



Informe Técnico

“Análisis para la identificación de alternativas para diferentes alturas que generen servicios ecosistémicos similares a los bosques cafetaleros”

Presentada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)

Marzo 2019

Abreviaturas y Acrónimos

ASAC	Agricultura Sostenible Adaptada al Clima
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CBA	Análisis costo beneficio
CCAFS	Programa del CGIAR sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria
CENTA	Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal
CGIAR	Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CSC	Consejo Salvadoreño del Café
FOMIN	Fondo Multilateral de Inversiones
FVC	Fondo Verde del Clima
GCM	Modelo de Circulación Global
ICO	Organización Internacional del Café
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Mz	Manzana, unidad de superficie equivalente a 0.7 Ha
OIC	Organización Internacional del Café
PMA	Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas
PROCAFE	Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café
PROMECAFE	Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y la Modernización de la Caficultura de Centroamérica, República Dominicana y Jamaica
RCP	Ruta de Concentración Representativa

Contenido

RESUMEN	8
1. ANTECEDENTES	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 General	12
2.2 Específicos	12
3. CONTEXTO	13
3.1 Historia del café en El Salvador	13
3.2 Provisión de servicios ecosistémicos del café	15
4. METODOLOGÍA	19
4.1 Cambios de aptitud climática en áreas cafetaleras para 2030 y 2050	19
4.2 Identificación participativa de prácticas y tecnologías de ASAC actuales y potenciales	27
4.3 Análisis costo – beneficio	27
5. RESULTADOS	29
5.1 Cambios de aptitud climática en áreas cafetaleras para 2030 y 2050	29
5.1.1 Impacto de los gradientes en las fincas actuales	37
5.2 Identificación participativa de prácticas y tecnologías de ASAC actuales y potenciales	38
5.2.1 Prácticas priorizadas por gradiente de impacto	39
6. BIBLIOGRAFÍA	75
7. ANEXOS	77

Listado de tablas

Tabla 1. Estratos según área cultivada en manzanas	10
Tabla 2. Distribución del área cafetalera por altura, según Censo Agropecuario 2007.....	11
Tabla 3. Relación entre productividad y costos por quintal producido para varios departamentos de El Salvador.....	15
Tabla 4. Revisión de literatura sobre servicios ecosistémicos de los cafetales bajo sombra a nivel global.....	16
Tabla 5. Carbono que aportan los componentes en diferentes usos de suelo en Chalatenango, El Salvador.	17
Tabla 6. Balance hídrico durante épocas secas y lluviosas para 2004 y 2005 a una profundidad de 200 cm para dos sistemas de café en San Pedro de Barva, Costa Rica. (Siles, 2007).	18
Tabla 7. Presencia del cultivo de café por cuadrícula y pixeles	20
Tabla 8. Variables Bioclimáticas	22
Tabla 9. Lista de los modelos de circulación global (GCM) usados para modelar las condiciones de clima futuro	23
<i>Tabla 10 Características biofísicas de los clusters</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 11. Identificación de los principales síntomas de cambio climático por cada una de las zonas de gradientes de impacto, de acuerdo a la percepción de los técnicos de CENTA-café.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 12 Prácticas priorizadas por técnicos de CENTA-Café por zona de gradiente de impacto en El Salvador.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 13. Variedades de café que han sido mencionadas por los técnicos de CENTA-Café, como aptas para cara una de las zonas del gradiente de impacto.</i>	<i>42</i>
Tabla 14. Lista priorizada de variedades por gradiente de adaptación.....	45
<i>Tabla 15. Indicadores de rentabilidad a nivel de parcela de la medida de adaptación de renovación de café con variedades tolerantes y manejo adecuado de fertilizantes y manejo integrado de plagas.</i>	<i>46</i>
Tabla 16. Costos desglosados de mantenimiento de plantaciones sin renovación con un rendimiento promedio de 10 qq/mz.	48
Tabla 17. Costos desglosados de renovación de un sistema agroforestal con Inga que mantenga un rendimiento de 20 qq de café oro/mz.	49
<i>Tabla 18. Descripción de sistemas agroforestales propuestos para los diferentes gradientes de adaptación</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 19. Indicadores de rentabilidad a nivel de parcela de la medida de adaptación de renovación de café en Sistemas Agroforestales con árboles de servicio en la zona adaptación incremental, con el supuesto de manejo adecuado de fertilizantes y manejo integrado.....</i>	<i>55</i>
Tabla 20. Costos desglosados de renovación de un sistema agroforestal con Inga que mantenga un rendimiento de 25 qq de café oro/mz considerando que tiene mayor potencial por establecerse en una zona óptima.....	56
<i>Tabla 21. Indicadores de rentabilidad a nivel de parcela de la medida de adaptación de renovación de café en Sistemas Agroforestales con árboles maderables en la zona adaptación sistémica, con el supuesto de manejo adecuado de fertilizantes y manejo integrado de plagas.</i>	<i>61</i>
Tabla 22. Costos desglosados de renovación de un sistema agroforestal con maderables que	

mantenga un rendimiento de 20 qq de café oro/mz.	63
<i>Tabla 23. Indicadores de rentabilidad a nivel de parcela de la medida de adaptación de renovación de café en Sistemas Agroforestales diversificados con árboles maderables y musáceas en la zona de resiliencia sistémica y transformación, con el supuesto de manejo adecuado de fertilizantes y manejo integrado de plagas.</i>	<i>66</i>
Tabla 24. Costos desglosados de renovación de un sistema agroforestal diversificado con maderables y banano que mantenga un rendimiento de 20 qq de café oro/mz.	68
<i>Tabla 25. Impactos de los diferentes sistemas agroforestales en Mitigación, Adaptación y Medios de vida de los productores.</i>	<i>70</i>
Tabla 26. Costos desglosados de mantenimiento de sistemas agroforestales con de café joven (<4 años) que mantenga un rendimiento de 20 qq de café oro/mz.	72

Listado de figuras

Figura 1. Comparación de datos de producción (CSC) y precios del café (ICO) en El Salvador.	14
Figura 2. Presencia de cultivos de Café	20
Figura 3. Mapa de distribución de presencia de cultivos de Café	21
Figura 4 Ejemplo de la distribución de pseudoausencias con una cuadrícula de 2.5"	22
Figura 5. Diseño metodológico	26
Figura 6. Dendrograma de clustering jerárquico usando disimilitudes de RF. Los colores indican los grupos finales.	29
Figura 7. Contrast plots de las variables bioclimáticas. Colores representan los clústeres.	30
Figura 8. Gráfico de densidad de la distribución altitudinal de los clústeres. Colores indican los clústeres.	30
Figura 9. Valores AUC y filtro geográfico. Central America con datos fuera de El Salvador (azul), Multiclass El Salvador es el promedio del pairwise AUC (naranja), y la línea gris es el AUC de El Salvador de presencia vs pseudoausencia.	31
Figura 10. Zonas agroclimáticas para café bajo distintas temporalidades (línea base, 2030s, 2050s).	32
Figura 11. Distribución de zonas agroclimáticas en 2050 del escenario RCP 6.0 en GCM con impactos pesimistas, medias, optimistas.	34
Figura 12. Zonas aptas tipo probabilística	35
Figura 13. Gradiente de impacto	36
Figura 14. Porcentaje de fincas en cada gradiente de adaptación para escenarios de RCP6.0 para los años 2030 (a) y 2050(b). Ad Incremental = Adaptación incremental, Ad Sistémica = Adaptación sistémica, Re Sistémica = Resiliencia sistémica.	38
Figura 15. Nivel de diferentes parámetros de fertilidad de suelos (pH, MO, P, K, Ca, Mg, Zn, B) por las diferentes gradientes de impacto. Basado en datos de CENTA Café	44
Figura 16. Numero (a) y proporción de fincas (b) de diferentes edades en los diferentes gradientes de adaptación, fuente datos de CENTA-café.	45
Figura 17. Rendimiento de café para el año de 2016 en parcelas de productores a diferentes edades de la plantación y gradientes de adaptación, fuente datos de CENTA-café.	46
Figura 18. Flujo de ingresos y costos de sistemas de café actuales con una media de rendimiento de 10 qq oro/mz por 20 años.	47
Figura 19. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra de Inga en zonas intermedias (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).	48
Figura 20. Temperatura y humedad relativa bajo sistemas agroforestales de café con banano con diferentes niveles de sombra (datos no publicados, pero recopilados para la publicación Siles et al 2013).	51
Figura 21. Especies de Inga sembradas en cafetales en zonas óptimas para el café. (Inga vera, Inga oerstediana e Inga punctata).	53
Figura 22. Aptitud climática para condiciones climáticas actuales de diferentes especies leguminosas usadas como sombra en El Salvador (a: Inga vera; b: Inga punctata; c: Inga juinicuil, antes I. paterna; d: Inga oerstediana; e: Inga densiflora; f: Gliricidia septium). Las aptitudes climáticas para estas especies son marginal (en color rojo), bueno (naranja), muy	

