



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**PROGRAMA DE POSGRADO**

**Sostenibilidad Socioecológica de la Reforestación y su Aporte a la  
Conservación del Agua en Balalaica, Costa Rica**

**un análisis sistémico y participativo**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado  
como requisito para optar al grado de**

***MAGISTER SCIENTIAE***

**En Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas**

**Nelson Mejía Pineda**

**Turrialba, Costa Rica**

**2014**



Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**FIRMANTES:**

*Abigail Fallot*

Abigail Fallot, Ph.D.

**Directora de tesis**

*Jorge Faustino*

Jorge Faustino, Ph.D.

**Miembro Comité Consejero**

*Alejandro Ambach*

Alejandro Ambach, M.Sc.

**Miembro Comité Consejero**

Yamileth Astorga, M.Sc.

**Miembro Comité Consejero**

*Francisco Jiménez*

Francisco Jiménez, Dr. Sc.

**Decano Programa de Posgrado**

*Nelson Mejía Pineda*

Nelson Mejía Pineda

**Candidato**



## **DEDICATORIA**

A mi querida esposa Fanny y a mis hijos Christopher y Diego.

A mi padre Héctor Mejía y mi madre Lilian Pineda.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios todopoderoso y a su hijo Jesús por todas sus bendiciones.

A mi querida esposa Fanny por ser mi mayor soporte e inspiración, y a mis hijos Christopher y Diego por haberme acompañado y apoyado durante mis estudios.

A la Dra. Abigail Fallot, directora de tesis, por su valioso apoyo y orientación recibida durante el desarrollo del trabajo de investigación, asimismo por sus valiosos consejos, comprensión y paciencia. Muchas gracias por su valiosa ayuda.

A los miembros de mi comité asesor: Jorge Faustino, Yamileth Astorga y Alejandro Imbach, por los consejos y la ayuda brindada en el desarrollo de esta tesis.

Al coordinador de la maestría de Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas Dr. Jorge Faustino por sus valiosos consejos, apoyo y orientación académica.

A Max Castillo y a Max Piñar por su valioso apoyo en el reconocimiento de campo, a Macario Fuentes y ABOMORE por su apoyo en la coordinación de los talleres y a Heather McTavish por su apoyo en la validación de campo.

A todos los reforestadores de Balalaica que con su participación hicieron posible el desarrollo de este estudio.

A Fernando Casanoves y a Sergio Vilchez por su valiosa colaboración en el análisis estadístico de los datos.

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por la darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A la Escuela Nacional de Ciencias Forestales (U-ESNACIFOR) en Honduras por su aporte financiero para cursar mis estudios y desarrollar la investigación.

A mis amigos del CATIE por su amistad, y a todo el personal administrativo del CATIE por su apoyo.

# CONTENIDO

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>ii</b>
<b>CONTENIDO.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE CUADROS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS .....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMEN DE LA TESIS .....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>	<b>1</b>
1.1 Caracterización del problema .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo general .....	4
1.3.2 Objetivos específicos .....	4
1.4 Preguntas de investigación .....	4
1.5 Marco conceptual .....	5
1.5.1 Reforestación y restauración ecológica.....	5
1.5.2 Relación bosques/árboles y agua.....	6
1.5.3 Sistemas socioecológicos .....	11
1.5.4 Modelación participativa .....	13
1.5.5 Evaluación participativa .....	14
1.6 Resultados generales.....	14
1.7 Conclusiones generales.....	16
1.8 Literatura citada.....	17
<b>2. ARTÍCULO 1.....</b>	<b>1</b>
2.1 Resumen .....	1
2.2 Introducción .....	2
2.3 Materiales y métodos .....	4
2.3.1 Área de estudio .....	4

2.3.2	Iniciativas de reforestación .....	4
2.3.3	Análisis de la dinámica del socioecosistema concernido por una iniciativa de reforestación .....	6
2.3.4	Desarrollo de un conjunto de indicadores de sostenibilidad de la reforestación..	7
2.4	Resultados y discusión .....	9
2.4.1	Construcción del modelo conceptual.....	9
2.4.2	Herramienta Práctica para la Evaluación de una Iniciativa de Reforestación a Pequeña Escala (EvaRefo).....	15
2.5	Conclusiones.....	19
2.6	Agradecimientos .....	21
2.7	Literatura citada.....	21
<b>3.</b>	<b>ARTÍCULO 2 .....</b>	<b>1</b>
3.1	Resumen.....	1
3.2	Introducción .....	1
3.3	Materiales y métodos .....	3
3.3.1	Área de estudio .....	3
3.3.2	Selección de las fincas .....	4
3.3.3	Pruebas de infiltración.....	4
3.3.4	Mediciones y cálculos.....	6
3.3.5	Análisis estadístico.....	7
3.3.6	Covariables .....	7
3.4	Resultados y discusión .....	8
3.5	Conclusiones.....	13
3.6	Agradecimientos .....	14
3.7	Literatura citada.....	14

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Objetivos, preguntas e hipótesis de investigación. ....4

### Artículo 1

Cuadro 2. Tipología de las iniciativas de reforestación identificadas.....5

Cuadro 3. Indicadores preseleccionados para la evaluación y monitoreo  
de una iniciativa de reforestación. ....8

Cuadro 4. Vinculación de indicadores con objetivos de los reforestadores  
de La Suiza y sus alrededores. ....9

Cuadro 5. Experiencia local con algunas especies utilizadas en la reforestación. .... 12

Cuadro 6. Contexto de las iniciativas evaluadas..... 16

Cuadro 7. Evaluación del potencial del reforestador y de la iniciativa según su objetivo  
principal..... 17

### Artículo 2

Cuadro 8. Ejemplo de cálculos básicos para determinar la tasa de infiltración.....6

Cuadro 9. Capacidad de infiltración y covariables calculadas en siete fincas bajo  
cobertura de plantación pura de *Pinus caribaea* y charral .....8

Cuadro 10. Análisis de covarianza. .... 11

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Papel de los árboles en el ciclo hidrológico y la recarga de acuíferos .....	8
Figura 2. Infiltración promedio de tres tipos de vegetación.....	10
Figura 3. Modelo conceptual de un sistema socioecológico .....	12
Figura 4. Instituciones que inciden en los servicios ecosistémicos. ....	13

### Artículo 1

Figura 5. Ubicación geográfica del Subcorredor Biológico Balalaica. ....	5
Figura 6. Socialización de resultados preliminares ante el CBCVCT y el ColFor .....	6
Figura 7. Taller de trabajo para aplicar el método PARDI desarrollado con reforestadores y actores de la comunidad de Pavones y con el ColFor.....	7
Figura 8. Ciclo de evaluación de una iniciativa de reforestación .....	7
Figura 9. Modelo conceptual elaborado con reforestadores y actores de la comunidad de Pavones y sus alrededores.....	12
Figura 10. Determinación práctica del drenaje y textura del suelo. ....	16
Figura 11. Evaluación del desempeño de las iniciativas de reforestación .....	18

### Artículo 2

Figura 12. Ubicación geográfica del sitio de estudio. ....	4
Figura 13. Ubicación de los puntos de prueba bajo la plantación y bajo charral.....	5
Figura 14. Infiltrómetro de doble anillo Turf-Tec. ....	5
Figura 15. Cilindro medidor y muestras de suelo. ....	8
Figura 16. Velocidad de infiltración acumulada en siete fincas bajo cobertura de plantación pura de <i>Pinus caribaea</i> . ....	9
Figura 17. Velocidad de infiltración acumulada en siete fincas bajo cobertura de charral.....	10

## LISTA DE ACRÓNIMOS

ABOMORE	: Alianza Bosque Modelo Reventazón
ADI	: Asociación de Desarrollo Integral
APOT	: Asociación de Productores Orgánicos de Turrialba
ASADAS	: Asociaciones Administradoras de Acueductos y Alcantarillados
AyA	: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
CBCVCT	: Corredor Biológico Cordillera Volcánica Central Talamanca
CACTU	: Centro Agrícola Cantonal de Turrialba
CIAgro	: Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica
ColFor	: Consejo Local Forestal Turrialba-Jiménez
COMCURE	: Comité para el Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Reventazón
EARTH	: Escuela Agrícola de la Región Tropical Húmeda
FONAFIFO	: Fondo Nacional de Financiamiento Forestal
FUNDECOR	: Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central
GPFLS	: Global Partnership on Forest Landscape Restoration
ICE	: Instituto Costarricense de Electricidad
ICT	: Instituto Costarricense de Turismo
IDA	: Instituto de Desarrollo Agrario
INA	: Instituto Nacional de Aprendizaje
ITTO	: Organización Internacional de Maderas Tropicales
MAG	: Ministerio de Agricultura y Ganadería
MEP	: Ministerio de Educación Pública
MINAE	: Ministerio de Ambiente y Energía
OCDE	: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
ONF	: Oficina Nacional Forestal

ONG	: Organización No Gubernamental
PARDI	: Problemática–Actores–Recursos–Dinámicas–Interacciones
PFNM	: Productos Forestales No Maderables
PSA	: Pagos por Servicios Ambientales
SINAC	: Sistema Nacional de Áreas de Conservación

## RESUMEN DE LA TESIS

Se analizaron los diferentes elementos que inciden en la sostenibilidad socioecológica de las iniciativas de reforestación en la región de Balalaica, ubicada en el cantón de Turrialba, Costa Rica.

Aplicando el método PARDI, se analizó el sistema socioecológico concernido por la reforestación, considerando las iniciativas impulsadas por el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en Balalaica. Con reforestadores y actores de la región, se construyeron modelos conceptuales que les permitieron tener un mejor entendimiento de los diferentes actores, recursos, y procesos que tienen incidencia en los resultados de las iniciativas.

Al mismo tiempo se desarrolló, propuso y validó, por diferentes reforestadores, una herramienta práctica para evaluar en sitio una iniciativa de reforestación. La herramienta combina indicadores económicos, sociales, ecológicos, y culturales, y ajusta la evaluación para considerar diferentes fines, como la producción de madera, el turismo rural comunitario, la agroforestería, la conservación ecológica, la obtención de pagos por servicios ambientales, y la protección de los recursos hídricos.

Al ser el agua un recurso prioritario para las comunidades de Balalaica, se evaluó el aporte de una iniciativa de reforestación a la conservación de los recursos hídricos, específicamente sobre la infiltración de agua en el suelo. En siete fincas de la región se comparó el efecto de plantaciones de *Pinus caribaea* versus cobertura de charral sobre la tasa de infiltración. Utilizando el infiltrómetro Turf-Tec, y ajustando los datos con la ecuación de Kostyakov, bajo un diseño en bloques aleatorios con un nivel de significancia aceptable de 0,05, se encontró que la tasa de infiltración bajo cobertura de reforestación, con una media de 20,79 cm/h, es significativamente mayor que bajo cobertura de charral, con una media de 14,85 cm/h ( $p=0,0262$ ).

Se encontró una correlación negativa entre la infiltración y variables como la densidad aparente del suelo, su humedad gravimétrica y la pendiente del terreno, aunque solamente la humedad gravimétrica presentó una influencia significativa ( $p=0,0068$ ).

El conocimiento generado de forma colectiva con este estudio servirá para que reforestadores y actores, basándose en la experiencia y en el aprendizaje conjunto, puedan tomar mejores decisiones en cuanto a la planificación, gestión y manejo de la reforestación. De esta forma, que pueda corresponder a las expectativas socioeconómicas y ambientales del reforestador y las comunidades de Balalaica.

Palabras clave: *Restauración ecológica, socioecosistema, evaluación, monitoreo, protección de los recursos hídricos, uso del suelo.*

## ABSTRACT

The different factors that influence the socio-ecological sustainability of reforestation initiatives in the region of Balalaica, Turrialba, Costa Rica, were analyzed.

The PARDI method was applied to analyze the socio-ecological system concerned by reforestation, considering initiatives promoted by the National Forestry Financing Fund (FONAFIFO) and the Costa Rican Electricity Institute (ICE). With reforesters and stakeholders of the region, conceptual models were built that allowed them to have a better understanding of the different stakeholders, resources, and processes that impact the result of reforestation initiatives.

At the same time, a practical method to assess reforestation composed of economic, social, ecological, and cultural indicators was developed, proposed and validated by different reforesters. The sustainability indicator method aims at assessing reforestation initiatives according to their different possible purposes in Balalaica, such as timber production, rural tourism, agro-forestry, ecological conservation, obtaining payment for environmental services, and protection of water resources.

Since water is a primary resource for communities in Balalaica, the contribution of reforestation to the conservation of water resources, specifically water infiltration in the soil was evaluated. In seven farms, the effect of land cover on the infiltration rate was compared between *Pinus caribaea* and scrubs. Using the Turf-Tec infiltrometer, and fitting the data with the Kostyakov equation, under a randomized blocks design with an acceptable significance level of 0,05, it was found that the infiltration rate under reforestation, with a mean of 20,79 cm/h, is significantly higher than under scrub coverage, with a mean of 14,85 cm/h ( $p = 0,0262$ ).

A negative correlation was also found with variables such as soil bulk density, gravimetric moisture, and slope, although only the gravimetric moisture showed a significant influence ( $p = 0,0068$ ).

The knowledge generated collectively through a joint learning process with this study should help reforestation stakeholders make better decisions regarding the planning and management of reforestation projects, so that they can correspond to the socioeconomic and environmental expectations of reforesters and communities of Balalaica.

Keywords: *ecological restoration, socio-ecosystem, evaluation, monitoring, protection of water resources, land use*

# **1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

## **1.1 Caracterización del problema**

Uno de los eventos que definen al siglo pasado fue la rápida deforestación de 350 Mha y la degradación de otras 500 Mha de bosques tropicales secundarios y primarios alrededor del mundo (Lamb *et al.* 2005).

Dicha dinámica es problemática y merece atención, entre otras consideraciones porque los bosques son cruciales para la gestión sostenible de los recursos hídricos, mientras que el agua es esencial para la sostenibilidad de los ecosistemas forestales (Brüschweiler *et al.* 2004). La Reunión Internacional de Expertos sobre Bosques y Agua, celebrada en el 2002 en Shiga, Japón, la Resolución de Varsovia 2 sobre los Bosques y el Agua en el 2007, y la declaración del 2003 como el Año Internacional del Agua Dulce, fueron pasos hacia un mejor entendimiento de la relación entre los bosques y el agua, y de la falta de acceso y de disponibilidad de agua potable que se sufre en gran parte del mundo. Esos problemas se agravan con la continua degradación de los bosques.

Una forma adoptada por la humanidad para intervenir los ecosistemas tropicales y su degradación es la reforestación. Chazdon (2008) afirma que la cobertura forestal ahora se está incrementando en todo el mundo, nuevos bosques se están regenerando en tierras agrícolas abandonadas y se establecen plantaciones forestales con fines comerciales y de restauración.

El enfoque hacia la restauración de los ecosistemas forestales ahora presenta oportunidades para integrarse con los medios de vida rural y la participación comunitaria (Chazdon 2008). Dicho enfoque busca restaurar la biodiversidad y el suministro de bienes y servicios ecológicos utilizados anteriormente por las comunidades rurales (Lamb *et al.* 2005).

Si bien las plantaciones y los bosques restaurados pueden mejorar los servicios de los ecosistemas y mejorar la conservación de la biodiversidad, no igualan la composición y la estructura de la cobertura forestal original (Chazdon 2008). No obstante la restauración de los ecosistemas forestales recuperaría algo de su capacidad de secuestrar carbono y frenar el cambio climático. Las áreas reforestadas, sosteniblemente manejadas, generan productos biocombustibles y materias primas que pueden ser transformadas, estimulando la industria local y la generación de trabajo, asimismo proporcionan hogares para la vida silvestre, suministran alimentos, y juegan un papel importante en la conservación de los recursos hídricos (GPFLR 2013).

El desafío que enfrentan ahora los administradores de los bosques y del agua es el de maximizar la amplia gama de beneficios de los bosques, sin perjuicio a los recursos hídricos y demás funciones de los ecosistemas (FAO 2013). Este reto es particularmente relevante en el contexto de la adaptación al cambio climático, el cual está alterando la función de los bosques en la regulación de los flujos de agua e influyendo sobre la disponibilidad de los recursos hídricos (Bergkamp, Orlando y Burton, citados por Calder *et al.* 2007).

En Costa Rica los recursos hídricos son abundantes pero vulnerables (CEDARENA 2008). En las partes altas de la microrregión hidrográfica Balalaica, especialmente sobre las zonas potenciales de recarga hídrica y lagunas naturales que abastecen de agua a más de 20 comunidades en cuatro distritos (Pavones, Tres Equis, La Suiza, y Tuis), aún existe una presión sobre los remanentes de bosques existentes. La ampliación de áreas de cultivos y pastos para la ganadería, y la extracción ilegal de madera para su comercialización. En consecuencia, la pérdida de biodiversidad, degradación de suelos, desecación de las lagunas naturales, inciden sobre la cantidad y calidad de los recursos hídricos en la zona (Hidalgo, citado por Vásquez 2008). Uno de los mayores intereses de las comunidades de la región, identificado por Baker (2008), Vásquez (2008) y Eychène (2013) en estudios anteriores, es trabajar por la conservación del agua.

En este sentido se plantean preguntas como las siguientes: ¿Cómo restaurar y conservar los ecosistemas forestales en la microrregión?, ¿Cómo proteger y conservar los recursos hídricos de la zona? Una alternativa ha sido la restauración ecológica mediante la reforestación, la cual, siendo bien diseñada y manejada, puede mejorar la calidad y la regulación de los flujos de agua. Pero ahora ¿Son estas iniciativas de reforestación sostenibles para la producción de bienes y servicios ecosistémicos como el agua? ¿La reforestación cumple con las expectativas económicas, sociales o ecológicas de los que deciden implementarla? En la microrregión hidrográfica Balalaica interactúan una serie de actores (locales y externos) y procesos socioecológicos que de una forma u otra inciden en los resultados de dichas iniciativas, por lo cual merecen ser analizados desde una perspectiva sistémica y participativa.

## **1.2 Justificación**

La reforestación tropical, como proceso de restauración ecológica y como alternativa de desarrollo socioeconómico, ha carecido hasta la fecha de un entendimiento sistémico y compartido de todos los actores involucrados. También es necesario, en particular, un mejor entendimiento sobre la contribución de la reforestación a la conservación de los recursos hídricos, dada la problemática que este recurso enfrenta en muchos países tropicales en vías de desarrollo, y donde la región de Balalaica no es la excepción.

Los factores relacionados con la provisión de agua por parte de los bosques, y su relación con las dinámicas de los ecosistemas forestales, son temas que deben ser investigados más a fondo, tanto en estudios de campo como de simulación (Vanclay 2009). A pesar de los importantes avances en la comprensión científica de las interacciones entre los bosques y el agua, la relación entre los bosques y la gestión sostenible de los recursos hídricos es un tema que merece seguir siendo investigado (Calder *et al.* 2007).

La reforestación se presenta como una alternativa para ayudar a restaurar servicios ecosistémicos como la provisión de agua. A pesar de que existen muchas iniciativas de este tipo, y de que en general parece existir un consenso en que es necesario reforestar y recuperar los ecosistemas tropicales, no todas estas iniciativas tienen continuidad y llegan a ser sostenibles. Los objetivos de la reforestación pueden ser económicos (p.ej. PSA, turismo,

plantaciones con fines de producción de madera u otros productos no maderables) y/o ecológicos (p.ej. conservación de los recursos hídricos, conservación de la biodiversidad, conectividad biológica), incluso socioculturales (p. ej. conservación de la cultura y tradiciones locales); sin embargo, el cumplimiento de dichos objetivos se puede ver limitado por diferentes elementos técnicos y dinámicas socioecológicas que requieren ser analizados con mayor profundidad.

Al respecto, Korhonen (2010), después de evaluar el estado actual de algunas plantaciones establecidas bajo un programa de incentivos forestales en el sur de Costa Rica, encontró que en general el estado silvicultural de las plantaciones era pobre. Cole (2010), después de evaluar algunas fincas agroforestales en el sur de Costa Rica, sostiene que será necesaria una inversión adicional para asegurar la permanencia de los árboles plantados y las prácticas agroforestales más allá de la vigencia de los contratos de PSA. Esto vendría a poner en riesgo tanto la inversión realizada hasta la fecha, como la continuidad de la iniciativa de reforestación y el cumplimiento de los objetivos trazados.

La falta de conocimientos científicos sobre los factores que influyen en la prestación de los servicios ecosistémicos y de sus beneficios económicos limita su incorporación en la planificación y en la toma de decisiones sobre el uso del suelo (Benayas *et al.* 2009). Un mejor entendimiento de los factores que influyen en la sostenibilidad de la reforestación y sus beneficios socioecológicos ayudaría a llenar parte de este vacío.

Todos estos aspectos mencionados anteriormente son indicativos de que los procesos de reforestación y restauración ecológica tropical requieren de un enfoque más incluyente, integral, y que considere la experiencia local en la toma de decisiones.

Se vuelve necesario entonces conocer y entender, bajo un enfoque sistémico y participativo que permita el consenso y compromiso de los diferentes actores, las diferentes dinámicas socioecológicas que intervienen en el resultado de las iniciativas de reforestación. De esta forma, que comunidades como las de la región de Balalaica puedan empoderarse de sus proyectos de restauración ecológica, identificar oportunidades, y plantear estrategias que les permitan encaminarse hacia la sostenibilidad de los ecosistemas forestales tropicales y la provisión sostenible de servicios ecosistémicos como el agua.

## 1.3 Objetivos

Se aborda la problemática de falta de sostenibilidad de las iniciativas de reforestación, por lo que es necesario un mejor entendimiento de los diferentes procesos socioecológicos, compartido por los diferentes actores involucrados.

### 1.3.1 Objetivo general

Analizar las dinámicas socioecológicas de la reforestación en la microrregión hidrográfica Balalaica.

### 1.3.2 Objetivos específicos

1. Analizar la dinámica del socioecosistema concernido por una iniciativa de reforestación.
2. Evaluar en particular el aporte de la reforestación a la conservación de los recursos hídricos en la microrregión hidrográfica.
3. Desarrollar un conjunto de indicadores de sostenibilidad de la reforestación.

## 1.4 Preguntas de investigación

La investigación fue orientada por la búsqueda de respuestas a preguntas específicas para cada objetivo propuesto (**Cuadro 1**).

**Cuadro 1.** Objetivos, preguntas e hipótesis de investigación.

Objetivo específico	Preguntas de investigación
1. Analizar la dinámica del socioecosistema concernido por una iniciativa de reforestación.	1.1 ¿Cuáles son los actores locales y externos que intervienen en el desarrollo de proyectos de reforestación y cómo lo hacen? 1.2 ¿Cuáles recursos de la comunidad tienen incidencia en los proyectos de reforestación y cómo lo hacen? 1.3 ¿Cuáles dinámicas caracterizan a estos actores y recursos? 1.4 ¿De qué forma se relacionan los diferentes actores y recursos de la comunidad y cómo influyen estas relaciones en la sostenibilidad de las iniciativas de reforestación?
2. Evaluar el aporte de la reforestación a la conservación de los recursos hídricos.	2.1 ¿Cómo influye la cobertura forestal sobre la disponibilidad en cantidad y calidad de los recursos hídricos? 2.2 <u>Ho:</u> La tasa de infiltración en suelos bajo cobertura de reforestación es igual que en suelos bajo cobertura del charral. <u>Hi:</u> La tasa de infiltración en suelos bajo cobertura de reforestación es mayor que en suelos bajo cobertura de charral.
3. Desarrollar un conjunto de indicadores de sostenibilidad de la reforestación.	3.1 ¿Cuáles son los elementos económicos, sociales, ecológicos, y culturales indicadores de la sostenibilidad de los procesos de reforestación? ¿Cómo reflejar la sostenibilidad de los procesos?

