN	2500K	5MILLONES
1	326,957.36	326,957.36	326,957.36	353,455.16	326,864.93	302,700.33
2	145,202.94	145,202.94	145,202.94	161,325.52	145,268.65	132,499.95
3	24,700.16	24,697.73	24,549.82	23,810.27	24,682.50	24,811.80
4	186,519.33	186,519.33	186,519.33	182,576.44	186,519.33	185,448.10
5	552,501.92	552,504.70	560,637.32	565,447.42	552,614.55	556,114.03
6	1,000,309.56	1,000,310.02	1,228,640.55	1,877,939.37	1,000,309.56	1,228,689.39
7	2,540,130.37	2,534,383.51	2,334,106.30	2,535,966.19	2,539,721.88	2,540,107.28
8	2,792,430.88	2,794,821.15	3,037,414.70	2,969,830.61	2,796,021.23	2,794,090.68
9	3,379,977.70	3,379,319.27	3,462,264.75	3,703,115.38	3,379,572.63	3,095,686.51
10	6,412,832.81	6,412,956.09	6,423,839.30	6,702,644.68	6,421,200.98	5,415,335.47
11	3,295,426.61	3,295,424.40	3,293,495.12	3,428,052.12	3,296,489.43	3,108,719.08
12	1,864,916.86	1,864,916.86	1,865,764.01	1,944,700.88	1,869,212.44	1,694,224.35
13	3,309,115.19	3,309,115.19	3,309,115.19	3,462,807.25	3,312,097.73	3,179,330.19
14	1,006,117.12	1,006,118.18	1,009,216.62	1,041,943.66	1,006,117.12	966,953.26
15	646,972.68	646,972.68	646,964.09	650,829.83	647,018.94	643,437.57
16	2,105,857.73	2,105,861.70	1,812,143.70	1,804,287.00	2,105,805.69	2,110,033.04
17	303,426.80	303,426.91	304,064.52	315,645.46	303,377.47	302,593.98
18	791,767.54	791,767.07	810,996.18	787,113.03	781,385.04	793,962.25
19	1,704,797.39	1,704,938.75	1,824,055.75	1,725,642.21	1,704,330.40	1,705,603.42
	32,389,960.9					
TOTAL	3	32,386,213.83	32,605,947.52	34,237,132.47	32,398,610.47	30,780,340.68

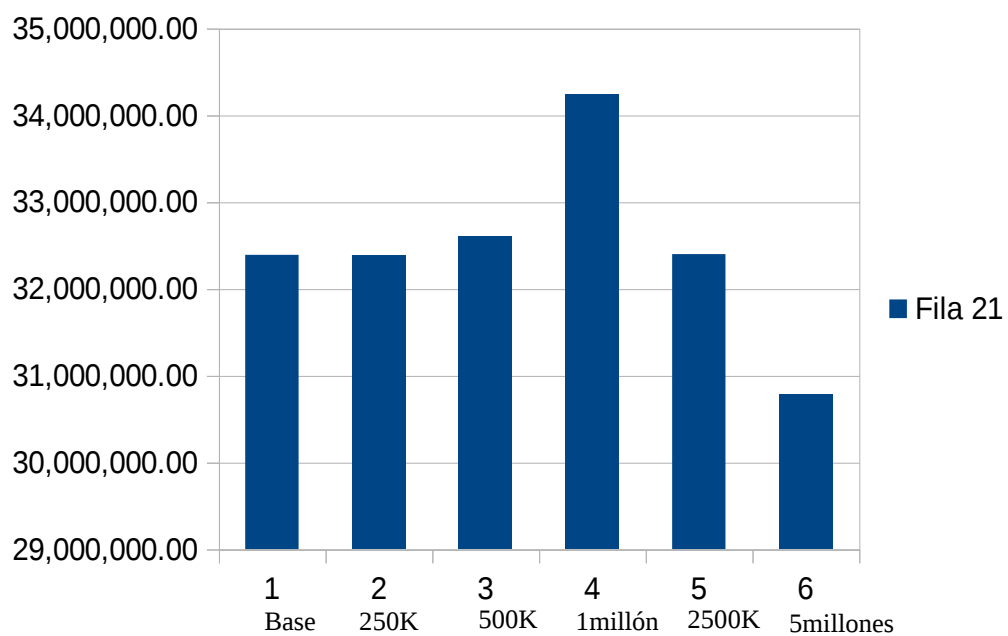


Figura 13. Comportamiento de la Percolación anual promedio del área de estudio

ANEXO 3

Escorrentía total anual en la RHI_AMSS, por escenario de intervención, en metros cúbicos (m³).