<i>bueno (verde) y excelente (verde oscuro)</i>	54
Figura 23. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra de Inga en zonas altas en buenos suelos (máximo de rendimiento de 40 qq oro/mz en el 5to y 6to año)...	56
Figura 24. Aptitud climática de diferentes especies maderables nativas para El Salvador. a: Cedro (<i>Cedrela odorata</i>); b: Caoba (<i>Switenia humilis</i>); c: Laurel (<i>Cordia alliodora</i>); d: Genizaro (<i>Samanea saman</i>); e: Nogal (<i>Junglans olanchana</i>), f: Cortez blanco (<i>Handroanthus chrysanthus</i> , sinónimo <i>Tabebuia chrysantha</i>), g: Aceituno (<i>Simaurouba glauca</i>). Las aptitudes climáticas para estas especies son marginal (en color rojo), bueno (naranja), muy bueno (verde) y excelente (verde oscuro).....	59
Figura 25.. Crecimiento del diámetro a la altura del pecho (DAP), altura (H) y volumen (V) de <i>Cordia alliodora</i> (Ca), <i>Cedrela odorata</i> (Co) y <i>Switenia humilis</i> (Sh), tres especies con potencial en sistemas agroforestales en El Salvador. (Fuente: Jiménez, 2010, Jimenez et al 2013, Somarriba et al, 1987).....	60
Figura 26. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra a base de maderables (cedro <i>Cedrela odorata</i> con un DAP promedio de 40 cm a los 20 años) en las zonas intermedias (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).	62
Figura 27. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra a base de maderables (Laurel <i>Cordia alliodora</i> con un DAP promedio de 40 cm a los 20 años) en las zonas intermedias (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).	62
Figura 28. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra a base de maderables (caoba <i>Switenia humilis</i> con un DAP promedio de 25 cm a los 20 años) en las zonas intermedias (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).	63
Figura 29. Sistemas agroforestales con café, muestran ser resilientes en el tiempo. Foto de la izquierda muestra sistemas con café, banano bajo árboles en 1910, foto a la derecha en Nicaragua en el año 2010.	65
Figura 30. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra diversa de Musáceas y maderables (cedro <i>Cedrela odorata</i> con un DAP promedio de 40 cm a los 20 años) en las zonas bajas (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).....	67
Figura 31. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra diversa de Musáceas y maderables (Laurel <i>Cordia alliodora</i> con un DAP promedio de 40 cm a los 20 años) en las zonas bajas (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).	67
Figura 32. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra diversa de Musáceas y maderables (caoba <i>Switenia humilis</i> con un DAP promedio de 25 cm a los 20 años) en las zonas bajas (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).	68
Figura 33. Rendimiento promedio de café en plantaciones con diferentes variedades y tasas de fertilización en el año (Las fertilizaciones representan el número de fertilizaciones hechas por productores).....	72

RESUMEN

Se ha utilizado el modelo Random Forest (Breiman, 2001), un método *machine learning* (aprendizaje automático), para estimar cambios de aptitud climática en las áreas para el cultivo del Café Arábica. La aptitud climática se define como la similitud de un conjunto de variables climáticas a combinaciones encontradas en lugares con presencias de café confirmadas. Basados en los modelos se realizó la identificación del **gradiente de impacto**, para establecer los diferentes tipos de estrategias de adaptación:

- Las zonas de **adaptación incremental** son sitios donde las condiciones climáticas cambiarán, pero no representarán una amenaza para la producción de café, aunque demandarán medidas necesarias para lograr una producción óptima.
- Las zonas de **adaptación sistémica** son aquellas donde se presentarán cambios en el clima, aunque no se descarta la producción de café en el futuro, si se deben tomar medidas más complejas para adecuar el sistema de producción de café arábica frente a condiciones más adversas.
- Las zonas de **transformación** son áreas donde es más probable que el cambio en el clima conlleve a que la producción del cultivo sea inviable y la adaptación requerirá un rediseño del sistema de producción o la transformación a nuevos cultivos. Los habilitadores externos serán fundamentales para apoyar el cambio.
- Por último, las zonas de **resiliencia sistémica** son las zonas en las hay una alta incertidumbre en la asignación de la aptitud por parte de los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés).

Los resultados estiman que para 2030 y 2050 se podría observar una reducción considerable de las áreas aptas para la producción de café, especialmente en aquellas zonas que están relacionadas con las categorías altas y bajas de la clasificación climática actual. Los resultados de la modelación muestran que prácticamente las zonas aptas para la producción de café se reducirían a las partes más altas de las montañas de El Salvador.

Los mayores impactos se verán hacia el 2050s, donde las zonas de transformación se amplían considerablemente principalmente en el centro del país, departamentos como Cuscatlán, San Vicente, y Cabañas; algo para recalcar, es que las zonas de adaptación incremental se sitúan principalmente en dos zonas, una entre Usulután y San Miguel, mientras que la segunda zona se ubica en la cordillera Apaneca – Ilamatepec, entre los departamentos de Ahuachapán, Santa Ana y Sonsonate.

Con base en un muestreo de CENTA – Café (10,584,584 parcelas de café) y los modelos, se estima que para el año 2030, aproximadamente 20% de las fincas estarán en el área de transformación (área que supone que necesitaran una adaptación transformativa, por lo que requerirá un rediseño del sistema de producción o la transformación a nuevos cultivos), mientras que para el año 2050 el porcentaje de fincas en el área de transformación aumenta a 30%. Mientras 18% de las fincas se mantendrán en áreas con una adaptación incremental (que requiere menores esfuerzos de adaptación y corresponde a áreas de mayor altitud) para el 2030 y siendo el porcentaje de fincas en esta área solamente 8% para el 2050.

Tomando como insumos: los resultados del modelaje de aptitud de café, los talleres con técnicos y productores, más la literatura se ha se identificado una lista de medidas adaptación para disminuir los efectos negativos generados por el cambio climático para los diferentes gradientes de adaptación (Transformación, Adaptación sistémica y Adaptación incremental). De esta lista

larga se priorizaron dos grupos de prácticas: renovación con variedades adaptadas a cada piso altitudinal y sistemas agroforestales.