## 1.5 Marco conceptual

Anclada sobre capacidades en ciencias forestales (experiencia laboral) y manejo de cuencas (posgrado en curso), la investigación fue decididamente pluridisciplinaria, tiene un enfoque sistémico y se preocupa por su relevancia social por medio de un enfoque participativo.

A continuación se definen una serie de conceptos relevantes a la problemática de sostenibilidad de la reforestación y su contribución a la conservación del agua.

### 1.5.1 Reforestación y restauración ecológica

Estos conceptos se relacionan directamente con la problemática abordada en la investigación considerando que la reforestación delimita el alcance del estudio, y la restauración ecológica es uno de los propósitos de la reforestación.

#### 1.5.1.1 Conceptos de la reforestación

La reforestación, según diferentes criterios espaciales y temporales, puede asumir diversos significados, y no necesariamente corresponde a la restitución del bosque original. El término reforestación abarca conceptos que Nieuwenhuis (2010) define como:

- **Plantación.** Cultivo forestal en donde se establecen árboles por medio de la plantación y/o la siembra directa o el uso de rebrotes, ya sea con especies nativas o exóticas y que reúne los siguientes criterios: una, dos o unas pocas especies, coetáneo y espaciamiento regular.
- **Aforestación<sup>1</sup>.** El establecimiento de un bosque, rodal o cultivo de árboles en un área que nunca ha sido reforestada o donde la cobertura forestal ha estado ausente por mucho tiempo; según Evans, Pancel, citado por Camirand (2002), por al menos 50 años.
- **Reforestación.** El establecimiento de un bosque, rodal o cultivo de árboles en un área donde la cobertura forestal ha sido recientemente removida; según Evans, Pancel, citado por Camirand (2002), dentro de los últimos 50 años.
- **Forestación.** El término forestación se utiliza muchas veces igual al término aforestación. Sin embargo en Alemania se refiere a la reforestación de un tala rasa, así como a la aforestación de tierras agrícolas.

En la investigación se consideraron las plantaciones puras<sup>2</sup> y mixtas<sup>3</sup>, ya sea para fines comerciales o de conservación, así como árboles plantados en sistemas agroforestales.

---

<sup>1</sup> Esta palabra no está registrada en el idioma español, por lo que se utiliza como anglicismo.

<sup>2</sup> Plantaciones de una sola especie.

<sup>3</sup> Plantaciones de dos o más especies.

### 1.5.1.1 Restauración ecológica

La restauración ecológica es un proceso que se lleva a cabo para recuperar un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido, por lo general como resultado de las actividades humanas. Su fin primordial es el restablecimiento de las características de un ecosistema, como la biodiversidad y las funciones ecológicas, que prevalecían antes de la degradación (Benayas *et al.* 2009).

En la tierras forestales la degradación implica una pobre fertilidad y estructura del suelo (compactación, anegamiento, salinización u otras limitaciones físicas y químicas), y erosión, entre otros (ITTO 2002).

Chazdon (2008) sostiene que aunque muchos de los principios de la restauración ecológica se basan en la sucesión. No se debe confundir la reconstrucción guiada con los procesos naturales de sucesión, que no están prescritos o dirigidos por los seres humanos y que con frecuencia son impredecibles.

El problema de dejarle la restauración a los procesos naturales es que toman mucho tiempo, medido en décadas, siglos, o en algunos casos hasta un milenio o más. Sin embargo, estos amplios márgenes de tiempo se deben a problemas específicos que, una vez identificados, se pueden superar mediante intervenciones artificiales, que tienen más éxito si utilizan o imitan los procesos naturales (Dobson *et al.* 1997).

La reforestación es uno de los mecanismos utilizados por el hombre para restaurar los ecosistemas. Lamb *et al.* (2005) sostienen que la reforestación puede tener dos enfoques: *la restauración*, la cual apunta a restablecer el ecosistema forestal original, y *la provisión de bienes y servicios ecosistémicos*, en la cual la plantación provee bienes para los cuales existe un mercado (p.ej. madera), pero que además provee un amplia gama de servicios.

Dentro de los servicios ecosistémicos de alto valor para sostener los medios de vida humanos están el almacenamiento de carbono, el mantenimiento de la fertilidad del suelo, la regulación del clima y el flujo del agua, y el suministro de agua potable (Benayas *et al.* 2009).

De los diferentes beneficios de la reforestación, el presente estudio se enfoca sobre la conservación de los recursos hídricos.

## 1.5.2 Relación bosques/árboles y agua

Los bosques y los árboles contribuyen a la reducción de los riesgos relacionados con el agua, tales como deslizamientos de tierra, sequías, desertificación, e inundaciones locales. Las cuencas hidrográficas boscosas alrededor del mundo suministran una gran parte del agua dulce para las necesidades domésticas, agrícolas, industriales y ecológicas, tanto en las áreas aguas arriba, como en las áreas aguas abajo (FAO 2013).

Los beneficios de los bosques para el suministro de agua son múltiples. Es mediante el mantenimiento de la calidad del agua que los bosques naturales y manejados hacen su contribución más significativa. El manejo forestal por lo general resulta en una baja

aportación de nutrientes, pesticidas y otros productos químicos en comparación con otros usos más intensivos de la tierra como la agricultura. Al minimizar la erosión, los bosques reducen el deterioro de la calidad del agua debido a la sedimentación. Al atrapar los sedimentos y contaminantes derivados de los usos de suelo y actividades pendiente arriba, los bosques ayudan a proteger los cuerpos y los cursos de agua. A través de la estabilización de las riberas de los ríos, las raíces de árboles y arbustos reducen la erosión en las zonas ribereñas, y evitan la sedimentación río abajo (FAO 2013).

#### 1.5.2.1 Hidrología forestal

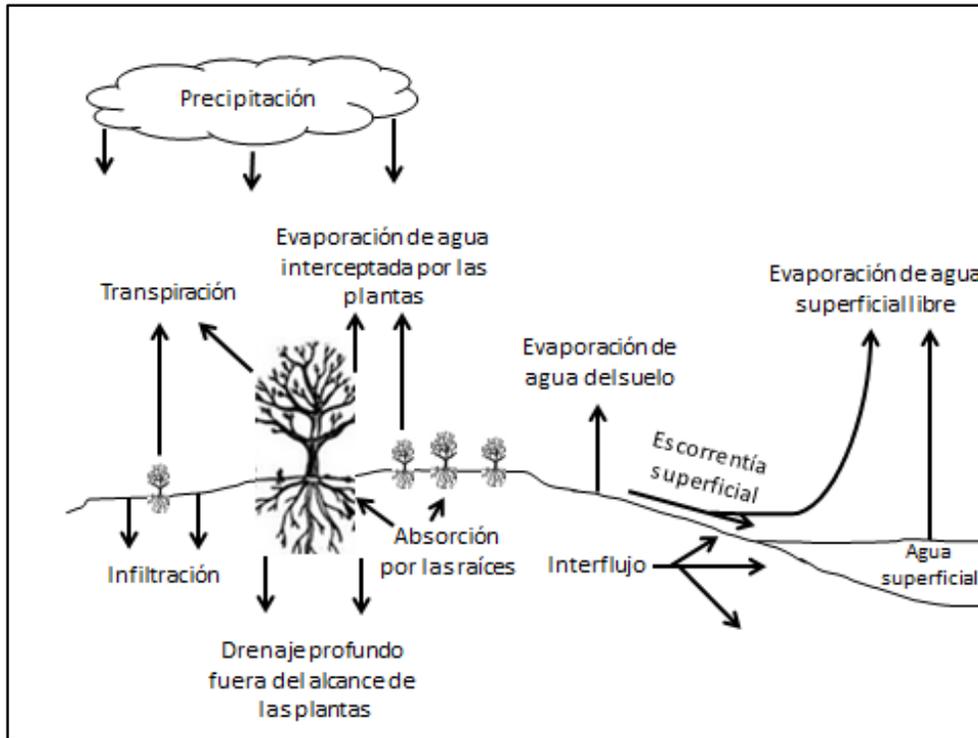
Los estudios más recientes sobre la hidrología forestal se han centrado en tres temas que son particularmente relevantes para la formulación de políticas: las ventajas y desventajas comparativas de la cobertura forestal en la maximización de los rendimientos de agua río abajo, el papel de los bosques aguas arriba en el mantenimiento de los flujos de agua durante la estación seca, y la preservación de la calidad del agua (Calder *et al.* 2007).

Un proceso estudiado por la hidrología forestal es la recarga hídrica, la cual depende, entre otros factores, de la cobertura vegetal del suelo, la profundidad de las raíces extractoras del agua, y la evapotranspiración (Schosinsky 2006).

Según Le Maitre *et al.* (1999), la recarga de acuíferos se ve influenciada básicamente por los siguientes aspectos: (a) La **interceptación** de la precipitación, esta es agua retenida o absorbida por parte de la superficie de la planta (hojas, corteza). Doseles abiertos y cortezas lisas permiten una menor interceptación, por el contrario, doseles densos con alta cobertura foliar y cortezas rugosas, como en el caso de los bosques de coníferas (p.ej. pino), provocarán una alta interceptación disminuyendo el potencial de recarga. (b) La **infiltración y percolación**, influenciadas positivamente por la cobertura vegetal al proteger el suelo de los impactos de las gotas así como por la producción de materia orgánica que une las partículas del suelo e incrementa su porosidad aumentando las tasas de dichos procesos. Varios estudios muestran que las tasas de infiltración en tierras de pastos de raíces poco profundas son mucho menores que en tierras con cobertura de árboles de raíces más profundas. (c) Las plantas también incrementan la percolación al proveer un **flujo preferencial a través de canales radiculares**, lo que ayuda al agua a fluir a través del perfil del suelo mediante la creación de macroporos. Los beneficios difieren entre los diferentes tipos de plantas dependiendo en gran medida de la profundidad y la aspereza de sus sistemas radiculares. Por otro lado, (d) las plantas disminuyen la capacidad de recarga al **extraer agua a través de las raíces** para transpirarla por las hojas, es este proceso el que más aporta a la pérdida de agua en sitios con cobertura vegetal (**Figura 1**). Plantas de raíces muy profundas son capaces de secar los perfiles del suelo y también de disminuir considerablemente los niveles de agua subterránea. Géneros como *Acacia* y *Prosopis* pueden alcanzar profundidades de 3 a 20m, incluso >53m en un caso. Algunas especies del género *Eucalyptus* frecuentemente alcanzan los 10m, hasta 60m en un caso. De la misma forma existen algunas especies arbustivas con raíces que penetran hasta los 10m o más.

Factores como la profundidad, cobertura y densidad de los sistemas radiculares son característicos de la especie e influyen sobre la textura y el contenido de humedad del suelo,

y el nivel freático, entre otros (Keeley y Keely, citado por Chang 2013). El sistema radicular además influye sobre la hidrología superficial y la estabilidad del terreno. Las raíces grandes pueden anclar la planta y el suelo al sustrato, mientras que las raíces finas pueden contribuir a la formación de agregados estables para suelos subsuperficiales. Como resultado se incrementa la porosidad, la capacidad de infiltración y la capacidad de retenimiento de agua por parte del suelo, mientras que se reduce la escorrentía superficial (Chang 2013).



**Figura 1.** Papel de los árboles en el ciclo hidrológico y la recarga de acuíferos.  
Fuente: Adaptado de Heitschmidt y Stuth (1991)

Además, los árboles ayudan a la estabilidad del suelo en una pendiente al reducir su contenido de agua a través de la transpiración y el refuerzo mecánico proporcionado por el sistema radicular (Waldron y Dakessian, citado por Chang 2013).

Los bosques son importantes usuarios de agua. Este uso se ve influenciado por las estaciones, el clima, la topografía, el suelo, la composición del bosque (edad y especies) y las prácticas de manejo forestal. Con la excepción de los bosques nublados, los bosques devuelven menos agua al suelo que, por ejemplo, pastizales o áreas de cultivo manejadas adecuadamente, ya que una mayor cantidad de agua es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración. Sin embargo, el denso y profundo sistema de raíces encontrado en los suelos forestales y la alta porosidad de sus horizontes esencialmente orgánicos, permiten una buena infiltración de agua y capacidad de retención (**Figura 2**). La escorrentía superficial es mínima y la recarga de aguas subterráneas es más eficiente, lo que resulta en un flujo de corriente regular durante todo el año (FAO 2013).

### 1.5.2.2 Precipitación y cobertura forestal

La cobertura forestal afecta las precipitaciones orográficas, las cuales son relevantes en Balalaica debido a su topografía irregular. Los árboles acrecientan la altura efectiva que deben remontar los vientos, al mismo tiempo que el efecto de fricción disminuye su velocidad de avance y favorece su movimiento ascensional, lo que se traduce en un aumento en las precipitaciones de entre un 0,8% y un 3% (López Cadenas 1998).

Aparte del proceso de intercepción de la precipitación vertical explicado en la sección anterior, los árboles también hacen una intercepción de la precipitación horizontal, especialmente en áreas con presencia abundante de neblinas como la región de Balalaica. La intercepción horizontal se define como el proceso mediante el cual las pequeñas gotas de humedad atmosférica en movimiento horizontal, entran en contacto con la superficie del follaje de las plantas, donde con el tiempo se combinan para formar gotas más grandes que pueden escurrir y caer al suelo (Kittredge 1948). Esto representa una fuente de humedad adicional a la lluvia, e incrementa el agua disponible bajo el dosel (Hildebrandt y Eltahir 2008).

Estos procesos dan pie a que la precipitación pueda ser clasificada de la siguiente forma: *precipitación incidente*, que se define como la precipitación que llega a la parte superior del dosel; *precipitación neta*, que llega al suelo por goteo directo, goteo desde el dosel vegetal, y escorrentía por los tallos; y la *precipitación efectiva*, que es la lluvia que se infiltra en el suelo, sin llegar a perderse por escorrentía superficial o por filtración profunda, y que permanece disponible para las raíces de las plantas.

### 1.5.2.3 Reforestación y conservación de los recursos hídricos

Aunque a la reforestación se le atribuye una amplia gama de beneficios relacionados con el agua, es muchas veces considerada como una actividad que amenaza la seguridad de los recursos hídricos (Van Dijk y Keenan 2007), algo que según Vanclay (2009) es en parte atribuido a la extracción de agua por parte de los árboles. No obstante, sostiene que muchos de los factores que influyen en el uso del agua por parte de las plantaciones, están directamente relacionados con las actividades de manejo, por lo que existe la posibilidad de diseñar y manejar plantaciones forestales deliberadamente para lograr un uso más eficiente del agua.

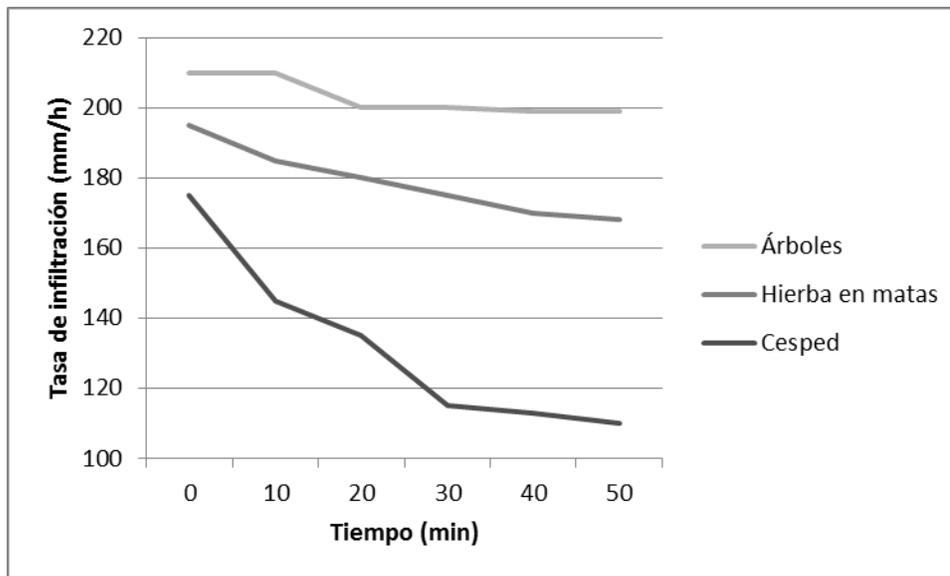
Dependiendo del nivel de degradación de las tierras agrícolas, una plantación bien diseñada (p. ej. especie y espaciamiento adecuado), localizada (p. ej. posición apropiada dentro de la finca), y manejada puede reducir los volúmenes de sedimentos, nutrientes y sales conducidos a los sistemas fluviales, aunque no necesariamente sus concentraciones (Van Dijk y Keenan 2007). Las plantaciones en zonas agrícolas pueden reducir los contaminantes, sobre todo cuando se encuentran en vías de escorrentía o en zonas ribereñas. Sin embargo, los árboles expuestos a altos niveles de contaminación, capturan el azufre y nitrógeno del aire y pueden aumentar la acidificación del agua (Calder *et al.* 2007). Además, estudios realizados por Eberts *et al.* (1999) y Corseuil y Moreno (2001) sugieren que los árboles pueden contribuir a la fitorremediación de acuíferos mediante la extracción de sustancias contaminantes.

#### 1.5.2.4 Manejo de los recursos hídricos en sistemas silvopastoriles

Después de la agricultura, una de las actividades económicas más importantes en Balalaica es la ganadería, actividad que en la región se ha venido integrando con la introducción de árboles y plantaciones forestales.

Wilson y Ludlow, citados por Ríos *et al.* (2008) afirman que los árboles influyen grandemente en el balance hídrico en sistemas silvopastoriles (SSP), ya que cuando comparten el mismo espacio árboles y pasturas, la menor temperatura debajo de la copa de los árboles permite una disminución de los procesos de transpiración y evaporación. En un estudio realizado por Ríos *et al.* (2008) se encontró que el incremento en la cobertura arbórea en SSP provocó la disminución de la escorrentía superficial y la consecuente disminución de la erosión hídrica. Se concluyó que la cobertura arbórea, más que la herbácea, contribuye a incrementar significativamente la infiltración en el suelo, lo que favorece la disponibilidad de agua y la recarga de acuíferos (**Figura 2**).

No obstante, en comparación con los bosques naturales, las tierras reforestadas presentan una menor infiltración, y una mayor escorrentía debido a la menor densidad, cobertura del dosel y cantidad de hojarasca, fueron los resultados de un estudio realizado por Gholzom y Gholami (2012).



**Figura 2.** Infiltración promedio de tres tipos de vegetación.  
Fuente: Tomado de Heitschmidt y Stuth (1991)

#### 1.5.2.5 Papel de los bosques en la mitigación de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos

Los bosques tienen un gran potencial para reducir los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Los ecosistemas forestales intactos con sus funciones de amortiguamiento (por ej., enfriamiento, interceptación, evapotranspiración, almacenamiento de agua y protección contra el viento), pueden contribuir de manera significativa a la mitigación y adaptación a los fenómenos meteorológicos extremos y desastres resultantes,

tales como inundaciones, sequías y aumento de la temperatura. Por ejemplo, la sombra de los bosques ribereños puede ayudar a reducir el estrés térmico sufrido por la vida acuática como resultado de un mayor calentamiento (FAO 2013).

El secuestro de carbono por parte de los bosques también representa un potencial importante en la mitigación al cambio climático. Cabe destacar, sin embargo, que los bosques no pueden capturar carbono sin consumir agua al mismo tiempo. Parte del precio de la captura de carbono se paga con agua, lo cual acentúa el papel de los bosques en el ciclo hidrológico, en particular, los "trade-offs" (balance entre efectos opuestos) entre el consumo de agua por parte de los bosques y los servicios ecosistémicos (incluyendo la mitigación al cambio climático) que proporcionan (FAO 2013).

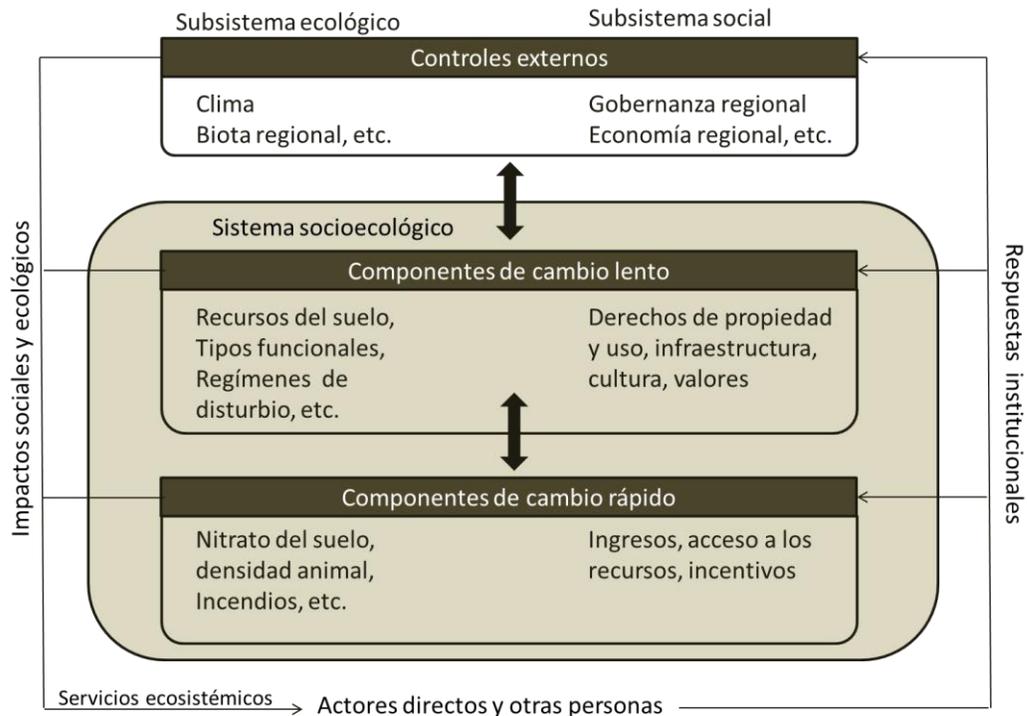
Los elementos biofísicos abordados hasta aquí deben ser considerados conjuntamente con los diferentes elementos sociales también relevantes a los procesos de reforestación.

### **1.5.3 Sistemas socioecológicos**

Resilience Alliance (2010) define un sistema socioecológico como un sistema en donde interactúan componentes culturales, políticos, sociales, económicos, ecológicos, tecnológicos, y otros (**Figura 3**), haciendo énfasis en la perspectiva "los seres humanos en la naturaleza", en la cual se da la integración de la sociedad con los ecosistemas.