UNIDADES HIDROLÓGICAS	LÍNEA BASE	ESCENARIOS DE INTERVENCIÓN				
		2,500 ha	5,000 ha	10,000 ha	25,000 ha	50,000 ha
Río de Polonquillo	31.205	31.205	31.205	31.204	31.091	29.524
Río Acelhuate-Camotepeque	356.680	356.680	356.680	356.680	349.030	340.543
Q. sin nombre-Río Acelhuate	270.637	270.637	269.825	267.851	252.758	148.595
Q. sin nombre- El Playón	26.298	26.298	26.298	25.496	4.821	2.999
Río Agua Amarilla	743.795	743.795	743.757	741.903	728.418	728.395
El Boquerón	228	228	228	228	228	251
Río Las Cañas	11.550.396	11.550.351	11.549.823	11.543.100	11.000.570	10.127.166
Río Acelhuate	24.450.441	24.398.330	24.386.283	24.333.590	24.238.567	24.171.202
Río Tomayate	12.819.063	12.738.676	12.678.999	12.542.738	12.147.262	11.950.491
Río San Antonio	6.857.055	6.822.643	6.798.898	6.705.682	6.298.750	5.665.682
Río El Chorro	2.341.736	2.341.715	2.330.845	2.258.506	2.228.969	2.171.052
Río Claro	1.150.284	1.150.284	1.149.606	1.138.461	1.117.774	1.118.750
La Toma	1.172.272	1.172.272	1.172.272	1.172.072	1.121.750	1.141.659
Zanjón La Alcantarilla	882.943	882.943	882.942	882.195	826.421	826.522
Quebrada La Periquera	463.380	463.380	463.380	461.034	420.790	420.786
Zanjón Los Corozos	1.800.594	1.800.594	1.800.557	1.797.727	1.758.566	1.759.550
Río Pantano	293.623	293.623	293.623	293.182	283.175	283.171
Río Belén	985.175	985.173	984.357	977.924	944.263	948.817
Río Colón	5.307.193	5.291.011	5.254.240	5.195.116	4.938.661	4.762.269
TOTALES	71.502.998	71.319.838	71.173.817	70.724.690	68.691.864	66.597.423

Flujo base total anual en la RHI_AMSS, por escenario de intervención, en metros cúbicos (m³).

UNIDADES HIDROLÓGICAS	LÍNEA BASE	ESCENARIOS DE INTERVENCIÓN				
		2,500 ha	5,000 ha	10,000 ha	25,000 ha	50,000 ha
Río de Polonquillo	1.127.050	1.127.050	1.127.050	1.129.476	1.124.459	1.121.269
Río Acelhuate-Camotepeque	1.924.465	1.924.465	1.924.465	1.924.465	1.915.517	1.913.373
Q. sin nombre-Río Acelhuate	979.248	979.248	979.330	980.106	989.157	1.058.837
Q. sin nombre- El Playón	1.488.396	1.488.396	1.488.506	1.489.251	1.481.407	1.439.809
Río Agua Amarilla	6.644.023	6.644.039	6.644.828	6.648.629	6.627.613	6.618.045
El Boquerón	1.716.010	1.716.010	1.716.008	1.716.003	1.716.003	1.648.610
Río Las Cañas	68.821.862	68.818.157	68.787.331	68.785.914	69.144.746	70.914.069
Río Acelhuate	141.659.654	141.702.316	141.713.773	141.763.656	142.195.996	142.536.957
Río Tomayate	96.318.213	96.328.911	96.340.815	96.382.562	96.643.175	96.825.106
Río San Antonio	37.351.504	37.376.784	37.389.674	37.442.462	37.634.385	38.092.790
Río El Chorro	18.563.482	18.563.473	18.570.325	18.615.967	18.602.757	18.578.920
Río Claro	9.372.254	9.372.254	9.373.412	9.383.171	9.360.119	8.982.417
La Toma	18.937.146	18.937.144	18.937.142	18.936.988	18.890.879	17.726.340
Zanjón La Alcantarilla	9.115.913	9.115.914	9.115.885	9.111.317	9.020.598	8.672.235
Quebrada La Periquera	5.005.092	5.005.092	5.005.089	5.001.849	4.950.719	4.950.818
Zanjón Los Corozos	11.649.946	11.649.946	11.649.947	11.647.452	11.570.729	11.573.410
Río Pantano	4.677.234	4.677.238	4.677.589	4.678.260	4.671.446	4.673.841
Río Belén	13.078.891	13.078.930	13.079.750	13.085.338	13.071.242	13.094.786
Río Colón	45.735.579	45.749.012	45.768.926	45.810.080	46.025.119	46.403.872
TOTALES	494.165.964	494.254.379	494.289.846	494.532.946	495.636.066	496.825.507