De la lista larga de potenciales variedades priorizadas por gradiente de adaptación, ha sido seleccionado un grupo más reducido que presenta desde niveles medios a altos en cuanto a calidad en taza. De las cuales solamente la variedad Catísic (Catimor) presenta un bajo potencial en taza. Las variedades de Sarchimores (Cuscatleco, Marsellesa y Parainema), así como el Anacafe 14 (Catimor), presentan un potencial intermedio de calidad en taza. Mientras que las variedades priorizadas para la zona incremental, como el Tekísic (un Borbón mejorado) y Pacamara (Pacas X Maragogipe) presentan un alto potencial en taza, pero presentan susceptibilidad a roya. Los resultados de la evaluación financiera a nivel de parcela de la renovación de café, indican que la adopción de esta práctica tendrá un impacto favorable en la rentabilidad para el productor entre US\$ 3.472 y 1.599. Con la renovación se logra aumentar los beneficios por encima de US\$ 1.000/mz en los primeros años de la plantación, sin embargo, los altos costos de mano de obra por cosecha reducen la rentabilidad.

Para la zona de Transformación y resiliencia se recomienda **Sistemas Agroforestales Diversificados** con 2.800 plantas de café más musáceas como banano seda o limón). En el caso de musáceas la densidad será 175 plantas/mz. Una densidad inicial de 140 árboles maderables /mz y una densidad final de 80 a 120 individuos/mz. Además de los beneficios de regulación de microclima, se generan ingresos por los otros productos del sistema. El flujo de ingresos derivados del cultivo de musáceas se puede obtener desde los primeros años (sobre todo en sitios con mayor temperatura), mientras la madera comienza a generar ingresos (por raleos) a partir del año 15 para cedro, 16 para laurel y 19 para caoba.

En la zona de adaptación sistémica se propone **Sistemas Agroforestales con Maderables**, con una densidad de café de 2.800, con especies maderables de alto valor y se establecerán a una densidad inicial de 233 árboles maderables /mz (7,5m X 5m) y una densidad final de 100 a 120 individuos/mz. Esta medida de adaptación, no solo implica solamente un mejor microclima para el café, sino que una fuente importante de ingresos que podría compensar menor rendimiento en comparación con la zona de mayor aptitud para café

Y para la zona de adaptación incremental se propone **Sistemas Agroforestales con Árboles de Servicios**, siempre con una densidad de café de 2.800 más especies del género Inga. Con este sistema se obtiene una mayor rentabilidad por presentar un mayor rendimiento de café, sin embargo, también podría aumentar su rentabilidad por un precio diferenciado por una mejor calidad de café. Un aumento de rendimiento conlleva también un aumento de costos, debido a que los costos de recolección de la cosecha representan entre el 43 al 55% de los costos de producción.

1. ANTECEDENTES

La producción de café en Centroamérica es un renglón económico importante, sostiene aproximadamente 300.000 productores y genera 1.700.000 trabajos temporales. En el caso de El Salvador, para la cosecha 2018/2019, la producción se estima en 820.215 QQS ORO UVA, generó aproximadamente 41.010 empleos directos, y representó en divisas por exportaciones un valor de US\$113,4 millones (CSC, 2019). Aunque para la cosecha 2018/2019 no existe una estimación de su participación en el PIB Agropecuario nacional, para el año 2016 se estima que representó 4,7% (CSC, 2019). Las mayores exportaciones de café son a EEUU (55,3% en la cosecha 2018/2019). De acuerdo con el CSC (2019), son más de 20 los compradores de café para exportación, pero 40% de las compras se concentran en tres compradores (Coex Coffee International, Inc., Ecom Agroindustrial Corp. Ltd. y Paragon Coffee Trading Co. L.P.). El Salvador vende un porCENTAje considerable de café diferenciado (31,6%), en gran medida por certificados de producción sostenible y cafés finos, los cuales tienen un precio superior a los cafés comerciales, en promedio 33% mayor en la cosecha 2018/2019 (CSC, 2019).

En el Salvador, 75% de los productores tienen menos de 5 manzanas en café, y poseen sólo 14% del área sembrada en café a nivel nacional, mientras que sólo 3% tiene más de 100 manzanas y posee 40% del área sembrada (Tabla 1).

Tabla 1. Estratos según área cultivada en manzanas

AREA	PRODUCTORES	%	HOMBRES	MUJERES	JURIDICOS	MZ.	%
0 - 5 MZ	17,677	75%	11,343	6,248	86	27,666.8	14%
5.01 - 10 MZ	2,034	9%	1,245	704	85	13,549.6	7%
10.01 - 25 MZ	1,712	7%	906	631	175	23,163.9	12%
25.01 - 50 MZ	942	4%	449	272	221	26,748.2	13%
50.01 - 100 MZ	643	3%	250	180	213	29,360.4	15%
Más de 100 MZ	590	3%	163	115	312	79,146.1	40%
Total	23,598	100%	14,356	8,150	1,092	199,635	100%
PorCENTAje	100%		61%	35%	5%		

Fuente: CSC (2019)

De acuerdo con el CSC (2019), las regiones productoras de café en El Salvador son: Apaneca-Illamatepec (50% del área sembrada y 46% de los productores), El Bálsamo-Quezaltepeque (27% área y 19% productores), Tecapa Chinameca (12% área y 13% productores), Chichontepec (5% área y 10% productores), Cacahuatique (4% área y 6% productores) y Alotepec-Metapan (2% área y 6% productores). Lo anterior indica que las regiones Chichontepec y Alotepec-Metapan concentran un mayor número de productores con menor área en café mientras que en la región de El Bálsamo-Quezaltepeque se concentran productores con mayores extensiones (Tabla 2)

La mayor parte de las regiones en donde se cultiva café son de bajo (Central Standard), producidos entre 600 a 900 msnm, y representa 51 % del total del área cultivada de café en el país. El café de media altura (High Grown – HG), se produce entre los 901 y 1.200 m.s.n.m., y representa 34 % del parque cafetero. Por último, se presenta el café de estricta altura (Strictly High Grown-SHG), producido a más de 1.201 m.s.n.m., y la superficie cultivada representa 15 %

del total del área sembrada en café (DIGESTYC – MAG, 2007).

Tabla 2. Distribución del área cafetalera por altura, según Censo Agropecuario 2007.

Altitudes	Área cafetalera por altura y región (ha)			Total
	Occidente	Centro	Oriente	
Estricta altura	15.112	6.773	2.505	23.732
Media altura	20.702	20.266	8.674	51.120
Bajío	40.800	18.694	18.813	77.488
Total	76.614	45.733	29.993	152.340

Fuente: DIGESTYC – MAG.

Las plantaciones de café en arreglos agroforestales son reconocidas por los servicios ecosistémicos asociados, ya que contribuyen a la conservación de la biodiversidad y al almacenamiento de carbono (Somarriba et al. 2004; Vaast et al. 2005). No obstante, el cultivo de café tiene un reducido nicho ecológico, y es altamente sensible al clima; cambios en temperatura y precipitación afectan su productividad y calidad (DaMatta 2004; Läderach et al. 2011). Se proyecta que la aptitud climática para el café en Centroamérica se reducirá debido al cambio climático, principalmente como resultado de un aumento de temperatura (Läderach et al. 2011).

Al mismo tiempo que los productores enfrentan la necesidad de adaptación y mitigación al cambio climático, también deben hacer frente a otros retos como los precios volátiles del café y epidemias de enfermedades (Schroth et al. 2009).