Al igual que otros tipos de sistemas, un sistema socioecológico se compone de diferentes partes que interactúan para formar una entidad más compleja. El enfoque de sistemas es integral porque no se centra en una comprensión detallada de las partes, sino en cómo los principales componentes contribuyen a la dinámica de todo el sistema. Las partes de un sistema socioecológico responden a los cambios en otros componentes, lo cual a veces desencadena interacciones de retroalimentación que pueden incrementar el cambio en todo el sistema o pueden tener un efecto estabilizador. A través de estas interacciones, los sistemas socioecológicos pueden organizarse, pueden surgir nuevas configuraciones, lo que hace posible la adaptación. Esta característica de los sistemas socioecológicos puede hacer de su gestión un reto, pero también crea oportunidades para recuperarse o reorganizarse tras una perturbación (Resilience Alliance 2010).

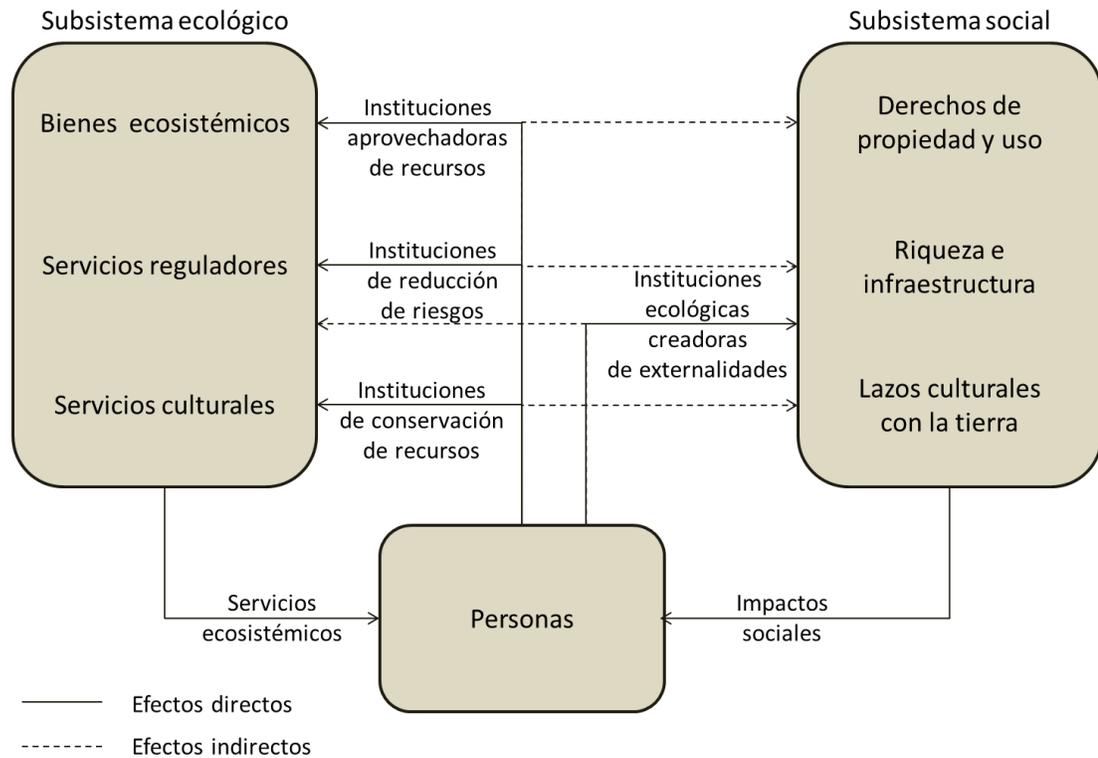
La reforestación, como proceso que forma parte de las dinámicas de los sistemas socioecológicos, puede aportar a la resiliencia de todo el sistema. Los árboles plantados en una finca, por ejemplo, pueden ser cortados y sirven como una fuente de ingreso rápido en casos de emergencia o bajas en los ingresos de las otras actividades económicas.



**Figura 3.** Modelo conceptual de un sistema socioecológico. Adaptado de Resilience Alliance (2010)

Chapin *et al.* (2006) sostienen que los sistemas ecológicos y sociales se afectan unos a otros con tanta fuerza que es mejor verlos como un sistema socioecológico. Parecido al subsistema ecológico, el subsistema social está compuesto de una serie de variables exógenas (lentas y rápidas) jerárquicamente interconectadas, que van de lo global a lo local y unidas por interacciones interescala. A la escala subglobal, la historia, la cultura, la economía y el sistema de gobernanza predominante a menudo caracteriza a regiones extensas o naciones. Los controles regionales a veces persisten durante mucho tiempo y cambian fundamentalmente en respuesta a cambios globales (p.ej. la globalización de los mercados). Al igual que en el sistema biofísico, algunas variables sociales lentas (p.ej. infraestructura, derechos de propiedad y de uso, lazos culturales con la tierra) se ven limitadas por los controles regionales e interactúan entre sí para dar forma a las variables sociales rápidas (p.ej. ingresos de la comunidad, densidad de población). Dichas variables interactúan con las variables ecológicas en múltiples escalas temporales, produciendo efectos ecológicos lo suficientemente grandes para afectar la biodiversidad y el clima a escalas regionales y mayores.

Retomando el modelo de la **figura 3**, está claro que las personas (tanto individuos como grupos) responden ante los impactos sociales y ambientales a través de las instituciones, las cuales juegan un papel fundamental en las dinámicas socioecológicas. Chapin *et al.* (2006) reconoce cuatro tipos de instituciones: aprovechadoras de recursos, de conservación de recursos, de reducción de riesgos, y ecológicas creadoras de externalidades (**Figura 4**).



**Figura 4.** Instituciones que inciden en los servicios ecosistémicos. Adaptado de Chapin *et al.* (2006).

Los sistemas socioecológicos son complejos debido a la presencia de elementos de diferentes índoles y a las múltiples interacciones que se dan entre ellos. Una forma para estudiarlos es a través de la modelación participativa, la cual ofrece un medio simplificado para representarlos.

### 1.5.4 Modelación participativa

Un modelo es una simplificación de la realidad que usualmente se utiliza para analizar sistemas y procesos que no pueden ser manipulados directamente (Jackson *et al.*, citado por Heemskerk *et al.* 2003). La modelación consiste en determinar las partes del sistema, seleccionar las relaciones de interés entre estas partes y los mecanismos de interacción, identificar los vacíos de información, y analizar el comportamiento general del modelo (Heemskerk *et al.* 2003). La modelación participativa permite la comunicación de ideas entre los diferentes actores de un territorio dado. Si se considera que cada grupo de actores de un sistema socioecológico puede tener su propia percepción acerca del funcionamiento del mismo, será necesario compartir estas percepciones para lograr un manejo integrado y consensuado (Delgado y Marín 2005).

La modelación participativa se hace por medio de talleres en donde participan los diversos actores del ecosistema para generar un modelo que contenga su visión de las principales interacciones socioecológicas. Cuando se generan visiones antagónicas,

corresponde a los científicos que formen parte del proceso hacer una ilustración de ellas, de tal forma que sean explícitas tanto para quienes las proponen como para quienes están en desacuerdo (Delgado y Marín 2005).

Desarrollar una representación compartida del sistema socioecológico es uno de los primeros pasos para poder evaluar su sostenibilidad.

### **1.5.5 Evaluación participativa**

Las experiencias de la evaluación participativa en el ámbito del desarrollo empiezan a difundirse en la década de los ochenta debido a dos razones fundamentales: como prolongación del modelo de desarrollo participativo, más conocido como *modelo de desarrollo basado en la gente*; y para fomentar el aprendizaje y la construcción de capacidades locales como objetivo prioritario de todo ejercicio de evaluación (Gallego 1999).

Cabrera (2004) sostiene que mediante el desarrollo de habilidades (p. ej., argumentación, negociación, consenso, trabajo en equipo), la evaluación participativa permite a las personas mejorar sus actuaciones. En otras palabras, "quien sabe evaluar, también sabe cómo mejorar". La evaluación participativa busca llegar a un consenso entre los diferentes actores sobre qué evaluar, qué estrategias aplicar, qué referentes considerar para valorar la información, y qué criterios e indicadores utilizar (Cabrera 2004). También permite determinar los métodos y los instrumentos para la medición de los indicadores seleccionados y cómo analizar, interpretar y comunicar los hallazgos (Ukaga 2001).

Fraser *et al.* (2006) sostienen que los nuevos enfoques de gestión ambiental acentúan la necesidad de la participación comunitaria en la identificación de indicadores para monitorear el progreso hacia el desarrollo sostenible y los objetivos de gestión ambiental. Además afirman que la identificación y recopilación de indicadores de sostenibilidad no solo proporcionan datos valiosos para la toma de decisiones en la gestión, pero el involucramiento de la gente en la selección de indicadores también proporciona una oportunidad para el empoderamiento de la comunidad que los enfoques convencionales de desarrollo no han podido proporcionar.

Ukaga (2001) afirma que la evaluación participativa de la sostenibilidad permite a los ciudadanos y profesionales: entender la situación en la que actualmente se encuentran; averiguar la necesidad y la forma de cambiar o mantener esta situación; determinar qué preguntas hacerse sobre su situación; y encontrar las respuestas a estas preguntas. Además sostiene que la evaluación participativa les permite a las personas liderar su propio destino.

## **1.6 Resultados generales**

De forma participativa, con resforestadores y otros actores de Balalaica, se construyó un modelo conceptual consensuado del sistema socioecológico concernido por una iniciativa de reforestación.

Esa representación se construyó alrededor de la siguiente problemática: ¿Cómo asegurar que las iniciativas de reforestación se mantengan en el tiempo, y que de esta forma

contribuyan a la conservación del agua a mediano y largo plazo en la microrregión hidrográfica Balalaica?

Se identificaron ocho tipos de actores que interactúan e inciden de diferentes formas sobre la problemática que comparten: individuo, institución del gobierno nacional y local, academia, empresa privada, organización y plataforma social, y agrupación gremial. También se identificaron cinco tipos de recursos considerados por los actores: insumos para el establecimiento, medios para el desarrollo, productos, medios para la comercialización de productos, y elementos contraproducentes a la reforestación.

Finalmente, se definieron las dinámicas e interacciones que caracterizan a estos actores y recursos. Esto permitió conocer aspectos como: el bajo nivel de conocimientos técnicos que posee el reforestador; el serio problema que representan las plagas (p ej. la hormiga zompopa) para el desarrollo inicial de la reforestación; la relegación de la reforestación a una actividad secundaria en las fincas y su falta de complementariedad con otras actividades productivas; la relevancia de la reforestación para los objetivos de Balalaica como la conectividad biológica y el manejo de las cuencas del Reventazón y Pacuare; diferentes opciones para la generación de beneficios directos por parte de la reforestación; y el valor de los conocimientos y experiencia local.

Se analizaron algunas dificultades en la implementación del programa de pagos por servicios ambientales en Balalaica, y el modesto papel de las instituciones llamadas a brindar la asesoría y la transferencia de tecnología relevante a la problemática.

Se elaboró de forma colectiva una herramienta práctica para evaluar el potencial y el desempeño de las iniciativas de reforestación en Balalaica. Herramienta que considera variables en el ámbito ecológico, económico, social y cultural, y que fue puesta en práctica en seis iniciativas con diferentes objetivos. Se encontró en general un potencial medio del reforestador y de las iniciativas, considerando indicadores como las capacidades asociativas y técnicas, autosuficiencia, claridad de mercados, y aptitud de la especie.

En cuanto al desempeño de las iniciativas, se encontró entre otras cosas, que las que han recibido una mayor inversión económica, son las que más aportan a la economía local, presentan una mejor perspectiva de generar beneficios económicos, y las que en general presentan un mejor desarrollo de la calidad de los árboles. Asimismo se observó que independientemente del objetivo de la iniciativa, todas están aportando en diferente medida a la conservación del suelo y los recursos hídricos.

En este sentido se evaluó el efecto de la reforestación en la conservación de los recursos hídricos, específicamente sobre el parámetro de infiltración. Parámetro que funciona como un buen indicador de la calidad del suelo, y relevante en la recarga de acuíferos y la pérdida de suelo por erosión hídrica.

Se encontró que la tasa de infiltración bajo cobertura de plantación pura de *Pinus caribaea*, con una media de 20,79 cm/h, es significativamente mayor que bajo cobertura de charral (gramíneas y arbustos), con una media de 14,85 cm/h. Se encontró una correlación

negativa de la infiltración con variables como la pendiente, y la humedad gravimétrica y densidad aparente del suelo.

## **1.7 Conclusiones generales**

Un proceso de reforestación es el resultado de una serie de interacciones y dinámicas socioecológicas entre diferentes actores y recursos. El reforestador y el árbol, a pesar de ser los elementos centrales, están lejos de ser los únicos que inciden en la problemática de sostenibilidad de la reforestación.

El desempeño y resultado de una iniciativa de reforestación depende en parte de los conocimientos locales y/o técnicos con que pueda contar la persona que desee incursionar en ella, o de la asesoría que pueda brindársele. Es fundamental tener claridad en los objetivos que se persiguen con la iniciativa, sean estos de conservación, protección o comercialización. Antes de adquirir y sembrar la primera semilla en el vivero, el reforestador o el promotor de la reforestación debe tener claro lo que espera conseguir con la iniciativa. De esto dependerán muchas de las siguientes decisiones a tomar en el proceso, y reduce el riesgo al que toda inversión a mediano y largo plazo está sujeta.

Aunque se reconoce el papel de las instituciones que promueven la reforestación en Balalaica, también es cierto que deben ir más allá en el seguimiento a la iniciativa. Esto puede hacerse a través del financiamiento, capacitación, asesoría, la promoción de otras actividades productivas que puedan vincularse con la reforestación, el fomento de la organización social, y el apoyo en la búsqueda de mercados. Sin esto, su inversión y la misma iniciativa tienen un alto riesgo de no cumplir con sus objetivos, especialmente en aquellas fincas en donde la reforestación no es la actividad principal.

La eficiencia y eficacia del programa de incentivos forestales podría mejorarse con la descentralización de los trámites administrativos iniciales, con un apoyo financiero a más largo plazo, y con una mayor inversión de tiempo y recursos al seguimiento especialmente de las iniciativas en donde se ha concluido con los desembolsos.

La reforestación a pequeña escala no puede ser vista únicamente como un proceso técnico, y amerita que se genere más información acerca de lo que incide en su desarrollo y resultados. Por esta razón su evaluación y monitoreo deben planificarse a plazos más largos y considerando también aspectos socioeconómicos, ecológicos, e incluso culturales, no solamente de la iniciativa, sino también del reforestador y sus capacidades para reforestar.

Cuando se compara con otros usos de la tierra, se reconoce el aporte de la reforestación a la conservación de los recursos hídricos, específicamente sobre la infiltración. Esto puede atribuirse a su función de interceptar las gotas de lluvia, al mayor aporte de materia orgánica, y al efecto positivo de la actividad radicular de los árboles sobre el tamaño de los poros y los canales de flujo en el subsuelo. Una buena infiltración puede aportar a una mejor recarga hídrica y contribuye a la regulación de la disponibilidad de agua durante el año. Además reduce la pérdida de suelo por erosión y la subsecuente sedimentación y

asolvamiento de los embalses, y contribuye también a reducir el riesgo de inundaciones en las partes bajas de la cuenca.

En la medida en que los pequeños reforestadores puedan obtener mayores beneficios directos de la reforestación, a través del asocio con cultivos agrícolas compatibles, la explotación de PFNM, PSA, turismo rural y el mercado del carbono, entre otros, irán dejando de relegar la reforestación a un segundo plano dentro de su finca. En la medida en que se evalúen y se den a conocer los diferentes aportes de la reforestación al mantenimiento de servicios vitales como la conservación de los recursos hídricos, las iniciativas empezarán a ser más valoradas no solo por el reforestador, sino también por el resto de la sociedad. Asimismo, el incremento del valor de la tierra como resultado del capital que representan los árboles. Este nuevo nivel de importancia contribuiría grandemente a la continuidad y sostenibilidad de las iniciativas de reforestación.

Será necesario seguir indagando en aspectos como el funcionamiento de una iniciativa de reforestación a mayor escala, los beneficios del uso de especies nativas, y la compatibilidad y complementariedad económica y ecológica de diferentes cultivos agrícolas con diferentes especies forestales. También será importante evaluar los efectos de la reforestación con otras especies sobre la conservación de los recursos hídricos. En cuanto a la herramienta de evaluación, es necesario seguir empleándola y retroalimentándola para mejorar su calibración y aplicabilidad.

## 1.8 Literatura citada

- Baker, A.C. 2008. El protagonismo social de las comunidades rurales como fundamento para la cogestión adaptativa incluyente de los recursos naturales en un territorio. Magister Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques Naturales y Biodiversidad. Turrialba, CR, CATIE. 155 p. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2902E/A2902E.PDF>
- Benayas, J.M.R.; Newton, A.C.; Diaz, A.; Bullock, J.M. 2009. Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis Science 325(5944): 1121-1124.
- Brüschweiler, S.; Höggel, U.; Kläy, A. 2004. Los Bosques y el Agua: Interrelaciones y su Manejo Berna, Suiza, 50 p. Disponible en [http://www.asocam.info/biblioteca/ECOBONA\\_0080.pdf](http://www.asocam.info/biblioteca/ECOBONA_0080.pdf)
- Cabrera, F. 2004. La evaluación participativa: Concepto y fases de desarrollo (en línea). Madrid, España, Cáritas. 109 p. Consultado 17 oct 2013. Disponible en <http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=qOyjJIiGJQC&oi=fnd&pg=PA7&dq=evaluaci%C3%B3n+participativa&ots=tnDeGRKEKK&sig=Z8obnETyUwKCnL01M0vSAjSvzJY#v=onepage&q=evaluaci%C3%B3n%20participativa&f=true>
- Calder, I.; Hofer, T.; Vermont, S.; Warren, P. 2007. Towards a new understanding of forest and water Unasylva 58: 3-10.
- Camirand, R. 2002. GUIDELINES FOR FOREST PLANTATION ESTABLISHMENT AND MANAGEMENT IN JAMAICA Quebec, Canada, CANADIAN INTERNATIONAL DEVELOPMENT AGENCY (CIDA). 52 p. Disponible en <http://www.forestry.gov.jm/sites/default/files/Resources/forestplantguidelines.pdf>
- CEDARENA. 2008. Guía para la protección del recurso hídrico San José, CR, 29 p.

- Cole, R.J. 2010. Social and environmental impacts of payments for environmental services for agroforestry on small-scale farms in southern Costa Rica *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 17(3): 208-216.
- Corseuil, H.; Moreno, F. 2001. Phytoremediation potential of willow trees for aquifers contaminated with ethanol-blended gasoline *Water Research* 35(12): 3013-3017.
- Chang, M. 2013. *Forest Hydrology an Introduction to Water and Forests* (en línea). Tercera ed. United States of America, Taylor & Francis Group. Consultado 05 sep 2013. Disponible en <http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Zr60yyHEdVcC&oi=fnd&pg=PP1&dq=forest+hydrology&ots=0jC08FveQq&sig=fMwSEWzdTRZTTC587ceFoi-XJ74#v=onepage&q&f=true>
- Chapin, F.S.; Lovcraft, A.L.; Zavaleta, E.S.; Nelson, J.; Robards, M.D.; Kofinas, G.P.; Trainor, S.F.; Peterson, G.D.; Huntington, H.P.; Naylor, R.L. 2006. Policy strategies to address sustainability of Alaskan boreal forests in response to a directionally changing climate *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103(45): 16637-16643.
- Chazdon, R.L. 2008. Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands *Science* 320: 1458-1460. 10.1126/science.1155365
- Delgado, L.E.; Marín, V.H. 2005. FES-sistema: un concepto para la incorporación de las sociedades humanas en el análisis medioambiental en Chile *Revista Ambiente y Desarrollo* 21(3): 18-22.
- Dobson, A.P.; Bradshaw, A.D.; Baker, A.J.M. 1997. Hopes for the Future: Restoration Ecology and Conservation Biology *Science* 277(5325): 515-522. Disponible en <http://www.sciencemag.org/content/277/5325/515.abstract> 10.1126/science.277.5325.515
- Eberts, S.M.; Schalk, C.W.; Vose, J.; Harvey, G.J. 1999. Hydrologic effects of cottonwood trees on a shallow aquifer containing trichloroethene *Hydrological Science and Technology* 15: 115-121.
- Eychène, C. 2013. Desarrollo metodológico para la evaluación de la resiliencia en los sistemas agroforestales. Informe de pasantía, CIRAD-PCP-CATIE. 49 p.
- FAO. 2013. *Forests and water international momentum and action Rome*, 84 p. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/017/i3129e/i3129e.pdf>
- Fraser, E.D.G.; Dougill, A.J.; Mabee, W.E.; Reed, M.; McAlpine, P. 2006. Bottom up and top down: Analysis of participatory processes for sustainability indicator identification as a pathway to community empowerment and sustainable environmental management. *Journal of Environmental Management* 78(2): 114-127. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479705001659> <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.04.009>
- Gallego, I. 1999. El enfoque del monitoreo y la evaluación participativa (MEP): batería de herramientas metodológicas *Revista Española de desarrollo y cooperación* 4: 103-135.
- Gholzom, E.H.; Gholami, V. 2012. A comparison between natural forests and reforested lands in terms of runoff generation potential and hydrologic response (case study: Kasilian Watershed) *Soil and Water Research* 7(4): 166-173.
- GPFLR. 2013. *The Global Partnership on Forest Landscape Restoration*. (material informativo).
- Heemskerk, M.; Wilson, K.; M., P.-Z. 2003. Conceptual models as tools for communication across disciplines. *Conservation Ecology* 7(3): 8.
- Heitschmidt, R.K.; Stuth, J.W. 1991. *Grazing management: an ecological perspective*, Timber Press. Disponible en <http://books.google.co.cr/books?id=HjzxAAAAMAAJ>
- Hildebrandt, A.; Eltahir, E.A. 2008. Using a horizontal precipitation model to investigate the role of turbulent cloud deposition in survival of a seasonal cloud forest in Dhofar *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012) 113(G4).