Evapotranspiración total anual por unidad hidrográfica en la RHI_AMSS, por escenario de intervención, en metros cúbicos (m³).

UNIDADES HIDROLÓGICAS	LÍNEA BASE	ESCENARIOS DE INTERVENCIÓN				
		2,500 ha	5,000 ha	10,000 ha	25,000 ha	50,000 ha
Río de Polonquillo	898.823	898.823	898.823	896.398	901.533	906.290
Río Acelhuate-Camotepeque	1.543.762	1.543.762	1.543.762	1.543.762	1.561.632	1.573.061
Q. sin nombre-Río Acelhuate	783.893	783.893	784.625	785.822	791.863	826.434
Q. sin nombre- El Playón	977.030	977.030	976.920	976.977	1.005.496	1.048.918
Río Agua Amarilla	8.289.752	8.289.733	8.288.953	8.286.862	8.323.321	8.333.244
El Boquerón	2.118.135	2.118.135	2.118.137	2.118.142	2.118.142	2.185.510
Río Las Cañas	40.000.068	40.003.952	40.036.234	40.044.915	40.235.545	39.329.691
Río Acelhuate	59.127.183	59.136.655	59.137.194	59.139.842	58.777.227	58.483.398
Río Tomayate	56.269.904	56.339.594	56.387.681	56.483.636	56.618.990	56.633.144
Río San Antonio	52.945.162	52.954.286	52.965.057	53.004.872	53.224.888	53.397.754
Río El Chorro	24.557.799	24.557.828	24.561.844	24.587.601	24.632.415	24.714.736
Río Claro	13.412.095	13.412.095	13.411.615	13.413.014	13.457.300	13.847.526
La Toma	19.015.586	19.015.587	19.015.589	19.015.945	19.115.392	20.253.733
Zanjón La Alcantarilla	13.467.778	13.467.777	13.467.808	13.473.541	13.628.822	13.982.438
Quebrada La Periquera	5.710.354	5.710.354	5.710.357	5.715.942	5.807.505	5.807.411
Zanjón Los Corozos	15.878.671	15.878.672	15.878.708	15.884.031	16.003.248	15.998.994
Río Pantano	4.113.745	4.113.742	4.113.391	4.113.161	4.129.983	4.127.591
Río Belén	14.184.436	14.184.400	14.184.751	14.187.216	14.236.589	14.202.972
Río Colón	43.095.086	43.098.100	43.115.606	43.133.975	43.176.480	42.969.436
TOTALES	376.389.264	376.484.417	376.597.051	376.805.656	377.746.370	378.622.281

Disponibilidad total anual de agua para la infiltración por unidad hidrográfica en la RHI_AMSS, por escenario de intervención, en metros cúbicos (m³).