Para enfrentar este tipo de retos, CIAT ha venido trabajando el enfoque metodológico Agricultura Sostenible Adaptada al Clima (ASAC), en el marco del Programa de Investigación de CGIAR en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS) para abordar el desafío del incremento del calentamiento global y el descenso de la seguridad alimentaria con prácticas agrícolas, políticas y medidas a través de una colaboración estratégica entre CGIAR y Future Earth. ASAC hace frente al cambio climático para el logro de la seguridad alimentaria, pero sin perder de vista el contexto de producción y considerando los otros retos que enfrenta la agricultura. La ASAC trabaja bajo tres pilares: 1) el incremento de manera sostenible de la productividad agrícola, 2) la adaptación y fortalecimiento de la resiliencia de los eco-sistemas productivos y 3) la mitigación que pretende reducir las emisiones de GEI.

El presente estudio identifica los potenciales impactos del cambio climático en la zonas cafetaleras de El Salvador y recomienda una serie de medidas de adaptación para el sector de café, basado en un Marco de Priorización de Prácticas de ASAC, que se compone de cuatro (4) fases: 1) identificación de posibles impactos del cambio climático en zonas cafetaleras, 2) identificación de prácticas ASAC (medidas de adaptación), 3) priorización de las mismas, y 4) análisis costo-beneficio. En esta fase, de análisis costo – beneficio, se realiza la evaluación económica privada de las medidas de adaptación para evaluar el potencial de la inversión.

El estudio se centra en la modelación de impacto del clima sobre la aptitud de las áreas para sostener la producción del café con ventanas de tiempo a 2030 y 2050. Basados en los resultados del modelo se estiman unos gradientes de adaptación, los cuales permiten un análisis diferenciado de adaptación. Parte del análisis se lleva a cabo con expertos locales para identificar opciones de adaptación para los diferentes gradientes encontrados además de un breve análisis del contexto de la caficultura en El Salvador.

2. OBJETIVOS

2.1 General

Desarrollar un análisis de alternativas de adaptación al Cambio Climático diferenciado por zonas (i.e. bajo, media y alta) para el cultivo del café que generen servicios ecosistémicos similares al Sistema Agroforestal Café, incluyendo análisis costo beneficio para cada alternativa propuesta.

2.2 Específicos

- a) Identificar las áreas de posibles cambios de aptitud climática actualizando los modelos de 2030 y 2050 usando el RCP (Ruta de Concentración Representativa) 8.5 y los GCM (Modelos de Circulación Global) disponibles y zonificar los gradientes de impacto de acuerdo al cambio de aptitud para proponer medidas de adaptación acordes a diferentes gradientes: incrementales, sistemáticas o transformativas. Esto será validado con expertos nacionales e internacionales.
- b) Identificar y priorizar prácticas y tecnologías de agricultura climáticamente inteligente, que provean servicios ambientales similares a los del bosque cafetalero (principalmente en relación a stock de carbono, disponibilidad de agua y diversidad arbórea), para los diferentes gradientes previamente identificados. Esto será validado con expertos nacionales e internacionales.
- c) Realizar un análisis de Costo – Beneficio sobre 5 prácticas y/o tecnologías priorizadas por cada piso altitudinal, y validar las medidas de adaptación identificadas con expertos nacionales e internacionales.
- d) Priorizar áreas de intervención identificándolas espacialmente y estimando el número de productores por tipología (tamaño de la finca, variedades de café, pobreza, etc. Basado en información ya existente).
- e) Preparar en conjunto con BID, autoridades nacionales y actores claves en el sector cafetalero una serie de portafolios de proyectos para pequeños productores basados en los análisis de priorización por gradientes, oportunidades y barreras, y análisis CBA.

3. CONTEXTO

3.1 Historia del café en El Salvador

Aunque las publicaciones sobre la introducción del café en El Salvador no coinciden sobre su fecha de introducción al país, sí lo hacen al apuntar el año donde se iniciaron las mejoras tecnológicas apuntando al año de 1950 y que incluyó ser limpiado a mano, procesado con agua fresca, recogido tinto, sin granos defectuosos o con una humedad promedio de 12% y se introdujo la variedad de café bourbon (Cuadras y López, 2012).

Gracias a estas mejoras tecnológicas y políticas favorables al sector, junto con dos décadas de estabilidad política, hicieron del país uno de los más productivos en el mundo, gozando de una respetuosa imagen por su calidad (López 2012).

Luego, en 1982, se creó el Instituto Salvadoreño de Investigaciones del Café (Decreto 124-1982) como una entidad científica de carácter público con el fin de incrementar la productividad y competitividad del sector a través de mejoras tecnológicas en el cultivo. Sin embargo, desde 1997, el precio internacional del café verde empezó a sufrir un fuerte deterioro y fluctuaciones que son atribuidas al comportamiento de la oferta y la demanda, presentándose un desajuste entre ambos indicadores, pues la oferta de café ha sobrepasado a la demanda de café en el mercado internacional. Ocasionando esto una disminución en el precio pagado al productor (Rivera et al, 2003)

Luego de dos décadas de bonanza de la producción cafetalera, la inestabilidad de precios de mercados internacionales y su consecuente incremento del riesgo ha ocasionado un decrecimiento en los precios a nivel nacional a los productores. Las decisiones de inversiones anuales que hacen los caficultores son influenciadas por el comportamiento del precio del café, el costo de los insumos, las políticas gubernamentales, la seguridad jurídica y social, el ambiente económico propicio, y la escasez de mano de obra (PROCAFE, 2011)

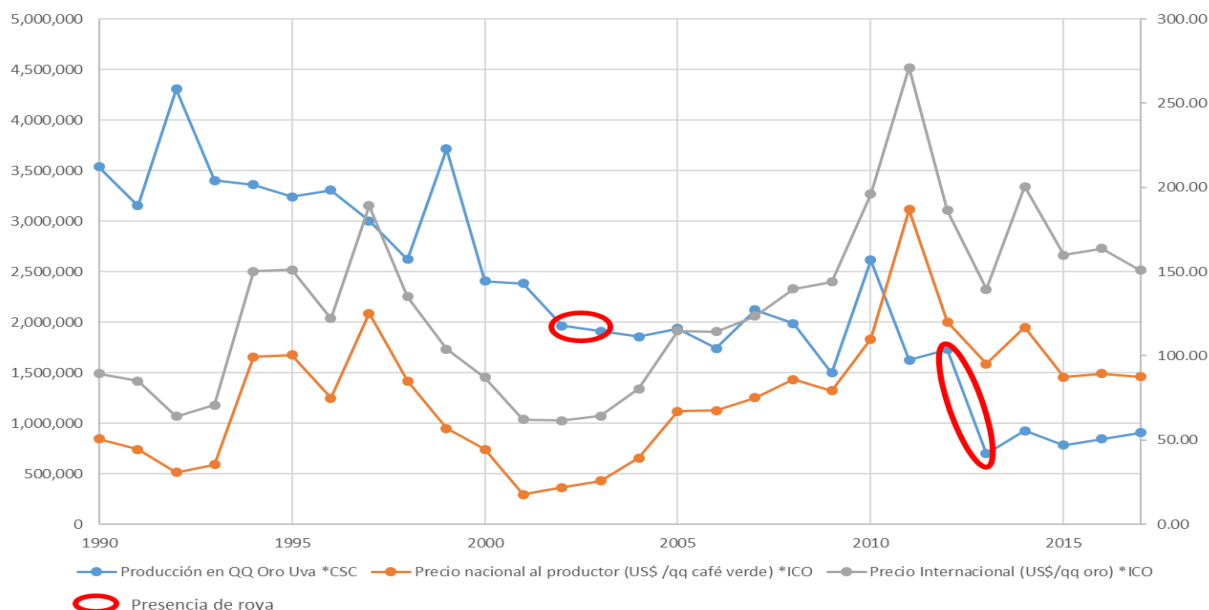


Figura 1. Comparación de datos de producción (CSC) y precios del café (ICO) en El Salvador.