- ITTO. 2002. Guidelines for the restoration, management and rehabilitation of degraded and secondary tropical forests, 86 p. (13). Disponible en [http://www.itto.int/direct/topics/topics\\_pdf\\_download/topics\\_id=1540000&no=1&disp=inline](http://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=1540000&no=1&disp=inline)
- Kittredge, J. 1948. Forest influences: The effects of woody vegetation on climate, water, and soil, with applications to the conservation of water and the control of floods and erosion.
- Korhonen, K. 2010. The Silvicultural State of Planted Forests in Southern Costa Rica as Affected by Farmers' Motivation for Reforestation: Evaluation of Forest Incentive Programs (en línea). Consultado 8 oct 2013. Disponible en <http://www.helsinki.fi/vitri/publications/theses/kkorhonen.HTM>
- Lamb, D.; Erskine, P.D.; Parrotta, J.A. 2005. Restoration of Degraded Tropical Forest Landscapes Science 310: 1628-1632. 10.1126/science.1111773
- Le Maitre, D.; Scott, D.; Colvin, C. 1999. Review of information on interactions between vegetation and groundwater Water SA 25(2): 137-152. <http://hdl.handle.net/10204/524>
- López Cadenas, F. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión Ed. Mundi-Prensa, Tragsa, Tragsatec, Madrid.
- Nieuwenhuis, M. 2010. Terminology of Forest Management. Terms and definitions in English. Revised Versión Vienna, Austria, International Union of Forest Research Organizations (IUFRO). 176 p. (9).
- Resilience Alliance. 2010. Assessing resilience in social-ecological systems: Workbook for practitioners. Version 2.0., 54 p.
- Ríos, N.; Andrade, H.; Ibrahim, M. 2008. Evaluación de la recarga hídrica en sistemas silvopastoriles en paisajes ganaderos Zootecnia Tropical 26: 183-186. Disponible en [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-72692008000300004&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692008000300004&nrm=iso)
- Schosinsky, G. 2006. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos Revista Geológica de América Central (34): 13-30.
- Ukaga, O. 2001. Participatory Evaluation of Sustainable Development Greener Management International 2001(36): 27-36. Disponible en <http://www.ingentaconnect.com/content/glbj/gmi/2001/00002001/00000036/art00005> 10.9774/GLEAF.3062.2001.wi.00005
- van Dijk, A.I.J.M.; Keenan, R.J. 2007. Planted forests and water in perspective Forest Ecology and Management 251(1-2): 1-9. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112707004628> <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.010>
- Vanclay, J.K. 2009. Managing water use from forest plantations Forest Ecology and Management 257(2): 385-389. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112708006877> <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.003>
- Vásquez, N. 2008. Plan de ordenamiento territorial participativo para la gestión de zonas potenciales de recarga hídrica en la microregión hidrográfica Balalaica, Turrialba, Costa Rica. Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Turrialba, CR, CATIE. 208 p. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2952E/A2952E.PDF>



## **2. ARTÍCULO 1**

### **Sostenibilidad socioecológica de la reforestación en la región de Balalaica, Turrialba, Costa Rica: un análisis sistémico y participativo.**

Nelson Mejía<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *CATIE 7170 30 501 Turrialba, Costa Rica*

<sup>2</sup> *Departamento de Investigación Forestal Aplicada ESNACIFOR, Siguatepeque, Honduras*

#### **2.1 Resumen**

Desde un enfoque sistémico y participativo se estudió la sostenibilidad socioecológica de la reforestación en el Sub-Corredor Biológico Balalaica, en Turrialba, Costa Rica. Se consideraron todas las iniciativas de reforestación establecidas bajo el programa de incentivos forestales del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) y bajo el programa de gestión ambiental y cuencas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Se analizó la dinámica del sistema socioecológico comprendido por una iniciativa de reforestación mediante la aplicación del método PARDI, para crear, con reforestadores y actores de Balalaica, un modelo conceptual de cómo ellos perciben que funciona el sistema. Se encontró que el reforestador en Balalaica carece de un programa formal de capacitación y asesoría técnica, pero que al mismo tiempo ha acumulado valioso conocimiento local que merece ser difundido. Se reconocieron conjuntamente una diversidad de productos y servicios generados por la reforestación, así como interacciones determinantes de la sostenibilidad de una iniciativa. Asimismo se analizó el desempeño de los actuales programas de incentivos y donaciones, y cómo se genera y comparte conocimiento.

De forma participativa también se elaboró una herramienta práctica para evaluar una iniciativa de reforestación, de acuerdo con los objetivos locales que han podido motivarla. La herramienta, que fue utilizada y mejorada en el campo, permite monitorear el potencial de una iniciativa de reforestación y su desempeño. Las iniciativas evaluadas mostraron en general un potencial medio, considerando aspectos como la autosuficiencia, y las capacidades asociativas y técnicas del reforestador, así como la aptitud de la especie utilizada. Se encontró que las iniciativas con objetivos comerciales son las que han implicado una mayor inversión económica, pero al mismo tiempo son las que presentan un mejor desarrollo de la calidad de los árboles y las que más aportan a la generación de empleo local. Todas las iniciativas, independientemente de su objetivo, están aportando de una forma u otra a la provisión de servicios ecosistémicos.

Palabras clave: *restauración ecológica, socioecosistema, monitoreo*

## 2.2 Introducción

A nivel mundial, aproximadamente 13 millones de hectáreas de bosque han sido convertidas a otros usos o se han perdido por causas naturales cada año durante los últimos 10 años. Simultáneamente, se ha incrementado la cobertura forestal a través de la aforestación y la expansión natural de los bosques. Se estima que la pérdida neta de área de bosque, del año 2000 al 2010, se acerca a los 5,2 millones de hectáreas por año, y en su mayoría ocurre en los trópicos (Katila *et al.* 2010).

Actualmente los bosques tropicales se ven sometidos a presiones sin precedentes, muchas de las cuales son producto de fenómenos globales como el cambio climático y la creciente demanda de recursos naturales por parte de la sociedad humana. El incremento de la deforestación pone en riesgo la supervivencia misma de diversos ecosistemas, lo que amenaza su resiliencia, y afecta seriamente la biodiversidad del planeta y el bienestar de la sociedad (Mery *et al.* 2010).

Existe una necesidad urgente de restaurar extensas áreas de bosques degradados (Mery *et al.* 2009). La reforestación es una forma de intervención artificial empleada para superar la degradación ecológica (Lamb *et al.* 2005), y en tierras degradadas, puede proporcionar beneficios socioeconómicos y ambientales a las comunidades, y ayudar a reducir la pobreza y mejorar la seguridad alimentaria (Millennium Ecosystem Assessment 2005; Hoch *et al.* 2009).

En los trópicos la reforestación se da dentro de una amplia gama de condiciones edáficas y climáticas (Breugel *et al.* 2011), y en la mayor parte de los países, con la excepción de Colombia, Brasil, México y algunos países de Asia y África, en donde las plantaciones comerciales de algunas pocas especies se han expandido rápidamente, esta aún se da a pequeña escala, en su mayoría en sistemas agroforestales, con limitaciones tanto políticas como técnicas que frenan el desarrollo forestal de la región (Salazar 2009).

La reforestación en los trópicos se hace principalmente con el objetivo de suministrar leña y postes para la construcción e industria rural (Salazar 2009), madera y pulpa para papel (Le *et al.* 2014), y el carbón entre otros de los principales beneficios directos.

Aunque desafortunadamente el interés principal no se centre en ellos, la reforestación también ofrece una serie de beneficios indirectos como: la protección y mejoramiento de las condiciones del suelo, algo particularmente importante en las regiones tropicales con altos índices de precipitación y topografía montañosa en donde las altas tasas de erosión pueden llegar a sobrepasar las 60 toneladas por hectárea por año; el suministro de forraje en áreas con periodos secos prolongados; el uso de los árboles como cinturones de protección y cortinas rompe vientos en cultivos de café y cacao; el mejoramiento de la infiltración. Reduce también el riesgo a inundaciones e incrementa la disponibilidad de agua, un problema vital en muchos países tropicales; y como hábitat para la flora y fauna silvestre, especialmente cuando se incluyen especies nativas en plantaciones mixtas (Salazar 2009).

La reforestación también puede ayudar a restaurar los bosques y sus funciones de reservorio genético, de absorción de carbono atmosférico, y de mitigación del calentamiento de la atmósfera (Mery *et al.* 2009).

Los procesos de reforestación son complejos, ya que se dan dentro de sistemas socioecológicos en donde, según Chapin *et al.* (2006) y Resilience Alliance (2010), interactúan una serie de variables sociales que caracterizan los actores de la reforestación, y variables ecológicas de los recursos como el suelo y la biodiversidad. Esas variables son influidas a su vez por factores como la gobernanza, la economía regional, y el clima. Abordar las interacciones socioecológicas supone tomar en cuenta también los múltiples procesos o dinámicas en juego. Permite repensar la forma en que intervenimos los ecosistemas de los que depende el bienestar humano (Resilience Alliance 2010).

Las formas más tradicionales de plantación para la producción de madera pueden fracasar si se falla en aspectos como la selección de las especies o el manejo temprano de la plantación. Plantar para generar otros bienes y servicios ecosistémicos (p. ej. conservación de los recursos hídricos) es aún más complejo y puede implicar sacrificios en términos de productividad (Lamb *et al.* 2005).

Los esfuerzos de reforestación en los trópicos no han llenado las expectativas de proporcionar medios de vida sostenibles y restaurar la provisión de servicios ambientales (Lamb *et al.* 2005). En un estudio realizado por Hoch *et al.* (2009) en donde se consideraron 225 iniciativas de reforestación de la Amazonia, las pobres condiciones de salud y crecimiento de los árboles, aunado a los bajos rendimientos y las pocas opciones de comercialización, resultaron en que los productores pudieran comercializar sus productos en solamente el 30% de los casos evaluados. Estudios demuestran que en los países en vías de desarrollo, las iniciativas establecidas y mantenidas con incentivos no son sostenibles después que termina el apoyo financiero (Roche 1997). En el estudio de Hoch *et al.* (2009) se encontró que solamente del 5 al 10% de los productores continúan manteniendo las plantaciones una vez que termina la ayuda económica.

Asegurar el éxito a largo plazo es uno de los mayores desafíos que enfrentan muchas de las iniciativas de reforestación en los países en vías de desarrollo, y al mismo tiempo se sabe muy poco acerca de lo que influye en su resultado y en qué situaciones estas tienen éxito o fracasan (Hoch *et al.* 2009; Le *et al.* 2012).

Son necesarias nuevas propuestas para evaluar el desarrollo de las iniciativas, tanto a corto como a largo plazo, así como su desempeño ambiental y socioeconómico. Garantizarán mejores resultados tomando en cuenta el riesgo en la inversión de los productores (Piotto *et al.* 2003; Le *et al.* 2012) y los diferentes puntos de vista de los actores involucrados en la reforestación. Al mismo tiempo, considerando que en los países tropicales en vías de desarrollo la reforestación generalmente no es la actividad principal en la finca (Salazar 2009), su monitoreo y evaluación no pueden implicar mucha inversión de tiempo o recursos económicos por parte de los reforestadores. Además, para que estas propuestas de evaluación sean adoptadas por los reforestadores y organismos competentes, su

participación es imprescindible (Ramakrishnan *et al.* 1994; ITTO 2002; Keulen *et al.* 2005; Le *et al.* 2012; Oudenhoven *et al.* 2012).

La participación de los diferentes actores, tomando en consideración los conocimientos y prácticas locales, es esencial para el sostenimiento de las iniciativas de reforestación (Ramakrishnan *et al.* 1994; Chazdon 2008; Hoch *et al.* 2009). La participación, que incluye el consenso y compromiso de los diferentes actores, es un proceso que puede permitir el entendimiento conjunto de las diferentes dinámicas socioecológicas que intervienen en su resultado, y consecuentemente identificar oportunidades y estrategias que les permitan encaminarse hacia la sostenibilidad de los ecosistemas forestales tropicales y la provisión sostenible de servicios ecosistémicos.

El presente estudio ha sido construido desde un enfoque sistémico y con la participación de reforestadores y actores de la región de Balalaica. Se realizaron actividades de socialización del proceso, y de modelación y evaluación participativa que se detallan a continuación.

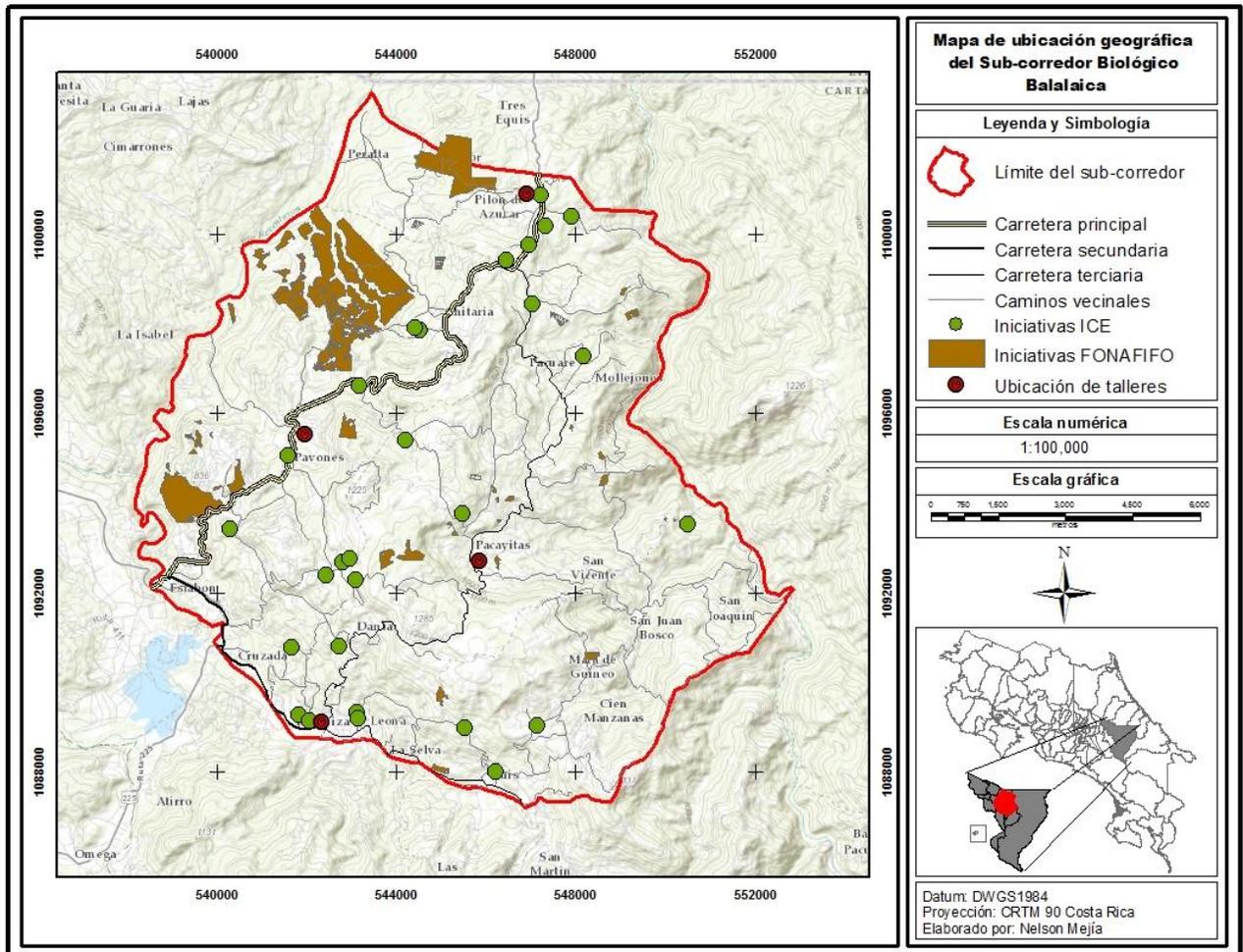
## **2.3 Materiales y métodos**

### **2.3.1 Área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en el ámbito correspondiente al Subcorredor Biológico Balalaica perteneciente al Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca (**Figura 5**). Comprende totalmente el distrito de Pavones, y parte de los distritos de La Suiza, Tres Equis y Tuis, del cantón de Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica. Posee una extensión de 144,14 km<sup>2</sup>, con altitudes que van desde los 1 270 msnm en las partes más altas, conocida como la fila Balalaica, hasta los 370 msnm en las zonas más bajas cercanas al río Tuis y el río Reventazón (Vásquez 2008). Según datos de la estación meteorológica del CATIE, la precipitación promedio anual es de 2 695,6 mm, y la temperatura promedio anual es de 21,8°C. Los suelos son en su mayoría inceptisoles y en menor grado ultisoles.

### **2.3.2 Iniciativas de reforestación**

Basándose en los registros del Centro de Servicio Gestión Ambiental y Cuencas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la base de datos del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), se lograron ubicar en campo un total de 53 iniciativas de reforestación dentro del Subcorredor Biológico Balalaica (**Figura 5**).



**Figura 5.** Ubicación geográfica del Subcorredor Biológico Balalaica.

Las iniciativas fueron después agrupadas en categorías y subcategorías de acuerdo con la tipología mostrada en el **cuadro 2**. De estas, 29 corresponden a iniciativas impulsadas por el ICE y 24 impulsadas por FONAFIFO.

**Cuadro 2.** Tipología de las iniciativas de reforestación identificadas.

Categoría	Sub-categoría	Número de iniciativas
PSA	Modalidad Reforestación	4
	Modalidad SAF	15
Generación de productos	Plantación en parche	15
	Plantación en SAF	2
Provisión de servicios ecosistémicos	Conservación ecológica	10
	Protección de recursos hídricos	7 <sup>4</sup>

<sup>4</sup> De estas, 3 corresponden a las Asociaciones de Acueductos Rurales (ASADAS) de La Suiza, Pacayitas y Tres Equis.

Estos hallazgos fueron compartidos y discutidos en asambleas generales del Corredor Biológico Cordillera Volcánica Central Talamanca (CBCVCT) y del recién creado Consejo Local Forestal Turrialba-Jimenez (ColFor), actores clave en la problemática de sostenibilidad de la reforestación (**Figura 6**). Estas reuniones permitieron dar a conocer la investigación en curso y confirmar su relevancia desde el punto de vista de esas organizaciones locales.



**Figura 6.** Socialización de resultados preliminares ante el CBCVCT (izquierda) y el ColFor (derecha).  
Fuente: Foto propia

### **2.3.3 Análisis de la dinámica del socioecosistema concernido por una iniciativa de reforestación**

Para identificar y caracterizar los actores y recursos determinantes en las iniciativas de reforestación y los procesos que los vinculan, se aplicó el método PARDI, adaptado de ARDI Etienne *et al.* (2011) por Fallot (2013) para el análisis de las dinámicas socioecológicas de un territorio.

El método **PARDI** (**P**roblemática – **A**ctores – **R**ecursos – **D**inámicas – **I**nteracciones) sirve para construir colectivamente con sus actores, un modelo conceptual o una representación común de cómo funciona el territorio (en este caso el Subcorredor Biológico Balalaica), mirado como un sistema socioecológico, según una problemática de desarrollo específica. Esto permitió abrir una discusión con los diferentes actores acerca del funcionamiento de los distintos procesos concernientes a una iniciativa de reforestación. La modelación participativa permite a los actores tener un mejor entendimiento del sistema socioecológico en el cual interactúan. De esta forma se promueve una visión común con la cual se facilita la identificación de soluciones consensuadas.

La *problemática* central se define como la pregunta de trabajo, el tema sobre lo cual se considera intervenir en un proceso de decisión colectiva y de desarrollo de conocimiento. Por *actores* se entiende todas aquellas personas individuales, productores independientes (privados), instituciones públicas y/o privadas, organizaciones locales, y demás entidades que tengan incidencia en la problemática. Los *recursos* son aquellos bienes o productos considerados por los actores con respecto a la problemática del territorio. Por *dinámica* se entiende un proceso, un flujo de personas, bienes o materias, un orden cronológico o sucesión de varios estados, o una relación entre dos recursos. Las *interacciones* son las relaciones entre los actores o entre los actores y recursos.

Se llevó a cabo un taller para la construcción de un modelo conceptual en cinco lugares. Se realizaron cuatro talleres junto con reforestadores y actores de La Suiza, Pavones, Pacayitas, y Tres Equis. Un último taller se realizó en una asamblea mensual del ColFor con el fin de considerar también la perspectiva de los actores institucionales que no habían participado en los talleres con reforestadores (**Figura 7**).

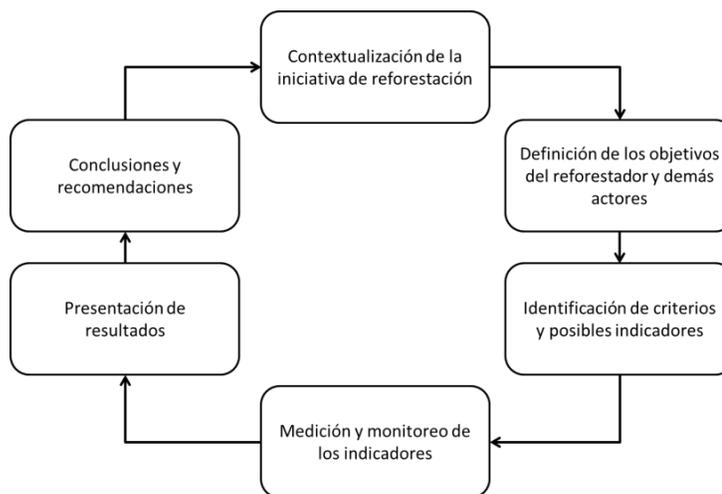


**Figura 7.** Taller de trabajo para aplicar el método PARDI desarrollado con reforestadores y actores de la comunidad de Pavones (izquierda) y con el ColFor (derecha). Fuente: Foto propia

El conocimiento generado en los talleres se puso en perspectiva con literatura relacionada con las diferentes temáticas abordadas. Esto con el fin de conocer otras experiencias, y acciones potenciales que podrían ayudar a abordar de mejor manera la problemática.

### 2.3.4 Desarrollo de un conjunto de indicadores de sostenibilidad de la reforestación

Para desarrollar de forma participativa un conjunto de indicadores que permitiera evaluar la sostenibilidad de una iniciativa de reforestación, se propuso un ciclo de evaluación adaptado del Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo Utilizando Indicadores de Sostenibilidad (MESMIS) (López-Ridaura *et al.* 2002; Keulen *et al.* 2005) (**Figura 8**).



**Figura 8.** Ciclo de evaluación de una iniciativa de reforestación. Adaptado del marco para la evaluación de la sostenibilidad (MESMIS) (López-Ridaura *et al.* 2002; Keulen *et al.* 2005)

Se llevó a cabo un nuevo taller con reforestadores en cada una de las cuatro mismas localidades. Se propuso una serie de indicadores producto de una revisión de literatura basada en los estudios de López-Ridaura *et al.* (2002); Keulen *et al.* (2005); Feld *et al.* (2010); Astier *et al.* (2011); Le *et al.* (2012); Oudenhoven *et al.* (2012); y Le *et al.* (2014) sobre la evaluación de iniciativas de reforestación y sistemas de manejo de recursos naturales.

Los indicadores habían sido preseleccionados de acuerdo con dos criterios: primero, que abarcaran los cuatro ámbitos económico, ecológico, social y cultural; y segundo, que fueran indicadores prácticos y fáciles de monitorear por parte del reforestador, sin la implicación de mayor conocimiento técnico e inversión de tiempo y/o dinero (**Cuadro 3**).