UNIDADES HIDROLÓGICAS	LÍNEA BASE	ESCENARIOS DE INTERVENCIÓN				
		2,500 ha	5,000 ha	10,000 ha	25,000 ha	50,000 ha
Río de Polonquillo	1.127.050	1.127.050	1.127.050	1.129.476	1.124.459	1.121.270
Río Acelhuate-Camotepeque	1.924.465	1.924.465	1.924.465	1.924.465	1.915.517	1.913.373
Q. sin nombre-Río Acelhuate	979.248	979.248	979.330	980.107	989.157	1.058.837
Q. sin nombre- El Playón	1.488.396	1.488.396	1.488.506	1.489.251	1.481.407	1.439.808
Río Agua Amarilla	6.644.024	6.644.040	6.644.829	6.648.629	6.627.613	6.618.045
El Boquerón	1.716.010	1.716.010	1.716.008	1.716.003	1.716.003	1.648.610
Río Las Cañas	68.821.863	68.818.157	68.787.330	68.785.915	69.144.746	70.914.069
Río Acelhuate	141.659.654	141.702.317	141.713.775	141.763.658	142.195.998	142.536.956
Río Tomayate	96.318.213	96.328.911	96.340.815	96.382.562	96.643.176	96.825.106
Río San Antonio	37.351.505	37.376.784	37.389.674	37.442.461	37.634.385	38.092.792
Río El Chorro	18.563.481	18.563.473	18.570.325	18.615.966	18.602.757	18.578.920
Río Claro	9.372.253	9.372.253	9.373.412	9.383.171	9.360.119	8.982.417
La Toma	18.937.147	18.937.144	18.937.144	18.936.988	18.890.879	17.726.341
Zanjón La Alcantarilla	9.115.913	9.115.914	9.115.885	9.111.317	9.020.598	8.672.236
Quebrada La Periquera	5.005.092	5.005.092	5.005.089	5.001.849	4.950.719	4.950.818
Zanjón Los Corozos	11.649.946	11.649.946	11.649.947	11.647.452	11.570.728	11.573.410
Río Pantano	4.677.234	4.677.238	4.677.589	4.678.260	4.671.446	4.673.841
Río Belén	13.078.891	13.078.930	13.079.750	13.085.338	13.071.242	13.094.786
Río Colón	45.740.672	45.754.105	45.774.019	45.815.173	46.030.210	46.408.947
TOTALES	494.171.056	494.259.473	494.294.941	494.538.041	495.641.158	496.830.581

ANEXO 4

Tabla de cálculo de los cambios en escorrentía causados por los cambios en las coberturas y usos del suelo en la región hidrográfica de influencia del Área Metropolitana de San Salvador ocurridos durante el período 2010 – 2020.

Area (ha)	Cobertura/UsO Original	CN	mm	Escorrentía Total (m ³)	Cobertura/UsO Actual	CN	mm	Escorrentía Total (m ³)	Incremento en Escorrentía (m ³)
169,4	Café bajo sombra	22%	232,32	393.563	Mosaico de cultivos, pastos y árboles	61%	644,16	1.091.244	697.680
45,0	Café bajo sombra	22%	232,32	104.544	Tejido urbano discontinuo	59%	623,04	280.368	175.824
318	Café bajo sombra	22%	232,32	738.778	Café bajo sol	48%	506,88	1.611.878	873.101
408,2	Café bajo sombra	22%	232,32	948.330	Maíz tropical	72%	760,32	3.103.626	2.155.296
82	Café bajo sombra	22%	232,32	190.502	Caña de azúcar	43%	454,08	372.346	181.843
36,7	Café bajo sombra	22%	232,32	85.363	Mezcla de bosques y agricultura	61%	644,16	236.687	151.324
13,3	Café bajo sombra	22%	232,32	30.783	Mezcla de bosques y pastos	43%	454,08	60.167	29.384
12,4	Café bajo sombra	22%	232,32	28.809	Mezcla de cultivos y pastos	43%	454,08	56.308	27.499
49,8	Café bajo sol	48%	506,88	252.426	Maíz tropical	72%	760,32	378.639	126.213
144,4	Mezcla de bosque y agricultura	61%	644,16	930.167	Tejido urbano discontinuo	59%	623,04	899.670	-30.497
81,6	Mezcla de bosque y agricultura	61%	644,16	525.635	Zona industrial	77%	813,12	663.506	137.871
82	Mezcla de bosque y agricultura	61%	644,16	528.211	Maíz tropical	72%	760,32	623.462	95.251
64,9	Vegetación arbustiva	40%	422,4	274.138	Mosaico de cultivos, pastos y árboles	61%	644,16	418.060	143.922
32,8	Bosque mixto secundario	36%	380,16	124.692	Mosaico de cultivos, pastos y árboles	61%	644,16	211.284	86.592
1,44	Tejido urbano discontinuo	59%	623,04	8.972	Tejido urbano continuo	77%	813,12	11.709	2.737
154	Suelo desnudo	77%	813,12	1.252.205	Tejido urbano continuo	77%	813,12	1.252.205	0
78	Caña de azúcar	43%	454,08	354.182	Tejido urbano continuo	77%	813,12	634.234	280.051
18,4	Caña de azúcar	43%	454,08	83.551	Zona industrial	77%	813,12	149.614	66.063
2,03	Cultivos permanentes	43%	454,08	9.218	Mosaico de cultivos, pastos y árboles	61%	644,16	13.076	3.859
1.794,4				6.864.069				12.068.084	5.204.015