Por otro lado, tanto el área, producción, y productividad han venido decreciendo como resultado de diferentes situaciones adversas, principalmente relacionadas con volatilidad de los precios, inseguridad e impactos del clima. Progresivamente, se ha venido disminuyendo en estos tres indicadores si se comparan los ciclos 2000/2001 y 2018/2019, en producción de 2.406.098 a 820.215 qq oro uva (CSC, 2019), mientras que en términos de superficie cultivada, se ha pasado de 164.220 ha en el ciclo 1992/1993 a 152.339 ha en el ciclo 2009/2010 (Procafé, 2010) y 140.742 ha en el ciclo 2017/2018 (CSC, 2019) y en productividad de 18,36 (1992/1993) a 6,89 (2009/2010) qq oro uva /mz. Alcanzando una reducción de productividad de más de 50% al comparar ambos ciclos (Procafé, 2010).

La caída de los precios del café generalmente conduce a que los productores reduzcan las inversiones y descuiden labores de manejo del cultivo, y esto, sumado a condiciones climáticas, conlleva a problemas fitosanitarios como el caso de la roya del café y por ende a bajas producciones. Hay reportes de afectaciones en 2002-2003 y 2012-2014 (Virginio y Astorga, 2015). Las afectaciones entre 2012 y 2014 han llegado a impactar entre 20 y 50% del cultivo, principalmente aquellos localizados en zonas de bajo y media altura (PMA, 2013).

Sumando todos los factores mencionados anteriormente tienen como consecuencia una reducción de la productividad y por ende un mayor costo por quintal producida, dicha relación ha sido evidenciada en el estudio de Procafé (2011) comparando datos de los ciclos 2009/2010 y 2010/2011 (Tabla 3)

Tabla 3. Relación entre productividad y costos por quintal producido para varios departamentos de El Salvador.

Departamento	Productividad (qq oro uva/mz*)		Diferencia (%)	Costos qq oro uva/mz (USD)		Diferencia (%)
	2009/2010	2010/2011		2009/2010	2010/2011	
Ahuachapán	9.6	15.18	58.13	79.8	54.23	-32.04
Santa Ana	13.1	15.58	18.93	68.3	62.15	-9.00
Sonsonate	20	18.57	-7.15	63.5	73.63	15.95
Chalatenango	18.7	18.26	-2.35	67.1	72.21	7.62
La Libertad	7.3	13.8	89.04	66.6	53.94	-19.01
San Salvador	20.2	31.1	53.96	79.3	58.01	-26.85
Cuscatlán	6.5	9.03	38.92	117	87.46	-25.25
La Paz	15.5	22.6	45.81	67.7	53.85	-20.46
San Vicente	20.9	26.55	27.03	86	60.94	-29.14
Usulután	7.3	12.82	75.62	114.6	77.84	-32.08
San Miguel	12.1	20.55	69.83	78.3	56.16	-28.28
Morazán	14.1	16.27	15.39	85.7	70.47	-17.77

*1 mz equivale a 0.7 ha.

Cabe resaltar que el estudio (Procafé, 2011) atribuye el incremento de productividad en la cosecha 2010/2011 a condiciones climáticas. No obstante, en términos generales, todavía existe un gran margen para mejorar el manejo de los cafetales en El Salvador.

3.2 Provisión de servicios ecosistémicos del café

Los servicios ecosistémicos hacen referencia a los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assesment, 2003) Estos pueden diferenciarse entre: servicios de abastecimiento, servicios de regulación, servicios culturales y servicios de soporte.

Tabla 4. Revisión de literatura sobre servicios ecosistémicos de los cafetales bajo sombra a nivel global

Efecto	Polinización	Global			El Salvador	
		Control de plagas	Regulación de clima	Nutrientes y secuestro	Agua	Leña
Positivo	Más especies polinizadoras ^{1*} , más abundancia de polinizadores ² , abejas nativas ³ , y abejas sociales ³	Más parasitoides ⁸ , más abundantes ⁹ y más especies ¹⁰ de depredadores, más nidos de depredadores disponibles ¹¹ , eliminación de plagas ¹² , menos abundancia ¹³ y menos daños causados por plagas ¹⁴	Hojas más frecuentemente húmedas ²⁴ ; bajas temperaturas de aire, suelo u hojas (media máximas o promedio) ²⁵ ; menos radiación solar neta, fotosintéticamente activa o global ²⁶ ; menos y menores deslizamientos de tierras ²⁷ ; menores velocidades de viento ²⁸ ; menor tasa de evaporación y evapotranspiración de las plantas ²⁹ ; agua relativamente más extraíble del suelo ³⁰ ; más humedad del suelo ³⁰ ; mayor captura de precipitación ³¹ ; menos fluctuaciones de humedad y radiación solar ³² ; menos daño por heladas ³³ ; menores fluctuaciones interdiales en temperatura ³⁴ ; menor tasa de enfriamiento del aire nocturno ³⁴	Más almacenamiento de carbono sobre el suelo ³⁵ , más carbono orgánico total del suelo ³⁶ , más mineralización del nitrógeno ³⁷ , menos contaminación de nutrientes ³⁷ , más microbios del suelo activos ³⁸ ; mayor pH del suelo y capacidad de intercambio catiónico, más calcio y magnesio, menos fósforo ³⁹ ; mayores concentraciones de nitrógeno en las hojas ⁴⁰ ; Mayor proporción de fósforo disponible para cultivos agrícolas ⁴¹ .	Las zonas de cafetales descansan sobre las principales zonas de recarga hídrica, contribuyendo con la captación de agua	Satisface el 44% de la demanda de leña
Neutral	Sin impacto en la abundancia de polinizadores ⁴ o diversidad de polinizadores ⁵	Sin impacto en plagas ¹⁵ , depredadores ¹⁶ , o presa ¹⁷ abundancia o sobre riqueza de especies de depredadores ¹⁸ ; sin eliminación de plagas ¹⁹		Sin impacto en carbono orgánico en el suelo ⁴²		
Negativo	Menos abundantes ⁶ y pocas ⁷ especies polinizadoras	Mayor abundancia de plagas ²⁰ y riqueza en especies ²¹ , menos abundantes ²² y menos ²³ especies depredadoras				

Fuente: (Jha et al, 2014 *) y nacional (FUNDES, 2003).

* Los números insertados en la tabla corresponde a las referencias que se adjuntan como material suplementario (Anexo 1) describiendo la metodología usada por los autores.

En la literatura existe un consenso sobre los atributos de la producción de café bajo arreglos agroforestales en cuanto al almacenamiento y secuestro de nutrientes y regulación del clima. Los sistemas cafetaleros con sombra acumulan más carbono que las plantaciones a pleno sol, ya que son los árboles de porte alto, es decir con mayor diámetro a la altura del pecho, que almacenan más carbono. El manejo que los productores realizan al sistema productivo y la cantidad de árboles que existan en sus parcelas, es determinante sobre la cantidad de C que se almacena y cantidad de materia orgánica. Melgar y Nieto (2017) encontraron que un productor que en todas sus parcelas posee una alta densidad de árboles, incorpora los rastrojos al suelo, deja como cobertura las hojas de las ramas de los árboles que poda, en uso de suelo CPA del sistema bosque predominantemente con café y tiene más de 40 años de manejar de forma similar las parcelas de la finca, puede llegar a almacenar 96,82 Mg C ha⁻¹. En cambio, otro productor que maneja bajas densidades de árboles en las parcelas de Cultivo y Potrero, posee pasto natural y mejorado, el manejo que le da a los árboles es poco, realiza una poda por año y utiliza los residuos de cultivo como alimento para su ganado, en época seca puede llegar a almacenar 21,71 Mg C ha⁻¹ en su sistema productivo. En la Tabla 5 se presentan algunos valores de referencia algunas coberturas del suelo importantes en el país.