**Cuadro 3.** Indicadores preseleccionados para la evaluación y monitoreo de una iniciativa de reforestación.

Ámbito	Indicador	Descripción
Económico	Inversión inicial	Montos invertidos en la actividad puntual de plantación.
	Inversión anual	Montos invertidos en actividades posteriores a la plantación (silvicultura, manejo).
	Ingresos netos	Ingresos directos (raleo, leña) o indirectos (turismo) generados por la reforestación hasta la fecha.
	Ingresos potenciales	Beneficios económicos proyectados de la reforestación.
	Claridad de mercados	Nivel de entendimiento y planificación de la comercialización de los productos de la reforestación.
Ecológico	Contribución a la calidad del suelo	Aporte de la reforestación a parámetros de calidad del suelo.
	Desarrollo del árbol	Estado del árbol de acuerdo con parámetros de crecimiento y calidad.
	Vida silvestre existente	Aporte de la reforestación a la provisión de un hábitat para la vida silvestre.
	Relación sitio - especie	Coherencia entre los objetivos de la reforestación, los requerimientos de la especie, y el potencial del sitio.
Social	Capacidades técnicas	Habilidades obtenidas por el reforestador a través de la experiencia, capacitaciones y/o asesoría técnica.
	Nivel de organización local	Capacidades asociativas del reforestador.
	Dependencia de insumos externos	Nivel de autosuficiencia del reforestador para el establecimiento y continuidad de la reforestación.
	Nivel de apoyo estatal	Grado de cumplimiento del papel de las instituciones estatales
Cultural	Generación de empleo local	Aporte de la reforestación a la economía local a través de la creación de empleo.
	Contribución a la cultura local	Aporte de la reforestación a las costumbres locales y a la provisión de beneficios de interés común.

Durante el taller, los reforestadores presentes formularon los objetivos de sus propias iniciativas, y vincularon esos objetivos a los indicadores propuestos (**Cuadro 4**). Con esto lo que se buscaba es que finalmente los indicadores seleccionados sirvieran para evaluar los objetivos de los reforestadores en la región de Balalaica.

**Cuadro 4.** Vinculación de indicadores con objetivos de los reforestadores de La Suiza y sus alrededores.

Objetivo de la iniciativa	Ámbito														
	Económico					Ecológico					Social			Cultural	
	II	IA	IN	IP	CM	CS	DA	VS	RSE	CT	OL	DIE	AE	EL	CL
Formar un capital	X	X	X	X	X	X	X			X	X				X
Conservación ecológica	X	X					X	X	X	X		X			X
Protección de nacientes y recursos hídricos	X	X				X	X		X	X	X	X	X	X	X
Alimento para su familia y fauna	X	X	X	X	X		X	X		X				X	
Producción de madera	X	X	X	X	X		X		X	X	X		X	X	
Recreación	X	X					X	X	X	X	X	X			X
Satisfacción personal	X	X					X	X		X	X	X			X
Diversificación de recursos	X	X	X	X	X	X	X			X			X	X	X
Evitar derrumbes y erosión	X	X					X		X	X			X		X
Evitar efectos adversos al ecosistema	X	X					X		X	X			X		X
Evitar uso de productos químicos	X	X					X			X					
Turismo	X	X					X			X					X

(II) Inversión inicial; (IA) Inversión anual; (IN) Ingresos netos; (IP) Ingresos potenciales; (CM) Claridad de mercados; (CS) Contribución a la calidad del suelo; (DA) Desarrollo del árbol; (VS) Vida silvestre existente; (RSE) Relación sitio - especie; (CT) Capacidades técnicas del reforestador; (OL) Nivel de organización local; (DIE) Dependencia de insumos externos; (AE) Apoyo estatal; (EL) Generación de empleo local; (CL) Contribución a la cultura local

## 2.4 Resultados y discusión

### 2.4.1 Construcción del modelo conceptual

#### *Problemática*

En el taller PARDI se consensó siempre trabajar a partir de la siguiente problemática: ¿Cómo asegurar que las iniciativas de reforestación se mantengan en el tiempo en la región de Balalaica?

#### *Actores*

En general se identificaron ocho tipos de actores: individuo, institución del gobierno nacional y local, academia, empresa privada, organización y plataforma social, y agrupación gremial.

Según el modelo construido, inciden directamente sobre la problemática los actores individuales como el mismo reforestador, este es el mayor responsable. También el promotor de PSA y el regente forestal, de quienes depende la tramitología para la inserción y financiamiento de los PSA.

Los actores institucionales son el ICE, quien a través de la donación de plantas promueve la reforestación principalmente con el fin de disminuir las tasas de erosión y conservar los recursos hídricos, FONAFIFO como administrador de los incentivos para la reforestación, y el

Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) como ente encargado, junto con FONAFIFO, de velar por el cumplimiento de los contratos de PSA. Finalmente están los actores privados como los bancos de semillas, responsables de la provisión del material genético, y los viveros forestales encargados de producir las plantas en tiempo y forma.

De forma indirecta inciden sobre la problemática la academia, encargada de generar información útil para la toma de decisiones por parte de todos los demás actores; y organizaciones locales como las ASADAS, quienes priorizan la reforestación para proteger sus nacientes captadas. También instituciones gubernamentales como el Instituto Nacional de Aprendizaje (INA), como formador de capacidades técnicas en el área de producción de plantas, y el establecimiento y manejo de la reforestación; y los gobiernos locales como la municipalidad de Turrialba, encargada de velar por la construcción y mantenimiento de la infraestructura (p ej. caminos, puentes) imprescindible para el desarrollo del sector forestal de la región.

Se encuentra también la empresa privada como la industria procesadora de la madera, quien junto al Centro Agrícola Cantonal de Turrialba (CACTU) ofrecen un mercado potencial para los productos generados por la reforestación; agrupaciones gremiales como el Colegio de Ingenieros Agrónomos (CIAgro), encargado de velar por el buen desempeño profesional de los regentes forestales; plataformas sociales como la Alianza Bosque Modelo Reventazón (ABOMORE), como plataforma de colaboración de los diferentes actores en procesos de conservación y gestión de los recursos naturales de la región, aunque esta fue solamente reconocida en uno de los cuatro talleres. Además actores individuales como el vecino de la finca, quien con sus acciones puede ayudar o perjudicar la reforestación (p ej. en el manejo de nidos de zompopas, cuyas galerías subterráneas usualmente no se limitan a una sola finca).

En menor grado fueron mencionados algunos actores cuya ausencia perjudica de una forma u otra las iniciativas de reforestación: el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), como promotor y regulador de las principales actividades productivas de la región, y quien podría servir como enlace o plataforma para la convocatoria de los reforestadores; el Ministerio de Educación (MEP), encargado de concientizar a los jóvenes de la importancia del buen manejo de los recursos naturales; el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcatarillados (AyA), quien debería involucrarse considerando su papel en la conservación de los recursos hídricos, coordinando esfuerzos de reforestación con propietarios que posean nacientes de agua dentro de sus fincas; el Instituto Costarricense de Turismo (ICT), como promotor del turismo de montaña del cual podrían formar parte los reforestadores.

### ***Recursos***

Se identificaron básicamente cinco tipos de recursos: insumos para el establecimiento, medios para el desarrollo, productos, medios para la comercialización de productos, y elementos contraproducentes a la reforestación.

Como insumos para el establecimiento de la reforestación se identificaron las semillas, cuya procedencia y viabilidad son factores primordiales a considerar para iniciar con buen pie

una iniciativa de reforestación. También todos los materiales, herramientas e insumos químicos y orgánicos utilizados para la producción de plántulas en los viveros. Este proceso fue posteriormente valorado y se encontraron buenas capacidades técnicas por parte de las personas encargadas, pero al mismo tiempo limitaciones de infraestructura permanente y más adecuada para garantizar la producción de plantas de calidad.

Como medios para el desarrollo de la reforestación se reconoció la relevancia de las dinámicas de sustento mutuo entre el árbol, el agua, el suelo y los nutrientes que contiene.

Como productos de la reforestación se identificó primordialmente la madera. No obstante también se reconoció la madera de raleo, la leña y algunos productos forestales no maderables (PFNM) (p ej. aserrín, frutos, postes, forraje) como productos secundarios que pueden ser comercializados o aprovechados por el reforestador.

Se identificó la infraestructura vial como un medio importante para el acceso, la extracción, y comercialización de los productos generados por la reforestación.

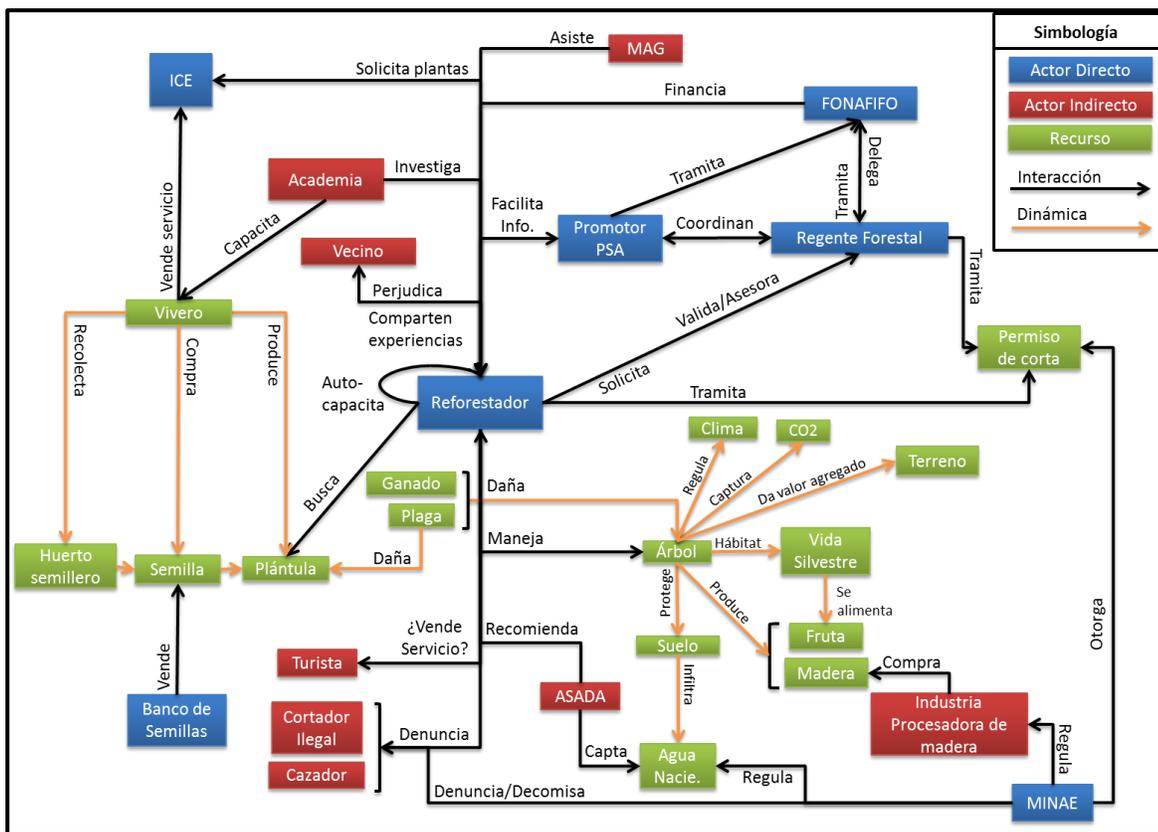
Como elementos contraproducentes a la reforestación se identificaron las plagas y enfermedades (p ej. zompopa, muérdago, topos), el cortador y cazador ilegal, y el ganado.

### *Dinámicas e Interacciones*

Las principales dinámicas e interacciones entre los actores y recursos de la región de Balalaica se pueden apreciar en el ejemplo del modelo conceptual presentado en la **figura 9**.

En general se conoció que el reforestador de Balalaica carece de asesoría técnica en el tema de reforestación, situación que lo obliga a experimentar de forma empírica y autocapacitarse, pero que a la vez resulta en valiosos conocimientos y capacidades locales que no deben de ninguna forma ser menospreciados. Las instituciones representadas en el ColFor de hecho reconocen que el reforestador no cuenta con un programa formal de capacitación y asistencia técnica. Temas como la selección de la especie, el manejo de plantaciones, la elaboración de planes de negocios, opciones de mercado, fueron mencionados como conocimientos de importancia para el reforestador pero de los cuales carece, y que de una forma u otra ponen en riesgo la sostenibilidad de sus iniciativas.

En Balalaica, uno de los problemas más relevantes que enfrenta el reforestador son las plagas, específicamente la hormiga denominada zompopa, la cual según Arguedas (2006) sigue siendo uno de los grupos que mayores daños causa a plantaciones recién establecidas en Costa Rica. Según la experiencia de los reforestadores locales, tanto las especies nativas como las que expiden látex, como el gallinazo (*Schizolobium parahyba*), tienden a ser más resistentes al ataque de esta plaga. Después de analizar varias experiencias con especies nativas en Costa Rica, Montagnini (2004) afirma que las plantaciones mixtas tienden a sufrir ataques menos severos de ciertas plagas, en comparación con las plantaciones puras.



**Figura 9.** Modelo conceptual elaborado con reforestadores y actores de la comunidad de Pavones y sus alrededores. Fuente: Elaboración propia a partir del trabajo colectivo.

En un estudio realizado por Piotto *et al.* (2003) en el Atlántico de Costa Rica, se concluye que las especies nativas tienden a ser más prometedoras que las exóticas, para diferentes usos y bajo diferentes condiciones ecológicas. Además sostiene que las especies nativas se adaptan mejor a las condiciones de manejo no intensivas típicas de las fincas pequeñas y medianas en las regiones tropicales. En el **cuadro 5** se puede observar la experiencia local de los reforestadores con algunas especies.

**Cuadro 5.** Experiencia local con algunas especies utilizadas en la reforestación.

Nombre común	Nombre científico	Experiencia local	Pertenencia
Acacia	<i>Acacia mangium</i>	Buen prendimiento y crecimiento	Exótica
Araucaria	<i>Araucaria sp.</i>	Perseguido por hormigas	Exótica
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	Perseguido por hormigas e inapropiado para la zona	Nativa
Eucalipto	<i>Eucalyptus sp.</i>	Perseguido por hormigas	Exótica
Gallinazo	<i>Schizolobium parahyba</i>	Expide un látex que impide el avance de la hormiga y también es una especie que fija nitrógeno	Nativa
Jabúl	<i>Syzygium cumini</i>	Inapropiado para zonas bajas	Nativa
Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	Alta mortalidad cuando se asocia con la caña	Nativa
Palmito de pejibaye	<i>Bactris gasipaes</i>	Producción sostenible asegurada por los rebrotes, se obtiene palmito después de dos años	Nativa
Pino	<i>Pinus caribaea</i>	Perseguido por hormigas y por el ganado	Exótica

Fuente: Elaboración propia a partir de información brindada por reforestadores.

Por otro lado, las ASADAS que han plantado árboles con el fin de proteger sus nacientes captadas para consumo humano manifiestan que las raíces de algunas especies perjudican el sistema de distribución del acueducto. Estos son claros ejemplos de la importancia del conocimiento técnico con el que un reforestador debe contar al momento de incursionar en una iniciativa.

También se argumentó que la reforestación, al no verse como un cultivo, se deja a que se desarrolle bajo su propia suerte, algo soportado por Salazar (2009), quien sostiene que en los trópicos la reforestación no es vista como una actividad productiva o remunerativa.

Se sostuvo que otras actividades de la finca como la ganadería, actividad de mucha relevancia para la región de Balalaica, podría perjudicar el establecimiento de la plantación a través del pisoteo de las plantas o al alimentarse de las mismas. También el desarrollo de los árboles puede verse perjudicado cuando el ganado se frota contra los fustes. Además Siavosh *et al.* (2000) demostraron en un estudio realizado en Quindío, Colombia, que el pisoteo de los animales en sistemas ganaderos ocasionó la compactación de los suelos y con ello modificó notoriamente la relación suelo-aire-agua. Las anteriores son razones por las cuales no es recomendable que los animales tengan acceso al área plantada, especialmente si los árboles se encuentran en una etapa de desarrollo temprana y cuando el objetivo principal en esa parte de la finca sea la plantación. Por otro lado, si lo que se busca es una complementariedad en sistemas silvopastoriles, los árboles pueden proveer una variedad de productos y servicios como cercas vivas, sombra, división de lotes, demarcación de linderos, control de la erosión, y como bancos forrajeros bajo corte o pastoreo directo para la suplementación animal (Botero *et al.* 1998).

En cuanto a los productos de la reforestación, adicionalmente a la madera, se identificaron productos secundarios como la leña que puede ser obtenida de raleos intermedios o de la poda, reconociendo a las panaderías, los trapiches, y los beneficios como usuarios potenciales de dichos productos. También se identificaron productos forestales no maderables (PFNM) como frutos, forraje, postes y medicinas, entre otros. En el estudio de Hoch *et al.* (2009) en la Amazonia, los PFNM presentaron las tasas de comercialización más altas en las iniciativas evaluadas. En Vietnam, los PFNM son una parte importante de los ingresos de millones de hogares (Sunderlin y Huynh 2005), y en Camerún y la República Democrática del Congo también permiten la generación de empleo a gran escala, la seguridad alimentaria y son esenciales para la salud de las personas (Awono *et al.* 2013).

Como servicios provistos por la reforestación se reconoció su función como hábitat y conectividad para la vida silvestre, algo muy relevante considerando el objetivo primordial del Subcorredor Biológico Balalaica. La conservación del suelo y los recursos hídricos, también son relevantes para las actividades de generación de energía hidroeléctrica en la cuenca del Reventazón y las actividades de rafting y ecoturismo en la cuenca del Pacuare. También se reconocieron los servicios de regulación del clima, y la captura y almacenamiento de carbono.

En esta línea, el mercado del carbono fue mencionado como una opción que podría ser viable para algunas iniciativas de reforestación en Balalaica. Miranda *et al.* (2002) sugieren

que para lograr esta viabilidad en los países tropicales en vías de desarrollo es necesario poner el mercado de carbono en una perspectiva más amplia, viéndolo como un mecanismo social para mejorar tanto la calidad de vida de las poblaciones locales como el medio ambiente, más que el clima como tal.

De acuerdo con una experiencia local en Balalaica, es necesario asegurarse que las previsiones de crecimiento de los árboles, en las cuales se basa la viabilidad económica del proyecto, sean las más exactas posibles para evitar una sobreestimación de los beneficios esperados. Según Murdiyarsó *et al.* (2005) los costos de transacción en proyectos pequeños son relativamente altos, no obstante la agrupación de una serie de proyectos pequeños resultarían en la reducción sustancial de los mismos. Además sostiene que la construcción de capacidades locales en el proceso de monitoreo podría incluso aumentar los ingresos directos.

El turismo de montaña también fue visto como una opción atractiva para el reforestador, siempre y cuando también se cuente con la infraestructura y las atenciones necesarias para recibir personas. Además se argumentó que los árboles aumentan significativamente el valor de la tierra. En Guanacastillo, Nicaragua, el valor de las tierras casi se triplicó cuando pasaron de ser tierras carentes de cualquier tipo de cobertura vegetal a ser tierras arborizadas; los árboles, lejos de depreciarse, representan un capital que sigue creciendo e incrementando su valor (Barahona 1998). Asimismo los árboles actúan como una cuenta de ahorro personal, ya que cuando el productor se encuentra en necesidad de dinero rápido siempre puede cortar algunos árboles (Cormier 2013).

En cuanto al programa de incentivos para la reforestación que actualmente lidera FONAFIFO, se conocieron algunas limitaciones para acceder a los PSA. Algunas de carácter legal, como problemas de tenencia de la tierra y juicios legales de embargos de fincas, que vienen a dilatar o a detener totalmente el proceso. Otro aspecto es la centralización de algunos trámites en la sede central de FONAFIFO en la capital, adonde los solicitantes deben movilizarse para firmar los contratos una vez que están aprobados. Esto también retarda o termina con los procesos ya que algunos solicitantes no encuentran el tiempo o la disposición de movilizarse. Esto podría agilizarse si se delegara este trámite, por ejemplo, a las oficinas regionales del MINAE.

Se identificó un vacío en el control y monitoreo de la plantación después de que finalizan los pagos por servicios ambientales (año 3 de la plantación) antes del tiempo de vigencia del contrato (año 5 de la plantación), los cuales por falta de financiamiento no pueden realizarse de forma sistemática, entonces se realizan aleatoriamente. Esto se atribuye en parte a que el CIAgro no exige al regente forestal hacer más visitas después de los tres años en los que se hacen los desembolsos. También se enfatizó, específicamente en la zona de Pacayitas, la dilatación de los trámites administrativos por parte del regente forestal para gestionar los diferentes desembolsos, situación que viene a desmotivar al reforestador y a poner en riesgo la iniciativa.

Por otro lado se manifestó la necesidad de más incentivos para la reforestación por parte del Estado, los cuales no necesariamente tienen que ser monetarios, y que estos deben considerar también los sistemas silvopastoriles y no solo los agroforestales. Se identificó al Comité para el Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Reventazón (COMCURE) como ente que podría financiar estos incentivos a través del canon de aguas que recibe. Sikor (2011) sostiene que el acceso a incentivos u otro tipo de financiamiento externo influye significativamente sobre la capacidad de pequeños productores de plantar árboles, especialmente con fines comerciales. Afirma que estos tienden a manejar los árboles de una forma más intensiva y bajo periodos de rotación más largos si tienen acceso a este tipo de financiamientos.

Finalmente se sostuvo por parte de los reforestadores que el conocimiento generado por la investigación, realizada por la academia, parece nunca regresar a brindar alguna alternativa a las problemáticas abordadas. El ColFor reconoció que nadie se está encargando de la transferencia tecnológica, aunque se identificó a la Oficina Nacional Forestal (ONF) como el ente que por ley tiene el mandato de realizar acciones de promoción forestal y transferencia de tecnología, lo cual no se está llevando a cabo en la región de Balalaica. Según Hoch *et al.* (2009) esta situación también contribuye a que no se puedan extender las tan valiosas capacidades y conocimientos locales.

La incorporación de la Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR), con su experiencia en temas como la comercialización y mercados forestales en otras regiones del país, podría traer mucho beneficio a la región de Balalaica. El ColFor, por su parte, como nueva figura, podrá velar por y estimular el desarrollo del sector forestal de la región.

#### **2.4.2 Herramienta Práctica para la Evaluación de una Iniciativa de Reforestación a Pequeña Escala (EvaRefo)**

De forma participativa se formuló una herramienta práctica para la evaluación de una iniciativa de reforestación a pequeña escala, denominada "EvaRefo". La herramienta está constituida por indicadores de contexto, de potencial, y de desempeño, que pueden ser monitoreados incluso por el mismo reforestador. Un factor a tener en cuenta al momento de seleccionar indicadores es considerar aquellos que presentan menores costos y simplicidad operacional durante la medición (Astier *et al.* 2011). Se busca una transferencia de conocimiento científico y local, mediante el establecimiento de un diálogo ciencia – sociedad a través de indicadores.

La herramienta consta de tres partes que se adjuntan a este documento: un formulario de campo donde consignar información sobre la iniciativa de reforestación; una guía del usuario con explicaciones e instrucciones para llenar el formulario de campo; y unas hojas de cálculo donde procesar y visualizar la información, y generar indicadores de sostenibilidad.

La herramienta fue aplicada a seis iniciativas de reforestación con diferentes objetivos: producción de madera, turismo rural con PSA, sistema agroforestal con PSA, conservación ecológica con PSA, protección de recursos hídricos, y producción de madera con PSA. En la

**figura 10** se puede apreciar la evaluación, por parte de los mismos reforestadores, de algunos de los parámetros concernidos en la herramienta.



**Figura 10.** Determinación práctica del drenaje y textura del suelo. Fuente: Foto propia.

### *Indicadores de contexto*

En el **cuadro 6** se muestran algunos indicadores sobre el contexto de las iniciativas evaluadas. En general estas son a pequeña escala y se encuentran en una etapa de desarrollo temprana. Cabe mencionar que en cuatro de los seis casos la forestería no es la actividad principal de la finca, sino más bien es subsidiada en los hechos hasta el momento por las otras actividades productivas.

**Cuadro 6.** Contexto de las iniciativas evaluadas.

Objetivo de la iniciativa	Variables contextuales					
	Área de la iniciativa (ha)	Especie (s) plantada	Edad de la plantación (años)	Altitud del sitio (msnm)	Espaciamiento promedio (m)	Actividades productivas de la finca en orden de importancia
Producción de madera	1,5	Gmelina	6	747	3x3	Forestería, producción de tilapia
Turismo rural/PSA	2,0	Botarrama	6	893	3x3	Turismo, forestería
Agroforestal/PSA	2,0	Laurel, poro pequeño y madero negro	2	746	4x4	Agricultura, turismo, forestería
Conservación ecológica/PSA	2,0	Acacia mangium, cedro y chancho blanco	1	1 005	2x2	Ganadería, forestería
Protección de recursos hídricos	0,2	Ceiba, lorito, cristóbal	2	980	3x2.5	Agricultura, forestería
Producción de madera/PSA	5,5	Pino caribe	4	723	3x3	Forestería

Fuente: Elaboración propia a partir de datos recolectados en campo.

### *Potencial de las iniciativas*

Se evaluó el potencial tanto del reforestador como de la iniciativa de reforestación utilizando una escala del 1 a 5, donde el valor de 1 representa un potencial alto y el valor de 5 un potencial bajo (**Cuadro 7**). Se escogió esta escala para lograr una coherencia con las metodologías de Murillo y Camacho (1997); Murillo y Camacho (1998); y Murillo *et al.* (2006); metodologías propuestas para evaluar el indicador de desarrollo de la calidad de los árboles, y que utilizan una escala del 1 al 3 para valorar las diferentes variables.

**Cuadro 7.** Evaluación del potencial del reforestador y de la iniciativa según su objetivo principal.

Indicadores del potencial del reforestador y de la Iniciativa	Objetivo de la iniciativa						Promedio
	Producción de madera	Turismo rural/PSA	Agroforestal/PSA	Conservación ecológica/PSA	Protección de recursos hídricos	Producción de madera/PSA	
Capacidades asociativas	5,0	1,0	1,0	5,0	1,0	4,0	2,8
Capacidades técnicas	3,3	2,3	3,7	4,3	3,3	3,3	3,4
Autosuficiencia	1,0	3,0	5,0	1,0	1,0	2,0	2,2
Claridad de mercados	1,0	2,0	3,0	5,0	5,0	5,0	3,5
Aptitud de la especie	1,8	1,8	1,5	1,3	1,5	2,6	1,8
<b>Promedio</b>	<b>2,4</b>	<b>2,0</b>	<b>2,8</b>	<b>3,3</b>	<b>2,4</b>	<b>3,4</b>	<b>2,7</b>

Fuente: Elaboración propia

En general se puede observar un potencial medio de los reforestadores e iniciativas evaluadas. Algunos de los reforestadores poseen buenas capacidades asociativas principalmente debido a su interés en participar activamente en las organizaciones locales y regionales que trabajan en el manejo de los recursos naturales. En estas organizaciones podrían buscar apoyo al momento de enfrentar dificultades en el manejo de su reforestación o incluso al momento de comercializar algunos productos.

Coincidiendo con los resultados del método PARDI, los reforestadores evaluados muestran un nivel relativamente bajo de capacidades técnicas, considerando el grado de asesoría y capacitación técnica recibida, así como el tiempo de experiencia en reforestación, algunos considerando este estudio como el primer acercamiento técnico que han recibido.

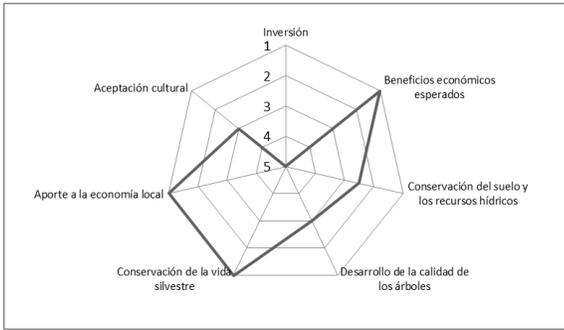
Los reforestadores que no reciben o han recibido algún tipo de incentivo por la reforestación son los que manifestaron el mejor nivel de autosuficiencia, lo que significa que la sostenibilidad de sus iniciativas no depende de financiamientos externos. Los que sí reciben incentivos han mostrado un nivel medio a alto de dependencia en estos incentivos, ya sea para el establecimiento o para la continuidad de la plantación. En Costa Rica los programas de incentivos y de asistencia técnica son necesarios para estimular la reforestación, especialmente entre productores pequeños y medianos con recursos financieros limitados (Piotto *et al.* 2003).

Las especies seleccionadas muestran en general una buena aptitud de acuerdo con el objetivo de la iniciativa y características del sitio, como la altitud, la textura del suelo, y el régimen de precipitación.

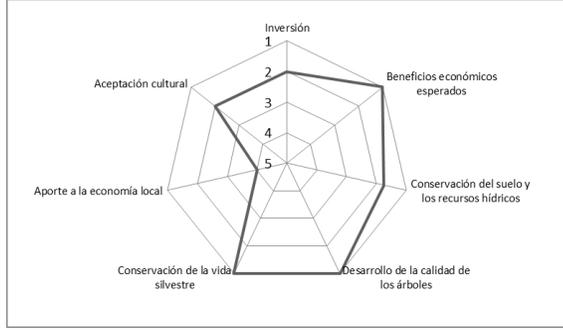
#### *Desempeño de las iniciativas*

Las hojas de cálculo permiten visualizar a través de gráficos los indicadores de desempeño propuestos utilizando la misma escala del 1 (alto) al 5 (bajo) (**Figura 11**).

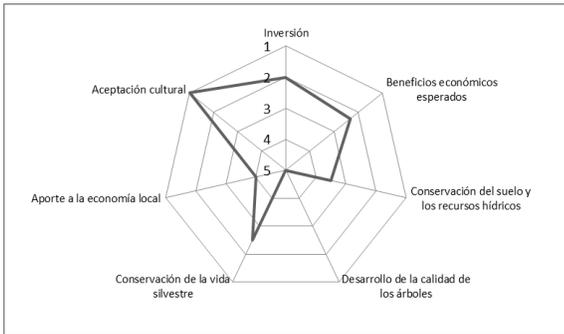
### Producción de madera



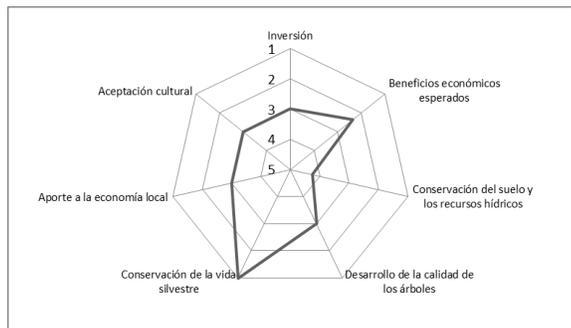
### Turismo rural/PSA



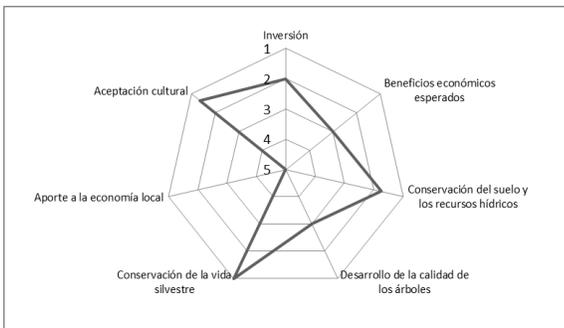
### Agroforestal/Madera/PSA



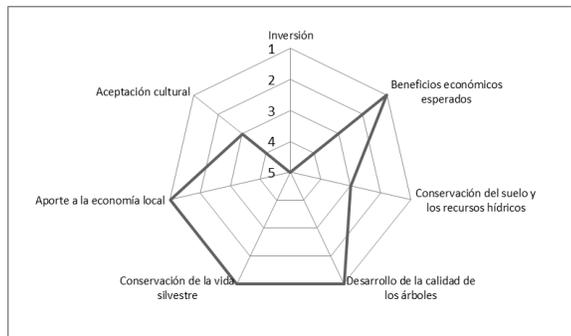
### Conservación ecológica/PSA



### Protección de recursos hídricos



### Producción de madera/PSA



**Figura 11.** Evaluación del desempeño de las iniciativas de reforestación. Fuente: Elaboración propia

Las iniciativas cuyo objetivo principal es la producción de madera son las que requieren de una mayor inversión, por lo que aparecen mal evaluadas en este indicador. Al mismo tiempo este tipo de iniciativas son las que más aportan a la economía local, específicamente a través de la generación de empleo en actividades como el establecimiento y manejo de la plantación. Además, junto con la iniciativa cuyo objetivo principal es el turismo rural, son las que presentan una mayor perspectiva de generar beneficios económicos en el futuro, contrario a las iniciativas establecidas con el objetivo de proteger los recursos hídricos. También se observa que la inversión y los objetivos económicos van ligados a un mejor desarrollo de la calidad de los árboles.

Sikor (2011) sugiere un enfoque de fincas orientadas a la generación de excedentes que practiquen la financiación cruzada entre actividades. Es decir que utilizan el superávit generado en algunas actividades para financiar la plantación, y aprovechan el superávit generado posteriormente por la plantación para financiar otras inversiones en la finca.

Álvarez (2014) evaluó la gestión ambiental de una finca que integra actividades agrícolas, forestales y PSA en la región de Balalaica. El flujo de caja muestra una mayor inversión en los primeros años con el inicio de una plantación de caoba (*Swietenia macrophylla* King) y el cultivo de Culantro Coyote. Al mismo tiempo se observan ingresos importantes en los dos primeros años gracias principalmente al cultivo del culantro, y también a los ingresos provenientes de los PSA, los cuales se reciben con mayores cuantías en los primeros años. En los años posteriores, hasta el año 12 de la plantación cuando se aprovecha el primer raleo comercial, se observa un flujo de caja negativo. Para contrarrestar esto, el estudio propone asociar la plantación de caoba con cacao, un cultivo que requiere de sombra en las etapas iniciales. Encaja bien en la rotación de la plantación de caoba después de realizar el primer raleo entre el año 6 y 8, cuando el cacao empieza a demandar mayor intensidad de luz.

Todas las iniciativas, unas más que otras, están aportando a la conservación de los suelos, los recursos hídricos y la vida silvestre, lo cual es muestra de la multiplicidad de beneficios de la reforestación independientemente de su objetivo principal. Se observa una buena aceptación cultural de la reforestación en Balalaica, lo que podría atribuirse a que la población local se ha identificado con las especies nativas utilizadas o porque reconocen el papel de los árboles en la provisión de servicios ecosistémicos.

### *Consideraciones de los reforestadores*

En general los reforestadores se mostraron interesados en la herramienta de evaluación y manifiestan que les permitió conocer y evaluar aspectos importantes que antes no conocían, y que seguramente los hubiese orientado a tomar diferentes decisiones en el pasado (p ej. la selección de la especie de acuerdo con las características del sitio y los objetivos de la iniciativa, los métodos de plantación y los tiempos para realizar las intervenciones silvícolas, entre otros). Además se consideraron capaces, con una pequeña orientación, de aplicarla ellos mismos, pero que la utilidad real de la herramienta se comprobará a través de su aplicación en el tiempo.

## **2.5 Conclusiones**

En Balalaica el enfoque participativo del estudio permitió tener acceso a una mayor cantidad de ideas y perspectivas sobre la problemática de sostenibilidad de la reforestación, e involucró desde el principio a todos los actores de relevancia. También brindó la oportunidad de que se manifestaran algunos actores que de otra forma posiblemente no lo hubiesen hecho, como por ejemplo el mismo reforestador y los viveristas. El proceso además permitió un intercambio de experiencias y capacidades locales que de otra forma no hubiesen sido compartidas. El buen nivel de participación y el compromiso mostrado por los reforestadores y demás actores que estuvieron presentes en todos los talleres, denota su marcado interés

en el futuro de sus iniciativas y en abordar la problemática de manera conjunta; algo que no debe pasar desapercibido por los actores tomadores de decisiones a niveles más altos.

El proceso participativo se presta para reunir y establecer lazos entre actores que de otra forma podrían no tener contacto. Sin embargo, en Balalaica se tuvo la limitante de una baja participación de los actores institucionales gubernamentales en los talleres realizados en el campo con los reforestadores, aunque sí tuvieron una buena disposición de contribuir con el estudio en otras instancias mencionadas anteriormente. Otra limitante que se presentó en al menos uno de los talleres fue la imposición de criterios por parte de las personas que tienen aparentemente mayores argumentos técnicos que los demás, lo que dificulta la discusión y el aprendizaje colectivo.

En Balalaica los reforestadores no han tenido acceso a un programa formal de capacitación y asesoría técnica. Sin embargo, con el tiempo se han ido generando capacidades locales que hace falta ser tomadas en cuenta por los actores institucionales al momento de iniciar un proyecto orientado a promover sistemas de manejo de recursos naturales sostenibles. No obstante, las instituciones y organizaciones tanto gubernamentales como no gubernamentales deben preocuparse por la generación y transferencia de tecnología formal, especialmente cuando se quiere que las iniciativas sean sostenibles por sí mismas sin la necesidad o después de culminar con los incentivos financieros.

En la medida en que mejoren las capacidades asociativas, incluso hasta el grado de asociarse ya como reforestadores y no solamente como agricultores o ganaderos, permitiría en Balalaica la creación de una plataforma social para el intercambio de capacidades locales, que a la vez facilitaría la gestión mancomunada de recursos, capacitaciones, y asesoría, y el acceso a posibles mercados futuros, incluyendo el del carbono. El haber sentado a los reforestadores y demás actores alrededor de una mesa de discusión, bajo una metodología participativa y de aprendizaje colectivo con este estudio, ya es un primer paso.

En los países tropicales en vías de desarrollo existe una clara disyuntiva entre la imprescindibilidad de los incentivos para que la mayor parte de los pequeños productores puedan incursionar en una iniciativa de reforestación, y la falta de sostenibilidad de las iniciativas una vez que terminan dichos incentivos. Esto podría significar que por mucho tiempo se ha estado prácticamente desperdiciando el dinero en inversiones que no tienen futuro. Será necesario entonces mejorar en aspectos como: la selección del sitio, de la especie, y hasta del mismo reforestador, el seguimiento y agilización de los procesos administrativos de los PSA y la extensión de los plazos de monitoreo de las iniciativas más allá de la duración de los contratos o convenios. Aunque esto signifique hacer uso de los recursos totales disponibles en el programa, se hace bajo la premisa de que es mejor apoyar a menos iniciativas pero con mejores resultados.

Herramientas prácticas que permitan la evaluación participativa, continua y a largo plazo de las iniciativas de reforestación son necesarias para brindarle a los pequeños productores información concreta y útil, después de tanto tiempo de estarles vendiendo expectativas

demasiado ambiciosas que no han traído más que incertidumbre y desmotivación con respecto a los beneficios de la reforestación.

Alternativas que han tenido éxito en otras partes como el cultivo de árboles individuales, el manejo de rodales naturales, así como la promoción de los PFM, y la utilización de especies nativas, merecen ser también tomadas en cuenta como opciones para el desarrollo socioeconómico y la restauración ecológica.

## 2.6 Agradecimientos

Este estudio fue posible gracias a los reforestadores y actores del Subcorredor Biológico Balalaica. Agradecimiento especial a Carlos Selada del ICE y a Jennifer Hernández de FONAFIFO por facilitar las bases de datos, a Max Castillo, Max Piñar y Rafael Montenegro por su valioso apoyo en el reconocimiento de campo, y a Macario Fuentes y ABOMORE por su apoyo en la coordinación de los talleres. Igualmente a Alexis Mora, Buenaventura Núñez, José Fuentes, Manuel Calderón, Yessenia Ramirez, Martín Nájera, Rafael Calderón, y Heather McTavish por su apoyo en la validación de campo.

Se le agradece a Abigail Fallot, Jorge Faustino, Yamileth Astorga y Alejandro Imbach por la revisión del artículo. También se le agradece al Servicio de Intercambio Académico de Alemania (DAAD) y la Escuela Nacional de Ciencias Forestales (U-ESNACIFOR) en Honduras por su aporte financiero para desarrollar la investigación.

## 2.7 Literatura citada

- Álvarez, D. 2014. Evaluación de la gestión forestal y propuestas de actuación en una finca tipo de Tres Equis, Costa Rica. Master en Ingeniería de Montes. Universidad de Valladolid. 95 p.
- Arguedas, M. 2006. Diagnóstico de plagas y enfermedades forestales en Costa Rica *Raíces* 2(8): 0-4.
- Astier, M.; Speelman, E.N.; López-Ridaura, S.; Maserá, O.R.; Gonzalez-Esquivel, C.E. 2011. Sustainability indicators, alternative strategies and trade-offs in peasant agroecosystems: analysing 15 case studies from Latin America *International Journal of Agricultural Sustainability* 9(3): 409-422. Disponible en [http://www.oikos.unam.mx/Bioenergia/images/PDF/Sust/General/Astier%20et%20al%202011-Sust\\_indicator-15-CaseStudie-LA.pdf](http://www.oikos.unam.mx/Bioenergia/images/PDF/Sust/General/Astier%20et%20al%202011-Sust_indicator-15-CaseStudie-LA.pdf)
- Awono, A.; Ingram, V.; Schure, J.; Levang, P. 2013. Guide for small and medium enterprises in the sustainable non-timber forest product trade in Central Africa, CIFOR. 34 p.
- Barahona, T. 1998. Financiamiento para construir la finca. *In*. 1998. Sistemas de financiamiento: teorización y experiencias Managua, Nicaragua, Universidad Centroamericana (UCA). p. 69.
- Botero, R.; Russo, R.O.; Rosales, M.; Osorio, H.; Sánchez, M.; Speedy, A. 1998. Utilización de árboles y arbustos fijadores de nitrógeno en sistemas sostenibles de producción animal en suelos ácidos tropicales *Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica*.
- Breugel, M.v.; Hall, J.S.; Craven, D.J.; Gregoire, T.G.; Park, A.; Dent, D.H.; Wishnie, M.H.; Mariscal, E.; Deago, J.; Ibarra, D.; Cedeño, N.; Ashton, M.S. 2011. Early growth and survival of 49 tropical tree species across sites differing in soil fertility and rainfall in

- Panama Forest Ecology and Management 261(10): 1580-1589. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112710004780>  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.019>
- Cormier, Z. 2013. With microfinancing, Vietnam's rural people emerge as champions of reforestation, CIFOR.
- Chapin, F.S.; Lovcraft, A.L.; Zavaleta, E.S.; Nelson, J.; Robards, M.D.; Kofinas, G.P.; Trainor, S.F.; Peterson, G.D.; Huntington, H.P.; Naylor, R.L. 2006. Policy strategies to address sustainability of Alaskan boreal forests in response to a directionally changing climate Proceedings of the National Academy of Sciences 103(45): 16637-16643.
- Chazdon, R.L. 2008. Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands Science 320: 1458-1460. 10.1126/science.1155365
- Etienne, M.; Du Toit, D.R.; Pollard, S. 2011. ARDI: a co-construction method for participatory modeling in natural resources management Ecology and Society 16(1): 44.
- Fallot, A. 2013. Guía metodológica PARDI, CIRAD-GREEN. 20 p. (Para el análisis de las dinámicas socioecológicas)
- Feld, C.K.; Sousa, J.P.; da Silva, P.M.; Dawson, T.P. 2010. Indicators for biodiversity and ecosystem services: towards an improved framework for ecosystems assessment Biodiversity and Conservation 19(10): 2895-2919.
- Hoch, L.; Pokorny, B.; De Jong, W. 2009. How successful is tree growing for smallholders in the Amazon? International Forestry Review 11(3): 299-310.
- ITTO. 2002. Guidelines for the restoration, management and rehabilitation of degraded and secondary tropical forests, 86 p. (13). Disponible en [http://www.itto.int/direct/topics/topics\\_pdf\\_download/topics\\_id=1540000&no=1&disp=inline](http://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=1540000&no=1&disp=inline)
- Katila, P.; Galloway, G.; Mery, G.; Jong, W.d.; Hetemäki, L.; Alfaro, R.I.; Varjo, J.; (eds). 2010. Policy brief: Making forests work for people and nature - Responding to global drivers of change Finland, IUFRO (International Union of Forest Research Organizations). 36 p.
- Keulen, H.V.; van Ittersum, M.; Leffelaar, P. 2005. Multiscale methodological framework to derive criteria and indicators for sustainability evaluation of peasant natural resource management systems Environment, Development and Sustainability 7(1): 51-69.
- Lamb, D.; Erskine, P.D.; Parrotta, J.A. 2005. Restoration of Degraded Tropical Forest Landscapes Science 310: 1628-1632. 10.1126/science.1111773
- Le, H.D.; Smith, C.; Herbohn, J.; Harrison, S. 2012. More than just trees: assessing reforestation success in tropical developing countries Journal of Rural Studies 28(1): 5-19.
- Le, H.D.; Smith, C.; Herbohn, J. 2014. What drives the success of reforestation projects in tropical developing countries? The case of the Philippines Global Environmental Change 24: 334-348.
- López-Ridaura, S.; Maserá, O.; Astier, M. 2002. Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. The MESMIS framework Ecological Indicators 2(1): 135-148.
- Mery, G.; Galloway, G.; Sabogal, C.; Alfaro, R.; Louman, B.; Kengen, S.; Stoian, D. 2009. Bosques que benefician a la gente y sustentan la naturaleza - Políticas forestales esenciales para América Latina Costa Rica, CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 24 p.
- Mery, G.; Katila, P.; Galloway, G.; Alfaro, R.I.; Kanninen, M.; Lobovikov, M.; Varjo, J.; (eds). 2010. Forests and society - Responding to global drivers of change, IUFRO (International Union of Forest Research Organizations). 509 p. (IUFRO World Series) (25).

- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis Washington, DC., Island Press.
- Miranda, M.; Dieperink, C.; Glasbergen, P. 2002. The social meaning of carbon dioxide emission trading institutional capacity building for a green market in Costa Rica *Environment, Development and Sustainability* 4(1): 69-86.
- Montagnini, F. 2004. Plantaciones forestales con especies nativas. Una alternativa para la producción de madera y la provisión de servicios ambientales. Forest plantations with native species; an alternative for wood production and the provision of environmental services *Recursos Naturales y Ambiente*. (43): 28-35.
- Murdiyarto, D.; Herawati, H.; Iskandar, H. 2005. Carbon Sequestration and Sustainable Livelihoods, CIFOR. 30 p.
- Murillo, O.; Camacho, P. 1997. Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones forestales recién establecidas *Agronomía Costarricense* 21(2): 189-206.
- \_\_\_\_\_. 1998. Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones forestales, 12 p.
- Murillo, O.; Badilla, Y.; Morales, M. 2006. MÉTODO DE INVENTARIO PARA PLANTACIONES PEQUEÑAS, 16 p.
- Oudenhoven, A.P.; Petz, K.; Alkemade, R.; Hein, L.; de Groot, R.S. 2012. Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services *Ecological Indicators* 21: 110-122. Disponible en <http://esanalysis.colmex.mx/Sorted%20Papers/2012/2012%20NLD%20-CS%20NLD,%203F%20Phys%201.pdf>
- Piotto, D.; Montagnini, F.; Ugalde, L.; Kanninen, M. 2003. Performance of forest plantations in small and medium-sized farms in the Atlantic lowlands of Costa Rica *Forest Ecology and Management* 175(1): 195-204.
- Ramakrishnan, P.; Campbell, J.; Demierre, L.; Gyi, A.; Malhotra, K.; Mehndiratta, S.; Rai, S.; Sashidharan, E. 1994. Ecosystem rehabilitation of the rural landscape in south and central Asia: An analysis of issues New Delhi, UNESCO.
- Resilience Alliance. 2010. Assessing resilience in social-ecological systems: Workbook for practitioners. Version 2.0., 54 p.
- Roche, L. 1997. Official development aid policies and sustainable utilization of forest resources in developing countries *The Commonwealth Forestry Review* 76(2): 91-97.
- Salazar, R. 2009. Tropical Forest Plantations. *In* Owens, J.N.; Lunday, H.G. eds. 2009. Forests and Forest Plants. UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). p. 4. Disponible en <http://www.eolss.net/sample-chapters/c10/E5-03-05-05.pdf>
- Siavosh, S.; Rivera, J.; Gómez, M. 2000. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. *In* conferencia electrónica de la FAO: agroforestería para la producción animal en Latinoamérica 2000. p.
- Sikor, T. 2011. Financing household tree plantations in Vietnam: Current programmes and future options CIFOR brief: 4.
- Sunderlin, W.D.; Huynh, T.B. 2005. Poverty alleviation and forests in Vietnam, CIFOR. 84 p.
- Vásquez, N. 2008. Plan de ordenamiento territorial participativo para la gestión de zonas potenciales de recarga hídrica en la microregión hidrográfica Balalaica, Turrialba, Costa Rica. Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Turrialba, CR, CATIE. 208 p. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2952E/A2952E.PDF>



### **3. ARTÍCULO 2**

## Efectos de la reforestación sobre la infiltración de agua en la microrregión hidrográfica Balalaica, Turrialba, Costa Rica.

Nelson Mejía<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> CATIE 2-7170 30 501 Turrialba, Costa Rica

<sup>2</sup> Departamento de Investigación Forestal Aplicada ESNACIFOR, Siguatepeque, Honduras

### **3.1 Resumen**

Se comparó la tasa de infiltración de agua bajo cobertura de reforestación de *Pinus caribaea* y bajo cobertura de charral en siete fincas de la microrregión hidrográfica Balalaica, ubicada en el cantón de Turrialba, Costa Rica.

En cada una de las fincas se realizaron tres pruebas bajo cobertura de reforestación y tres bajo charral mediante el método de inundación con el uso del infiltrómetro Turf Tec.

Paralelamente a cada punto de prueba se tomó una muestra de suelo para determinar posteriormente en laboratorio la densidad aparente y la humedad gravimétrica del suelo. También se registró la pendiente del terreno en cada cobertura.

Los datos de infiltración se ajustaron con la ecuación de Kostyakov y se analizaron bajo un diseño en bloques aleatorios con un nivel de significancia de 0,05. Los resultados muestran que la tasa de infiltración bajo cobertura de reforestación es significativamente mayor que bajo cobertura de charral, con una media de 20,79 cm/h y 14,85 cm/h respectivamente ( $p=0,0262$ ).

Las covariables de densidad aparente, humedad gravimétrica y pendiente mostraron un correlación negativa con respecto a la tasa de infiltración; sin embargo, la humedad gravimétrica fue la única que presentó un influencia significativa ( $p=0,0068$ ).

Palabras clave: *Conservación de los recursos hídricos, uso del suelo, correlación.*

### **3.2 Introducción**

En el mundo, más de una de cada seis personas aún no tienen acceso al agua potable y aproximadamente el 80% de la población mundial vive en áreas en donde los recursos hídricos son inseguros. El acceso al agua potable es uno de los derechos humanos más fundamentales, y los bosques juegan un papel muy importante en su mantenimiento y provisión (FAO 2013).

La disciplina que se ocupa de las interacciones entre los bosques y el agua, y que proporciona información útil para manejar y restaurar los ecosistemas relacionados, es la hidrología forestal (FAO 2013). Dicha disciplina estudia diferentes procesos entre los cuales se encuentra la recarga hídrica, la cual, según Le Maitre *et al.* (1999), se ve influenciada por la *intercepción* de la precipitación por parte de la cobertura vegetal, la *infiltración y percolación* en el suelo, el *flujo preferencial* proporcionado por los canales radiculares, y la *extracción de agua* a través de las raíces.

Otro factor que influye sobre la recarga hídrica es la precipitación, aunque no siempre se puede hacer una correlación lineal entre ellas dado que las condiciones de humedad del suelo, y la intensidad y duración de las lluvias, son factores más determinantes en la recarga que las cantidades de lluvia como tal (Dripps *et al.* 2001). El impacto de los cambios en las intensidades de las precipitaciones, debido al incremento de la temperatura de la atmósfera y la disminución de las lluvias, es todavía incierto en los trópicos, aunque se proyectan disminuciones en la recarga hídrica de hasta un 70% (Owor *et al.* 2009).

El proceso de infiltración, sujeto de este estudio, se refiere a la entrada vertical del agua en el perfil del suelo (USDA 2008). La infiltración es una variable clave de las características físicas del suelo, que influye en la recarga de acuíferos, la pérdida potencial de la capa superficial del suelo por la erosión, y marca la diferencia entre escorrentía de flujo lento y escorrentía de flujo rápido (Bonell 1998). Además la infiltración es un buen indicador de la calidad del suelo (Wood y Blackburn 1981; Shukla *et al.* 2003; Ilstedt *et al.* 2007; Desoky 2011).

El entendimiento de las relaciones entre la cobertura forestal y las propiedades físicas del suelo, como la infiltración, es fundamental para comprender las interacciones que dan pie a la utilización, provisión y calidad del agua en los trópicos (Hamilton *et al.* 1983; Calder 2002; Bruijnzeel 2004).

Tanto el uso (p. ej. forestal, pastizal, cultivo, urbano) como el manejo del suelo (p. ej. convencional u orgánico) afectan las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo, lo cual tiene diferentes impactos sobre su capacidad de infiltración y sobre su capacidad de almacenamiento de agua (Wood y Blackburn 1981; Fu *et al.* 2000; Shukla *et al.* 2003; Desoky 2011).

Algunas actividades y prácticas humanas como la urbanización, el cambio de la cobertura vegetal, la labranza continua y el pastoreo traen como consecuencia la compactación y la reducción de la estabilidad estructural del suelo, lo que a su vez trae efectos adversos sobre su densidad aparente, porosidad, y la escorrentía. Esto reduce las tasas de infiltración e incrementa también las probabilidades de erosión (Hillel 1982; Abdel-Magid *et al.* 1987; Tollner *et al.* 1990; Oussible *et al.* 1992; Tejwani 1993; Håkansson y Reeder 1994; Broersma *et al.* 1995; Ishaq *et al.* 2003; Desoky 2011).

Una reducción substancial de la infiltración puede conducir a una escasez de agua incluso en zonas en donde las lluvias son generalmente abundantes, ya que el agua deja rápidamente el área a través de una rápida escorrentía superficial sin permitir una adecuada

recarga de los acuíferos (FAO 1999; Bruijnzeel 2004), lo que incrementa a su vez el riesgo de inundaciones en las partes bajas (Salazar 2009). El conocimiento de estas relaciones es fundamental si se quiere minimizar el impacto de la erosión hídrica del suelo y garantizar altas tasas de infiltración (Desoky 2011).

Algunas prácticas del manejo forestal sostenible, como la reforestación, pueden ayudar a incrementar considerablemente las tasas de infiltración, la recarga hídrica, y la capacidad de retención de agua en los ecosistemas (Tejwani 1993; Mapa 1995; FAO 2003). En los trópicos la reforestación se hace con el objetivo de obtener un amplio rango de beneficios, entre los cuales se encuentran la restauración del balance hidrológico y el suministro de agua en calidad y cantidad (Mapa 1995; Ilstedt *et al.* 2007).

A pesar de lo anterior, muy pocos estudios se dirigen a evaluar los efectos de la reforestación sobre la capacidad de infiltración y sobre las propiedades del suelo, lo cual dificulta la modelación y el análisis de los procesos subyacentes asociados con las diferentes situaciones edáficas, diferentes especies y los diferentes métodos de establecimiento (Mapa 1995; Ilstedt 2002; Ilstedt *et al.* 2004; Ilstedt *et al.* 2007). En el presente estudio se compara el efecto de la reforestación en parche versus cobertura de charral sobre la tasa de infiltración en la microrregión hidrográfica Balalaica, Turrialba, Costa Rica.

### **3.3 Materiales y métodos**

#### **3.3.1 Área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en la microrregión hidrográfica Balalaica (**Figura 5**), ámbito que corresponde al Subcorredor Biológico Balalaica perteneciente al Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca. Comprende totalmente el distrito de Pavones, y parte de los distritos de La Suiza, Tres Equis y Tuis, del cantón de Turrialba, provincia de Cartago, Costa Rica. Posee una extensión de 144,14 km<sup>2</sup> con altitudes que van desde los 1 270 msnm en las partes más altas, conocida como la fila Balalaica, hasta los 370 msnm en las zonas más bajas cercanas al río Tuis y el río Reventazón (Vásquez 2008). Según datos de la estación meteorológica del CATIE, la precipitación promedio anual es de 2 695,6 mm, y la temperatura promedio anual es de 21,8°C. Los suelos son en su mayoría inceptisoles y en menor grado ultisoles.

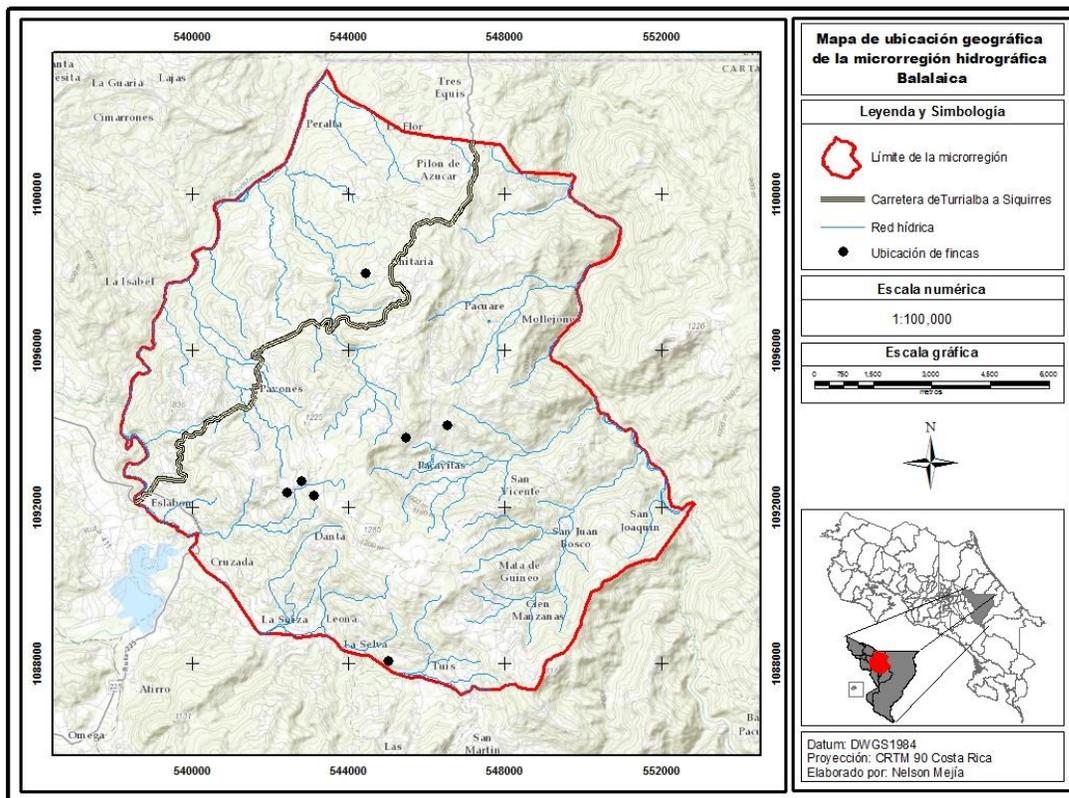
La microrregión posee un conjunto de redes hídricas (ríos y quebradas) que tienen su origen en la fila Balalaica y son tributarios de los ríos principales (Reventazón, Pacuare y Tuis). La fila Balalaica se caracteriza por la presencia de aproximadamente veintinueve lagunas naturales y nueve nacientes de flujo de agua permanente, las cuales constituyen las fuentes principales de abastecimiento de agua para consumo humano de las comunidades asentadas en la región (Vásquez 2008).

En la microrregión se ha establecido una serie de iniciativas de reforestación con diferentes fines. Al ser la conservación del agua uno de los principales objetivos de la comunidades locales (Baker 2008; Vásquez 2008; Eychène 2013), diferentes ASADAS y productores privados han tomado la iniciativa de reforestar con el fin de proteger nacientes

de agua y zonas de recarga hídrica. Otros, como los considerados en este estudio, han reforestado con el fin de producir madera; sin embargo, no se descarta que sus plantaciones pudieran estar aportando a la conservación de los recursos hídricos, específicamente a través del incremento en la infiltración y la recarga de acuíferos.

### 3.3.2 Selección de las fincas

Se seleccionaron siete fincas con plantaciones puras en parche<sup>5</sup> de la especie *Pinus caribaea* (**Figura 12**), todas en una etapa de crecimiento joven, con una edad promedio de 4,5 años, y establecidas a un espaciamiento promedio entre 3 y 4 metros. Se trabajó con esta especie debido a que era la única en la microrregión que se presentaba en una etapa de desarrollo y en una cantidad suficiente como para prestarse a una evaluación científica. Dentro de cada finca también se seleccionó un área con cobertura de charral, que para efectos del estudio, se caracteriza por la presencia solamente de gramíneas y arbustos pequeños, sin árboles.



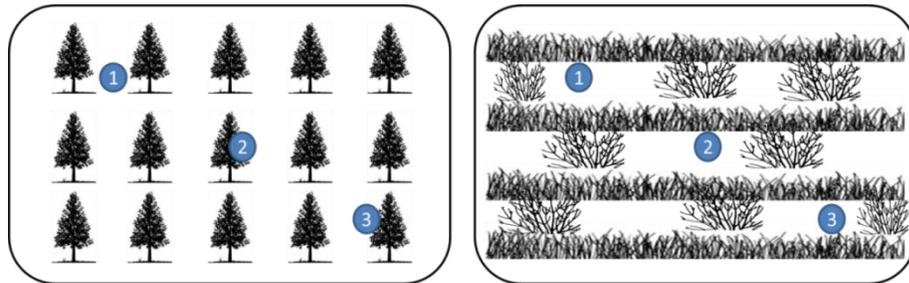
**Figura 12.** Ubicación geográfica del sitio de estudio.

### 3.3.3 Pruebas de infiltración

En cada una de las fincas se llevaron a cabo seis pruebas de infiltración de 20 minutos mediante el método de aplicación de agua por inundación, tres bajo la plantación y tres bajo

<sup>5</sup> Plantaciones establecidas a un espaciamiento regular con una misma especie.

charral, para un total de cuarenta y dos pruebas. La ubicación de cada punto de prueba se hizo siguiendo una diagonal en cada tipo de cobertura, en donde el terreno presentara una pendiente homogénea (**Figura 13**).



**Figura 13.** Ubicación de los puntos de prueba bajo la plantación (izquierda) y bajo charral (derecha).  
Fuente: Elaboración propia

Lo que se buscaba era hacer una buena representación de la variabilidad de los sitios a través de una mayor cantidad de mediciones, por lo cual se decidió utilizar el infiltrómetro de doble anillo Turf-Tec, de Turf-Tec International (**Figura 14**). Su fabricante establece que el aparato es capaz de determinar tasas de infiltración en tan solo 15 minutos. Su anillo interior posee un diámetro de 6,03 cm (2 3/8 pulgadas) y el exterior de 10,79 cm (4 1/4 pulgadas).



**Figura 14.** Infiltrómetro de doble anillo Turf-Tec.  
Fuente: Elaborado a partir de foto propia.

Para realizar cada prueba se siguieron las instrucciones brindadas por el fabricante: primero se fijó el cronómetro a 20 minutos. Posteriormente se introdujeron ambos anillos en el suelo haciendo un movimiento suave de atrás hacia adelante. A continuación se llenaron con agua limpia ambos anillos, primero llenando el anillo interior permitiendo que se rebalsara para llenar el anillo exterior hasta su borde. La razón del doble anillo es para que, al infiltrarse, el agua en el anillo exterior forme un sello vertical para el agua en el anillo interior, se impide así su infiltración horizontal, y se cuantifica únicamente la infiltración vertical.

Una vez que se alcanzaba el inicio de la escala, se daba inicio al cronómetro. A medida que el agua se iba infiltrando, el flotador iba marcando la caída del agua sobre la escala. Se

tomaron lecturas, en milímetros, cada minuto durante los primeros 5 minutos, posteriormente una a los 10 minutos y una última lectura a los 20 minutos.

### 3.3.4 Mediciones y cálculos

Para determinar la tasa de infiltración fue necesario realizar algunos cálculos básicos, como se puede observar en el ejemplo del **cuadro 8**.

**Cuadro 8.** Ejemplo de cálculos básicos para determinar la tasa de infiltración.  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de una finca considerada en el estudio.

1	2	3	4	5	6
Tiempo (min)	Lectura (mm)	Lectura actual - anterior (mm)	Tiempo actual - anterior (min)	Velocidad (mm/h)	Velocidad Acumulada (mm/h)
0	0	0	0	0	0
1	15	15	1	900	900
2	25	10	1	600	1 500
3	20	10	1	600	2 100
4	18	8	1	480	2 580
5	16	8	1	480	3 060
10	41	33	5	396	3 456
20	100	67	10	402	3 858

Para calcular la velocidad de infiltración se utilizó la siguiente fórmula:

$$VI = \frac{\Deltalectura}{\Delta tiempo} * 60$$

donde:

$VI$  = Velocidad de infiltración, en mm/h (Columna 5)

$\Deltalectura$  = Diferencial de lecturas, en mm (Columna 3)

$\Delta tiempo$  = Diferencial de tiempo, en min (Columna 4)

Para hacer una aproximación teórica del comportamiento real de la infiltración a partir de los datos experimentales en el campo, se utilizó la ecuación de Kostyakov.

$$\frac{di}{dt} = ab(t)^{b-1}$$

donde:

$\frac{di}{dt}$  = Velocidad de infiltración, en mm/h

$a$  = intercepto en Y, representa la cantidad de infiltración durante el intervalo inicial

$b$  = pendiente, indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo

$t$  = tiempo de referencia durante el cual hay entrada constante de agua al perfil del suelo

### 3.3.5 Análisis estadístico

Se plantearon las siguientes hipótesis alternativas: Ho: La tasa de infiltración en suelos bajo cobertura de reforestación es igual que en suelos bajo cobertura de charral. Hi: La tasa de infiltración en suelos bajo cobertura de reforestación es mayor que en suelos bajo cobertura de charral.

Para analizar los datos se utilizó la herramienta de modelos lineales y mixtos del programa InfoStat. Se utilizaron tres covariables: la humedad gravimétrica, la densidad aparente, y la pendiente del terreno. Se trabajó con un nivel de significancia del 5%. Las fincas fueron utilizadas como bloques aleatorios. Para comparar las coberturas de suelo se realizó un análisis de covarianza con un diseño en bloques, representado por el siguiente modelo:

$$I_{ijklm} = \mu + C_i + F_j + \beta_1 H_k + \beta_2 D_l + \beta_3 P_m + \varepsilon_{ijklm}$$

donde:

$I_{ijklm}$  = Infiltración para la i-ésima cobertura, la j-ésima finca, la k-ésima humedad gravimétrica, la l-ésima densidad aparente, y la m-ésima pendiente

$\mu$  = Media general

$C_i$  = Efecto de la i – ésima cobertura

$F_j$  = Efecto de la j – ésima finca

$\beta_1 H_k$  = Efecto de la k – ésima humedad gravimétrica

$\beta_2 D_l$  = Efecto de la l – ésima densidad aparente

$\beta_3 P_m$  = Efecto de la m – ésima pendiente

$\varepsilon_{ijklm}$  = Término de error aleatorio

### 3.3.6 Covariables

Se determinó la humedad gravimétrica, densidad aparente y pendiente, factores determinantes en la tasa de infiltración de los suelos.

*Humedad gravimétrica y densidad aparente:* Para determinar la humedad gravimétrica y la densidad aparente se tomó una muestra de suelo al lado de cada punto de prueba de infiltración con el uso de un cilindro medidor. Las muestras fueron almacenadas en recipientes debidamente rotulados y herméticamente sellados (**Figura 15**), y trasladadas el mismo día al laboratorio de suelos, en donde las muestras fueron secadas en estufa a 105°C por 24 horas para su análisis.



**Figura 15.** Cilindro medidor (izquierda) y muestras de suelo (derecha).

*Pendiente del terreno:* Los tres puntos de prueba de infiltración para cada cobertura fueron ubicados donde el terreno presentara una pendiente homogénea, la cual fue determinada con el uso de un clinómetro.