Tabla 5. Carbono que aportan los componentes en diferentes usos de suelo en Chalatenango, El Salvador.

Sistema	Uso del suelo*	Carbono en Mg ha ⁻¹				PorCENTAje que aporta cada componente			
		S	H	N	B	S	H	N	B
Bosque	AD	38.5	7.47	1.66	61.8	35.2	6.83	1.52	56.5
Bosque	BS	39.7	7.94	0.7	41.3	44.3	8.87	0.78	46.1
Bosque	CPA	37.5	8.51	1.17	71.5	31.6	7.18	0.99	60.3
Cultivo	CAD	31.1	5.8	0.61	19.9	54.1	10.1	1.07	34.7
Cultivo	CBD	24.8	5.77	0.09	3.15	73.3	17.1	0.25	9.33
Potrero	PAD	32.2	5.31	0.51	21.7	53.9	8.89	0.85	36.4
Potrero	PBD	33.4	5.21	0.04	2.24	81.7	12.8	0.11	5.47
Potrero	PT	30.8	4.18	0.2	0.0	87.5	11.9	0.58	0.0

*: AD: Área en descanso; BS: Bosque secundario; CPA: Cultivo perenne abandonado, incluye áreas con Café; CAD: Cultivo con alta densidad; CBD: Cultivo con baja densidad; PAD: pastura con alta densidad; PBD: pastura con baja densidad y PT: Pastura tradicional. S: suelo; H: hojarasca; N: necromasa; B: biomasa arbórea.

Los beneficios que se podrían obtener de un árbol maderable (como madera y captura de carbono) están fuertemente ligados a las prácticas silviculturales que se realicen. Varios estudios (Jiménez, 2012 citando a Muñoz et al, 2005 y Pinkard y Beadle, 1998) han confirmado que los raleos y podas oportunas podrían significar mejor calidad de la madera obtenida de la plantación. Así mismo la fertilización y la densidad de siembra inicial de los árboles influye en su desarrollo (Jiménez, 2012).

En los agroecosistemas como el café con sombra, las variaciones diarias de temperatura, humedad del aire y del suelo son menores que en los cafetales sin sombra. Se ha documentado en varios sitios la regulación de la temperatura haciendo manejo de la sombra. En México, las plantaciones de café arábica con sombra de *Inga jinicuil* mostró, en comparación con otro sistema, una reducción de 5,4°C en temperatura máxima promedio y un incremento de 1,5°C en temperatura mínima promedio (Barradas y Fanjul, 1986). Mientras en Brasil, un cafetal a pleno sol se mostró más cálido en un promedio de 2,1°C en comparación con un café bajo sistema agroforestal (Campanha et al, 2005).

La incorporación de árboles en el cultivo del café puede también incrementar la infiltración y

regular los flujos hídricos cuenca abajo, disminuyendo el riesgo de inundaciones y aumentando los caudales de los ríos en verano (Martínez – Rodríguez et al, 2017).

Tabla 6. Balance hídrico durante épocas secas y lluviosas para 2004 y 2005 a una profundidad de 200 cm para dos sistemas de café en San Pedro de Barva, Costa Rica. (Siles, 2007).

Año	Sistema	Periodo	Precipitación (mm)	Escorrentía (mm)	Intercepción (mm)	Transpiración (mm)	Variación en contenido de agua en el suelo (mm)	Balance (mm)
2004	MC	Seco	99	5	14	243	-110	-53
2004	AFS	Seco	99	3	22	303	-161	-67
2004	MC	Lluvioso	3132	297	216	478	83	2060
2004	AFS	Lluvioso	3132	179	400	618	168	1768
2005	MC	Seco	192	11	21	290	-69	-62
2005	AFS	Seco	192	6	26	407	-54	-193
2005	MC	Lluvioso	2495	191	222	402	88	1592
2005	AFS	Lluvioso	2495	82	248	519	73	1573

MC: Café como monocultivo

AFS: Sistema agroforestal de café arábica con *Inga desinflora*

Aunque está comprobado que los cafetales con sombra permiten una mayor infiltración del agua, en parte debido a la mayor cantidad de hojarasca en la superficie del suelo (Siles, 2007), debe considerarse también que los cafetales con árboles de sombra también consumen más agua por transpiración que los cafetales puros (Siles, 2007; van Kanten y Vaast, 2006). Un sistema agroforestal de café contribuye a una mayor infiltración de agua comparado con monocultivo, pero la selección de especies de árboles y su distribución debe ser cuidadosa en el diseño del modelo SAF a usar, considerando el consumo de agua.

4. METODOLOGÍA

4.1 Cambios de aptitud climática en áreas cafetaleras para 2030 y 2050

El método utilizado para identificar el impacto del cambio climático sobre el cultivo de café en El Salvador es Random Forest (Breiman, 2001), un método *machine learning* (aprendizaje automático) que en este estudio se ha empleado para estimar áreas con aptitud climática para el cultivo. Aptitud climática se define como la similitud de un conjunto de variables climáticas a combinaciones encontradas en lugares con presencias de café confirmadas. Es decir que lugares con altos valores de aptitud climática tienen un clima muy parecido a lugares donde se ha observado caficultura en el pasado. Este enfoque de modelaje busca mejorar la comprensión de la distribución potencial de una especie bajo factores climáticos y cambios en ellos.

El método Random Forests (RFs) es popular en el modelaje predictivo de la distribución de especies correlativo por su capacidad de distinguir múltiples tipos de zonas agro-climáticas, por el bajo riesgo de un sobreajuste del modelo y por la insensibilidad a datos no paramétricos. Otros algoritmos populares, entre la gran cantidad que hay, son MAXENT, SVM y GAM. La capacidad de RFs de predecir múltiples zonas agro-climáticas es ventajosa para entender diferencias entre tipos de sistemas de producción y para definir zonas de recomendación con características homogéneas. A la vez el bajo riesgo de sobreajuste es importante en el contexto del cambio climático en el que se busca clasificar combinaciones de variables climáticas novedosas sin homólogo en el pasado.

El modelaje RandomForest requiere tres datos: (1) presencia del cultivo de café; (2) pseudo-ausencias, que corresponde a lugares de donde no se tiene conocimiento si existe o no presencia del cultivo; (3) un conjunto de variables climáticas importantes para el desarrollo óptimo o no del cultivo.

Los puntos de presencia corresponden a un conjunto de datos con coordenadas geográficas de café, que proviene de distintas fuentes, entre las que se encuentran: CENTA, Procafe, Botany, Apecafe, Trópicos, Comus, entre otros. La base de datos tiene 12.437 entradas de fincas georeferenciadas entre 2007 y 2015 (Figura 1). El modelo RandomForest solamente usa las coordenadas de fincas como dato de entrada; los datos de productividad, que contiene la base de datos del CENTA, podrían emplearse, pero agregan una mayor incertidumbre al análisis, ya que además del clima promedio, existen otros factores que también influyen como la variabilidad climática, el manejo de los suelos, el manejo de las plagas y enfermedades, la edad del cultivo, la variedad, el grado de sombra, entre otras. Aunque la base de datos del CENTA también incluye información sobre suelos a nivel de fincas, no existe información espacial continua para el resto del territorio que permita hacer uso de dicha información. Por esta razón, se usa en este análisis exclusivamente los puntos de presencia para el análisis mientras se logra avanzar en la generación de información que permita análisis más robustos. A continuación, se detalla el procesamiento de los datos:

- a) El primer proceso consiste en la limpieza y selección de datos. La limpieza consiste en eliminar de las bases de datos información que sea redundante o que sea incoherente. En ambos casos se trata de errores de digitación, al introducir dos veces o más la misma información de una finca o información al introducir un dígito que conduce a que los puntos se ubiquen fuera de límite del país. De los 12.437 puntos quedaron 11.814 después de la limpieza. La selección de datos se trata de un procedimiento técnico que busca reducir el sesgo por georeferencias aglomeradas en una zona climática limitada. Lo anterior quiere decir que posiblemente muchos datos de las fincas se encuentren en lugares muy cercanos

y condiciones climáticas similares. Para esto, se realiza un proceso de pixelado a nivel de todo el país, donde habrán unas condiciones de clima asociadas a cada cuadrícula (iguales al interior de la cuadrícula pero que pueden variar entre cuadrículas). En la medida que el pixelado sea mayor entonces el análisis tendrá mayor grado de detalle. Los puntos de presencia del cultivo presentes en una cuadrícula se sintetizan en un solo punto y por lo tanto del número original de observaciones se reducen necesariamente ya que en muchos casos coinciden más de un punto en los pixeles. Se realizó un pixelado a diferentes escalas (Tabla 7).