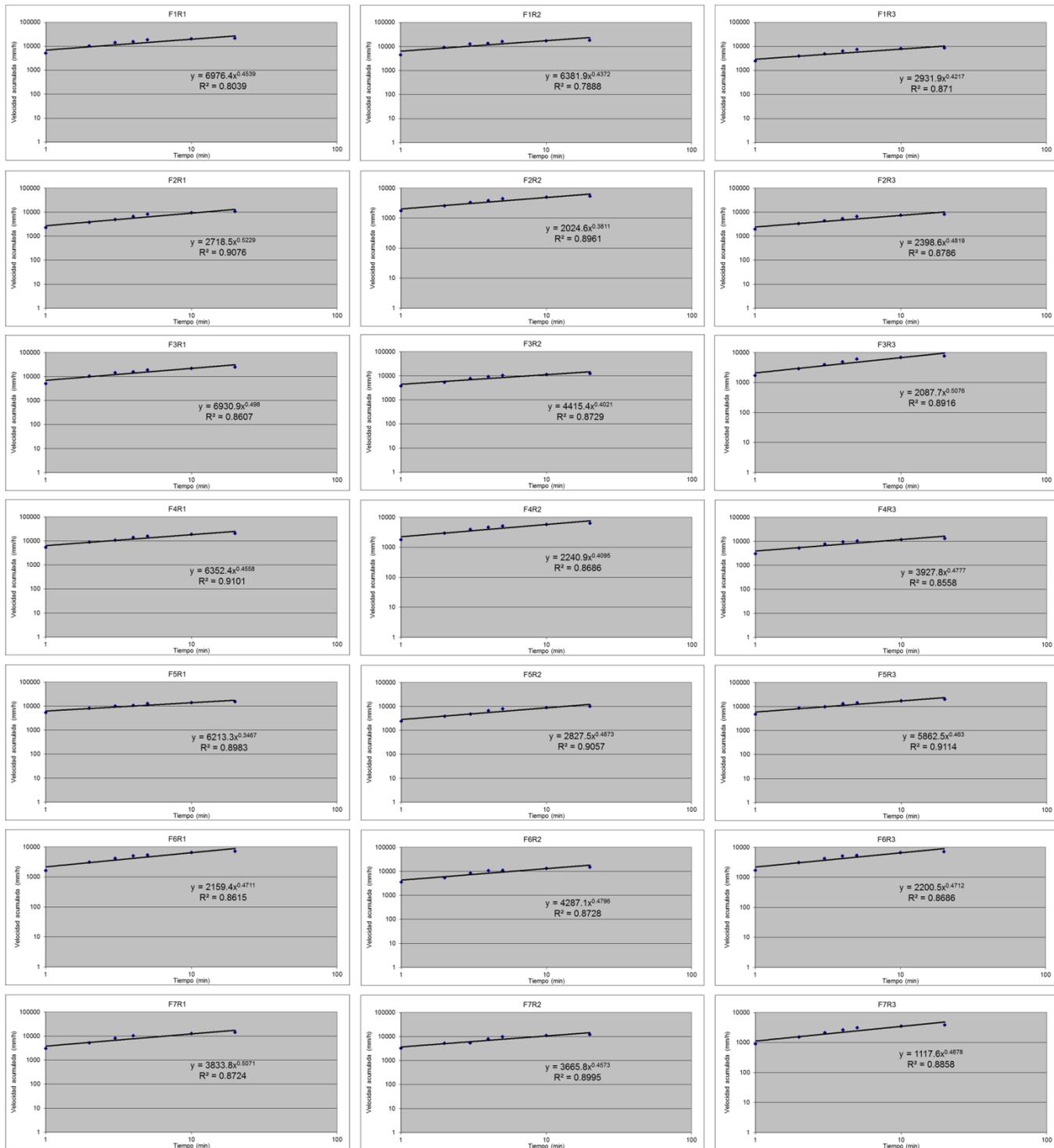
### 3.4 Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados de capacidad de infiltración (a 20 minutos ajustados con la ecuación de Kostyakov), humedad gravimétrica, densidad aparente, y pendiente, bajo cobertura de reforestación y bajo cobertura de charral para cada una de las fincas (**Cuadro 9**).

**Cuadro 9.** Capacidad de infiltración y covariables calculadas en siete fincas bajo cobertura de plantación pura de *Pinus caribaea* (izquierda) y charral (derecha).

Ensayo F=Finca R=Reforestación	Infiltración (cm/h)	Humedad Gravimétrica (%)	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Pendiente (%)	Ensayo F=Finca C=Charral	Infiltración (cm/h)	Humedad Gravimétrica (%)	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Pendiente (%)
F1R1	33,85	66,76	0,68	23,0	F1C1	27,01	28,21	0,88	28,0
F1R2	27,85	59,18	0,72	23,0	F1C2	53,31	41,23	0,63	28,0
F1R3	11,58	65,69	0,67	23,0	F1C3	40,65	33,94	0,85	28,0
F2R1	20,15	56,20	0,79	9,0	F2C1	3,88	55,16	0,87	25,0
F2R2	6,12	61,30	0,71	9,0	F2C2	9,26	60,06	0,70	25,0
F2R3	13,85	52,49	0,64	9,0	F2C3	4,55	66,30	0,57	25,0
F3R1	44,19	36,97	1,01	39,0	F3C1	21,49	31,51	0,75	30,0
F3R2	15,35	39,36	0,75	39,0	F3C2	22,45	35,61	0,77	30,0
F3R3	14,11	41,05	0,72	39,0	F3C3	19,78	40,58	0,78	30,0
F4R1	32,07	63,78	0,76	4,0	F4C1	44,92	58,77	0,56	2,0
F4R2	8,18	49,06	0,78	4,0	F4C2	20,75	42,59	0,84	2,0
F4R3	22,10	51,28	0,63	4,0	F4C3	8,80	43,97	0,78	2,0
F4R1	14,85	66,73	0,62	2,0	F5C1	10,04	65,03	0,66	11,0
F5R2	16,88	60,81	0,60	2,0	F5C2	47,45	70,81	0,61	11,0
F5R3	30,11	50,88	0,74	2,0	F5C3	21,05	49,67	0,75	11,0
F6R1	11,67	58,68	0,57	50,0	F6C1	2,29	61,48	0,77	33,0
F6R2	24,42	52,88	0,73	50,0	F6C2	1,70	65,92	0,67	33,0
F6R3	11,89	43,67	0,86	50,0	F6C3	9,68	49,60	0,76	33,0
F7R1	25,83	65,95	0,58	27,0	F7C1	9,27	57,66	0,76	33,0
F7R2	18,17	67,74	0,67	27,0	F7C2	0,89	78,09	0,65	33,0
F7R3	6,69	44,38	0,83	27,0	F7C3	0,75	71,55	0,64	33,0

En las **figuras 16 y 17** se muestran las gráficas calculadas con la ecuación de Kostyakov para cobertura de reforestación y cobertura de charral, respectivamente.



**Figura 16.** Velocidad de infiltración acumulada en siete fincas bajo cobertura de plantación pura de *Pinus caribaea*.



**Figura 17.** Velocidad de infiltración acumulada en siete fincas bajo cobertura de charral.

Los resultados del análisis de covarianza muestran que la tasa de infiltración bajo cobertura de plantación pura de *Pinus caribaea*, con una media de 20,79 cm/h, es significativamente mayor que la tasa de infiltración bajo cobertura de charral, con una media de 14,85 cm/h ( $p=0,0262$ ) (**Cuadro 10**); por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

**Cuadro 10.** Análisis de covarianza.

	Valor	Error Estándar	GL	Valor-t	Valor-p
(Intercepto)	61,13	19,57	31	3,12	0,0039
Trat R	5,93	2,54	31	2,33	0,0262
Humedad gravimétrica	-0,50	0,17	31	-2,90	0,0068
Densidad aparente	-24,63	15,56	31	-1,58	0,1236
Pendiente	-0,06	0,15	31	-0,40	0,6923

Resultados similares fueron obtenidos por Mapa (1995) quien reportó una mayor tasa de infiltración en suelos bajo cobertura de reforestación en comparación con praderas y otros usos de la tierra en Sri Lanka. Por otro lado, los resultados de un meta-análisis realizado por Ilstedt *et al.* (2007), en donde se consideraron 14 estudios comparables (Seis en Zambia, cuatro en Nigeria, dos en Sri Lanka, y dos en Camerún) para evaluar el efecto de la reforestación sobre la infiltración de agua en los trópicos, mostraron que la capacidad de infiltración aumentó, en promedio, aproximadamente tres veces después de la reforestación o la plantación de árboles en campos agrícolas.

El estudio de Wahren *et al.* (2009), realizado en Saxony, Alemania, reveló que incluso ya después de 6 años de un proyecto de reforestación se pueden detectar cambios en las propiedades del suelo. Se incrementa la capacidad de infiltración y la capacidad de retención de agua en comparación con otros usos de la tierra.

La mayor capacidad de infiltración observada en los suelos bajo cobertura de reforestación se puede atribuir a la interceptación de las gotas de lluvia por parte de la copa de los árboles, lo que reduce la fuerza de impacto sobre el suelo y previene su compactación. Asimismo, a un mayor contenido de materia orgánica, a una mejorada estructura del suelo, y a un alto contenido de macroporos derivados de la actividad radicular de los árboles (Mapa 1995; Wahren *et al.* 2009). Por otra parte, Mann y Tolbert (2000) sostienen que la presencia de canales de raíces descompuestas y el desarrollo de raíces a mayores profundidades proveen una mayor estabilidad del suelo y resultan en una mayor cantidad de vías para la infiltración del agua. Además Heermann y Duke (1983) afirman que la presencia de hojarasca sobre el suelo retarda la escorrentía superficial y proporciona más tiempo para que el agua se infiltre.

La interceptación horizontal podría ser otro factor que esté aportando a una mayor tasa de infiltración bajo los árboles. En un estudio realizado por Cáceres (1981) para determinar el papel de la interceptación horizontal en el balance hidrológico en Balalaica, se encontró que durante los periodos con predominantes neblinas, la interceptación horizontal aportó el 15,3% del agua que llegó al suelo forestal. En Balalaica este porcentaje podría no ser muy importante si se consideran las altas tasas de precipitación en la región; no obstante en ecosistemas menos húmedos, esta cantidad puede llegar a representar una fracción considerable de las lluvias totales. En el estudio de Hildebrandt y Eltahir (2008) en un bosque semiárido en Oman, en donde la interceptación horizontal actualmente constituye una fracción significativa del agua disponible, se concluye incluso que el continuo cambio de uso de la

tierra posiblemente traerá daños irreversibles al bosque mismo poniendo en riesgo su sobrevivencia.

### *Análisis de suelo*

Los análisis de laboratorio mostraron una humedad gravimétrica relativamente baja para los suelos de ambas coberturas, entre 36 y 67% bajo reforestación y entre 28 y 78% bajo charral. La densidad aparente del suelo también resultó muy similar para ambas coberturas, entre 0,58 y 1,01 g/cm<sup>3</sup> bajo reforestación y entre 0,56 y 0,88 g/cm<sup>3</sup> bajo charral.

### *Covariables*

Como se esperaba, se observa una correlación negativa de todas las variables; sin embargo, en este caso solamente la humedad gravimétrica del suelo tuvo un efecto significativo sobre la tasa de infiltración ( $p=0,0068$ ) (**ver cuadro 10**). Por cada disminución porcentual de la humedad, hay un incremento de 0,50 cm/h en la tasa de infiltración.

### *Uso del infiltrómetro Turf-Tec*

El estudio también permite hacer algunas consideraciones sobre el infiltrómetro Turf-Tec. Este tipo de infiltrómetro, al ser una versión más compacta de los infiltrómetros de anillos concéntricos normalmente utilizados en la medición de tasas de infiltración<sup>6</sup>, tiende a ser menos preciso (Holman-Dodds 2006). En un estudio realizado por Puricelli (2008), en donde se analizó el efecto de la escala de medición en procesos de infiltración en anillos simples, se encontró una tendencia al aumento del parámetro de infiltración en función de la reducción del diámetro del anillo. Por otra parte, al comparar tres métodos para medir infiltración, Schmid *et al.* (2007) encontraron que el infiltrómetro Turf-Tec arrojó valores significativamente mayores que los otros dos métodos, por lo que sugieren que este instrumento tiende a sobrestimar los datos de infiltración. A lo anterior, sumado a los bajos contenidos de humedad de los suelos, podrían atribuirse las relativamente altas tasas de infiltración calculadas en este estudio.

Esta misma característica sin embargo, hace del Infiltrómetro Turf-Tec un instrumento muy versátil que permite hacer más pruebas bajo una variedad de condiciones, y una mejor representación de la variabilidad del sitio incluso que infiltrómetros de anillos de mayor tamaño (EPA 1999), razón por la cual se decidió utilizarlo en este estudio. Este criterio también es compartido por Holman-Dodds (2006), quien sostiene que el mayor número de pruebas que se pueden realizar con el instrumento, derivado de su mayor portabilidad, facilidad de uso, y bajo requerimiento de agua, compensa adecuadamente la pérdida de precisión en las mediciones.

---

<sup>6</sup> Normalmente este tipo de infiltrómetros poseen un anillo interior y exterior con un diámetro de 12 y de 18 a 24 pulgadas respectivamente.

### 3.5 Conclusiones

La tasa de infiltración bajo cobertura de reforestación joven de *Pinus caribaea* es significativamente mayor que bajo cobertura de gramíneas y arbustos en la microrregión hidrográfica Balalaica. Esto se puede atribuir al efecto de la interceptación por la copa de los árboles, a una mejora de las propiedades del suelo derivada del aporte de materia orgánica, así como al mayor tamaño de poros y canales producto del crecimiento y descomposición de su sistema radicular.

Incluso cuando el objetivo principal de la reforestación no es la conservación de los recursos hídricos, los datos recabados en este estudio demuestran que los árboles plantados tienen un efecto positivo sobre la tasa de infiltración. Esto también contribuye a la reducción de la erosión hídrica y del riesgo potencial de inundaciones en las partes bajas, todas estas son problemáticas comunes de las cuencas rurales centroamericanas.

Estos y otros beneficios de las plantaciones forestales son en muchos casos ignorados por los propios reforestadores. El conocimiento de estos elementos podría servirles como motivación adicional, e incluso abrir su elegibilidad para entrar en programas de pagos por servicios ambientales, lo que contribuye a la sostenibilidad de la reforestación misma.

Propiedades del suelo como la densidad aparente y la humedad gravimétrica son variables que influyen directa e inversamente sobre la tasa de infiltración y que dependen en gran parte del uso y de las prácticas de manejo del suelo. El entendimiento de estas relaciones es fundamental especialmente cuando el objetivo es la maximización de la infiltración, la recarga de acuíferos y la conservación de los recursos hídricos.

En cuanto al uso del infiltrómetro Turf-Tec, este se ajusta mejor cuando se está más interesado en hacer una comparación relativa de la infiltración bajo diferentes coberturas, y en hacer una mejor representación de la variabilidad espacial del área bajo estudio, que en determinar las tasas de infiltración exactas.

Será necesario continuar investigando el tema, considerando el efecto de otras especies forestales sobre la infiltración de agua y su relación con otras variables como la actividad biológica y el contenido de materia orgánica bajo diferentes condiciones edáficas.

Los efectos de la intensidad y duración de las precipitaciones, y el papel de la interceptación vertical y horizontal de plantaciones de diferentes especies forestales sobre la infiltración y la recarga hídrica, merecen también ser estudiados.

Esto permitirá generar información valiosa para tomar mejores decisiones en cuanto al establecimiento y manejo de proyectos de reforestación en los trópicos, considerando como un objetivo principal o secundario la protección y el mantenimiento de los cada vez más escasos recursos hídricos.

### 3.6 Agradecimientos

Este estudio fue posible gracias a la cooperación de Adonay Sojo, Pedro Calderón, Héctor Araya, Martín Nájera, Rodolfo Salas, Rafael Calderón, Marvin Castillo, Martín Quiroz, Alexis Mora, Marco Solano, y Luis Sandoval, reforestadores de la microrregión hidrográfica Balalaica.

Se le agradece a Abigail Fallot, Jorge Faustino, Yamileth Astorga y Alejandro Imbach por la revisión del artículo.

También se le agradece al Servicio de Intercambio Académico de Alemania (DAAD) y la Escuela Nacional de Ciencias Forestales (U-ESNACIFOR) en Honduras por su aporte financiero para desarrollar la investigación.

### 3.7 Literatura citada

- Abdel-Magid, A.H.; Schuman, G.E.; Hart, R.H. 1987. Soil bulk density and water infiltration as affected by grazing systems *Journal of Range Management*: 307-309.
- Baker, A.C. 2008. El protagonismo social de las comunidades rurales como fundamento para la cogestión adaptativa incluyente de los recursos naturales en un territorio. Magister Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques Naturales y Biodiversidad. Turrialba, CR, CATIE. 155 p. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2902E/A2902E.PDF>
- Bonell, M. 1998. Possible impacts of climate variability and change on tropical forest hydrology. *In*. 1998. Potential Impacts of Climate Change on Tropical Forest Ecosystems. Springer. p. 75-132.
- Broersma, K.; Robertson, J.; Chanasyk, D. 1995. Effects of different cropping systems on soil water properties of a Boralf soil *Communications in Soil Science & Plant Analysis* 26(11-12): 1795-1811.
- Bruijnzeel, L.A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, ecosystems & environment* 104(1): 185-228.
- Cáceres, G. 1981. Importancia hidrológica de la intercepción horizontal en un bosque muy húmedo premontano en Balalaica, Turrialba, Costa Rica. Magister Scientiae. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 112 p.
- Calder, I.R. 2002. Forests and hydrological services: reconciling public and science perceptions *Land Use and Water Resources Research* 2(2): 1-12.
- Desoky, M.S. 2011. Impact of land-use and land-management on the water infiltration capacity of soils on a catchment scale *Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina*. 184 p.
- Dripps, W.; Anderson, M.P.; Potter, K.W. 2001. Temporal and spatial variability of natural groundwater recharge, University of Wisconsin Water Resources Institute.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1999. Infiltration Through Disturbed Urban Soils and Compost-Amended Soil Effects on Runoff Quality and Quantity, 244 p. (Research Report)
- Eychène, C. 2013. Desarrollo metodológico para la evaluación de la resiliencia en los sistemas agroforestales. Informe de pasantía, CIRAD-PCP-CATIE. 49 p.

- FAO. 1999. The Contribution of Blue Water and Green Water to the Multifunctional Character of Agriculture and Land. Background Paper 6: Water (en línea). Disponible en <http://www.fao.org/docrep/x2775e/X2775E08.htm#TopOfPage>
- \_\_\_\_\_. 2003. Sustainable use and management of freshwater resources: the role of forests, in Sustainable use and management of freshwater resources: the role of forests (en línea). Disponible en <http://www.fao.org/docrep/005/y7581e/y7581e09.htm>
- \_\_\_\_\_. 2013. Forests and water international momentum and action Rome, 84 p. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/017/i3129e/i3129e.pdf>
- Fu, B.; Chen, L.; Ma, K.; Zhou, H.; Wang, J. 2000. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shaanxi, China *Catena* 39(1): 69-78.
- Håkansson, I.; Reeder, R.C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load— extent, persistence and crop response *Soil and Tillage Research* 29(2): 277-304.
- Hamilton, L.S.; King, P.N.; Center, E.-W. 1983. Tropical forested watersheds: hydrologic and soils response to major uses or conversions, Westview Press Boulder.
- Heermann, D.; Duke, H.R. 1983. Applications in dryland agriculture. *Advances in infiltration: proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration, December 12-13, 1983, Hyatt Regency Illinois Center, Chicago, Illinois, American Society of Agricultural Engineers.* 254-263 p.
- Hildebrandt, A.; Eltahir, E.A. 2008. Using a horizontal precipitation model to investigate the role of turbulent cloud deposition in survival of a seasonal cloud forest in Dhofar *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012) 113(G4).
- Hillel, D. 1982. *Introduction to soil physics*, Academic press New York. (364).
- Holman-Dodds, J.K. 2006. *Evaluation of the Hydrologic Benefits of Infiltration-based Stormwater Management*, ProQuest. 293 p.
- Ilstedt, U. 2002. *Soil Degradation and Rehabilitation in Humid Tropical Forests, (Sabah, Malaysia)*. Department of Forest Ecology, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea.
- Ilstedt, U.; Malmer, A.; Nordgren, A.; Liao, P. 2004. Soil rehabilitation following tractor logging: early results on amendments and tilling in a second rotation *Acacia mangium* plantation in Sabah, Malaysia *Forest Ecology and Management* 194(1): 215-222.
- Ilstedt, U.; Malmer, A.; Verbeeten, E.; Murdiyarsa, D. 2007. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: a systematic review and meta-analysis *Forest Ecology and Management* 251(1): 45-51.
- Ishaq, M.; Ibrahim, M.; Lal, R. 2003. Persistence of subsoil compaction effects on soil properties and growth of wheat and cotton in Pakistan *Experimental Agriculture* 39(04): 341-348.
- Le Maitre, D.; Scott, D.; Colvin, C. 1999. Review of information on interactions between vegetation and groundwater *Water SA* 25(2): 137-152. <http://hdl.handle.net/10204/524>
- Mann, L.; Tolbert, V. 2000. Soil sustainability in renewable biomass plantings *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 29(8): 492-498.
- Mapa, R.B. 1995. Effect of reforestation using *Tectona grandis* on infiltration and soil water retention *Forest Ecology and Management* 77(1): 119-125.
- Oussible, M.; Crookston, R.; Larson, W. 1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat *Agronomy Journal* 84(1): 34-38.
- Owor, M.; Taylor, R.; Tindimugaya, C.; Mwesigwa, D. 2009. Rainfall intensity and groundwater recharge: empirical evidence from the Upper Nile Basin *Environmental Research Letters* 4(3): 035009.

- Puricelli, M. 2008. Variabilidad de parámetros físicos del suelo respecto a la escala de muestreo. Análisis en terrenos bajo riego, 6 p.
- Salazar, R. 2009. Tropical Forest Plantations. *In* Owens, J.N.; Lunday, H.G. eds. 2009. Forests and Forest Plants. UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). p. 4. Disponible en <http://www.eolss.net/sample-chapters/c10/E5-03-05-05.pdf>
- Schmid, C.; Gaussoin, R.; Meyer, G.; Shearman, R.C.; DeBerg, G. 2007. A Rapid and Precise Method to Measure Infiltration in situ, University of Nebraska.
- Shukla, M.; Lal, R.; Owens, L.; Unkefer, P. 2003. Land use and management impacts on structure and infiltration characteristics of soils in the North Appalachian region of Ohio Soil Science 168(3): 167-177.
- Tejwani, K.G. 1993. Water Management Issues: Population, Agriculture and Forests – A Focus on Watershed Management, Cambridge University Press. 496-525 p. (Hydrology and Water Management in the Humid Tropics. Hydrological Research Issues and Strategies for Water Management) <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511564468.027>
- Tollner, E.; Calvert, G.; Langdale, G. 1990. Animal trampling effects on soil physical properties of two Southeastern US ultisols Agriculture, ecosystems & environment 33(1): 75-87.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2008. Soil Quality Indicators, Infiltration, 2 p.
- Vásquez, N. 2008. Plan de ordenamiento territorial participativo para la gestión de zonas potenciales de recarga hídrica en la microregión hidrográfica Balalaica, Turrialba, Costa Rica. Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Turrialba, CR, CATIE. 208 p. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2952E/A2952E.PDF>
- Wahren, A.; Feger, K.-H.; Schwärzel, K.; Münch, A. 2009. Land-use effects on flood generation—considering soil hydraulic measurements in modelling Advances in Geosciences 21(21): 99-107.
- Wood, M.K.; Blackburn, W.H. 1981. Grazing Systems: Their Influence on Infiltration Rates in the Rolling Plains of Texas Journal of Range Management 34(4): 331-335.