Tabla 7. Presencia del cultivo de café por cuadrícula y pixeles

Cuadrícula de arco	Pixeles con presencia de café
15"	5.230
30"	2.848
1'	1.258
1.5'	732
2'	499
2.5'	363

En un primer paso se aplicó una cuadrícula de 15 segundos de arco (aproximadamente 0,5 kilómetros cerca de la línea del Ecuador). El número total de celdas no duplicadas fue de 5.529, localizadas en 14 departamentos de El Salvador (Figura 2). Se puede observar una concentración de puntos al oeste del país, y un poco menos al este del mismo; siendo el departamento Santa Ana que mayor cantidad de puntos tiene. En pasos siguientes, fueron aplicadas cuadrículas de mayor tamaño, 30 segundos de arco, 1, 1,5, 2, y 2,5 min de arco, debido a que, al usar la escala más grande, la base de datos representa mejor la distribución real del cultivo, mientras a escala pequeña, la base de datos representa mejor la distribución potencial del cultivo. En un escenario de cambio climático los análisis a diferentes escalas pueden ser interesante para estimar los impactos en un escenario sin adaptación, mientras que en el último es más interesante para entender el potencial adaptativo.

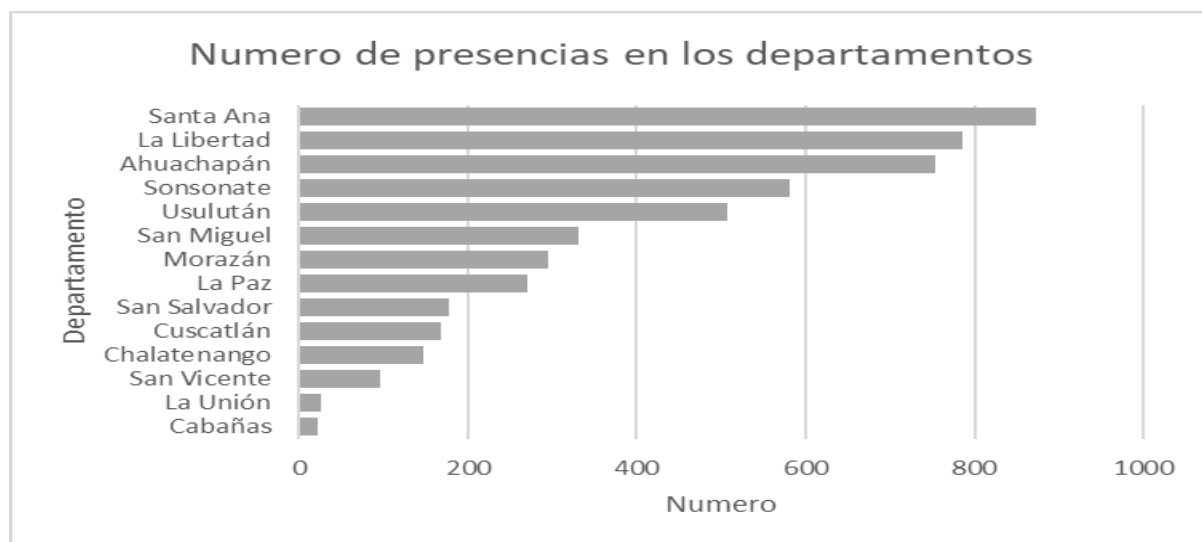


Figura 2. Presencia de cultivos de Café

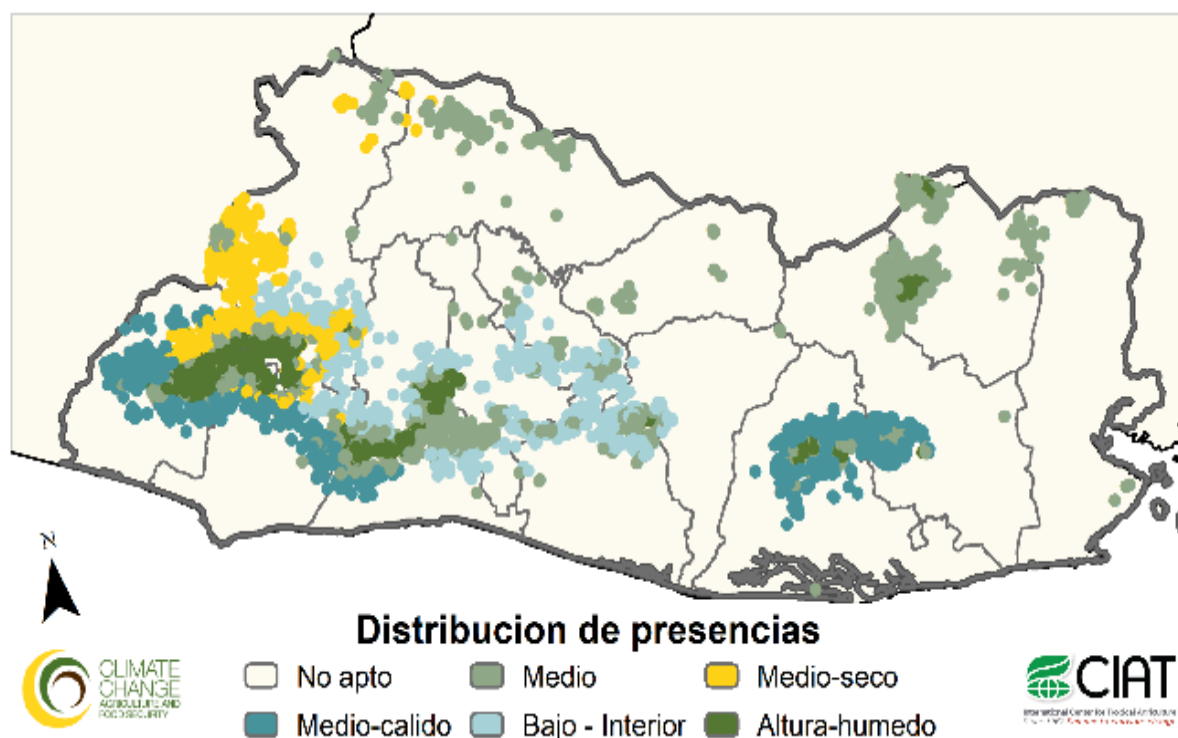


Figura 3. Mapa de distribución de presencia de cultivos de Café

- b) El segundo procedimiento consiste en el manejo de las pseudo-ausencias, las cuales se refieren a lugares en donde no se conoce si hay o no presencia del cultivo. De igual forma que para las presencias, las pseudoausencias pueden introducir un sesgo al modelo correlativo. Por esta razón es importante tener en cuenta el rango geográfico del cual se toma la muestra. En general, este rango debe reflejar el conocimiento a priori de la distribución de la especie y ser adecuado a la escala del estudio (VanDerWal et al. 2009). Una muestra de pseudoausencias de un área amplia, resulta en un modelo demasiado general, mientras una muestra de un área muy limitada puede resultar en un sobreajuste del algoritmo y una subestimación del área con idoneidad, sobre todo en el caso de la extrapolación al futuro. En este caso se buscó investigar en qué parte de El Salvador se encuentran las áreas aptas para la caficultura y luego se tomaron muestras de toda el área del país, a excepción de los píxeles con presencias confirmadas. Igual de importante es el número de pseudoausencias. Una muestra no balanceada puede sesgar el modelo hacia la clase mayor (Barbet-Massin et al (2012), es decir que una muestra pequeña de pseudoausencias puede causar una sobreestimación de áreas aptas, y una muestra grande de pseudoausencias una subestimación. Para modelos de la distribución de especies binarias (presencia/ausencia) se recomienda una relación en la cantidad de la muestra de 1:1. Para la clasificación multi-clase con n clases existe un trade-off con el problema binario de presencias: pseudoausencias. La manera en que se balanceó fue tomando una muestra de igual tamaño de cada clúster agroclimático y una muestra de pseudoausencias de tamaño $n/2$. Es decir que con 5 clústeres la muestra pseudoausencia es 1:2.5 para cada clúster y 2:1 para presencia-ausencia.

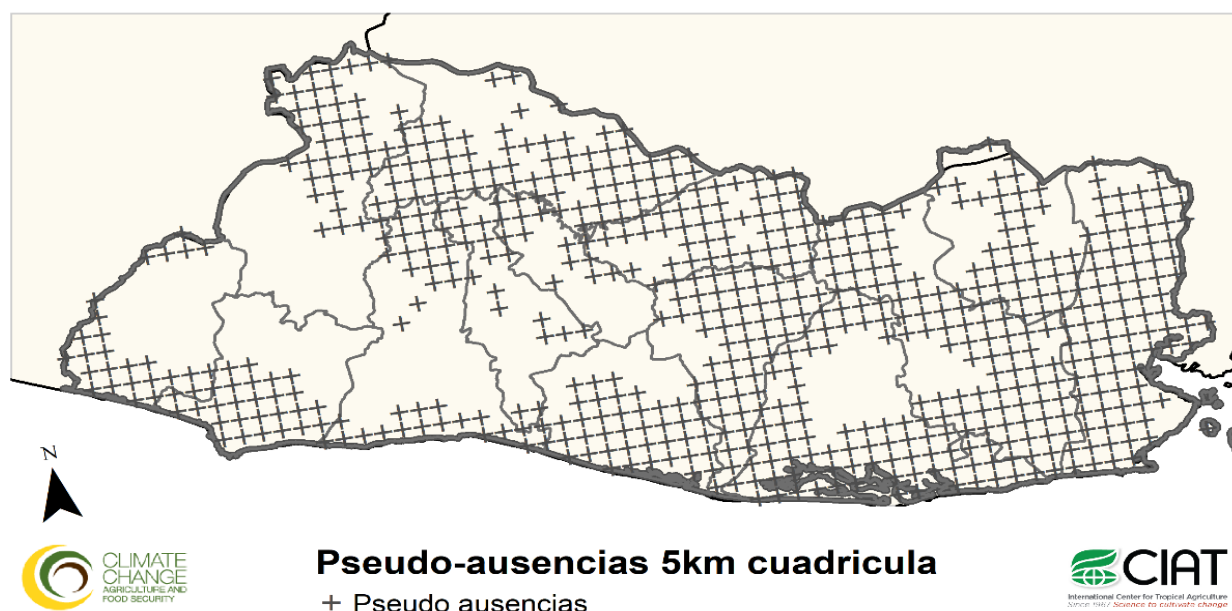


Figura 4 Ejemplo de la distribución de pseudoausencias con una cuadrícula de 2.5"

- c) El tercer paso es la construcción de una línea base climática, la cual fue definida como el periodo comprendido entre 1970-2000, utilizando el conjunto de datos de Worldclim (Hijmans et al., 2005) a resolución de 0,5 minutos de arco – aproximadamente 1 kilómetro en el ecuador). Estos datos corresponden al comportamiento de la precipitación y temperatura máxima, promedio y mínima, resumidos en 19 variables bioclimáticas (Tabla 8). Además, se complementó con una variable derivada de meses consecutivos con menos de 40 mm de precipitación; ya que una corta estación seca induce periodos secos de floración uniforme, y más de tres meses puede dañar los árboles de café.

Tabla 8. Variables Bioclimáticas

Tipo	Variable bioclimática	Descripción
Temperatura	BIO 1	Temperatura promedio anual
	BIO 2	Rango promedio diario (media mensual (máx temp - mín temp))
	BIO 3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (*100)
	BIO 4	Estacionalidad de la temperatura (Desviación estándar *100)
	BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
	BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
	BIO 7	Rango de temperatura anual (BIO5-BIO6)
	BIO 8	Temperatura promedio del trimestre más húmedo
	BIO 9	Temperatura promedio del trimestre más seco
	BIO 10	Temperatura promedio del trimestre más cálido
	BIO 11	Temperatura promedio del trimestre más frío
Precipitación	BIO 12	Precipitación anual
	BIO 13	Precipitación del mes más húmedo
	BIO 14	Precipitación del mes más seco

Tipo	Variable bioclimática	Descripción
	BIO 15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación)
	BIO 16	Precipitación del trimestre más húmedo
	BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
	BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido
	BIO 19	Precipitación del trimestre más frío
	BIO 20	Número de meses consecutivos < 40mm precipitación

Posteriormente se definen los escenarios para el clima futuro, para lo cual se emplean los datos climáticos del IPCC (2014) correspondientes al RCP 6.0 (Van Vuuren et al., 2011). Esta serie de RCP's (2.5, 4.5, 6.0, y 8.5) se basan en distintos supuestos sobre el cómo se comportaría el hombre en diversos campos, tales como, el desarrollo industrial, el crecimiento económico y demográfico, las políticas públicas, entre otros; hasta el año 2100, siendo pues así el escenario 2.5 el más optimista y el 8.5 el escenario con mayor cantidad de emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Aquí fue escogido el RCP 6.0 por ser un escenario intermedio en la escala de RCP's que existen. En el momento de elaborar el informe no se esperaba que los escenarios pesimistas y optimistas se manifestaran, entonces un escenario intermedio parecía ser adecuado para guiar la adaptación. Los períodos escogidos para el análisis fueron 2030s (2020 – 2049), 2050s (2040 – 2069). Para el escenario RCP 6.0 están disponibles datos de 19 GCM (ver tabla 9). La resolución espacial fue reducida a 30 minutos de arco (aproximadamente 1 km² en la línea del Ecuador) utilizando el método Delta (Ramírez y Jarvis 2010). Este procedimiento calcula la diferencia entre los resultados del modelo para las condiciones actuales y futuras, interpola los datos a una resolución de 0,5 minutos de arco y el delta o diferencia resultante se agrega a los datos climáticos actuales de WorldClim (de resolución 30 segundos de arco ~ 1 km²). Los GCM individuales fueron tratados como escenarios independientes de igual validez.

Tabla 9. Lista de los modelos de circulación global (GCM) usados para modelar las condiciones de clima futuro

bcc_csm1_1	gfdl_cm3	ipsl_cm5a_lr	mri_cgcm3
bcc_csm1_1_m	gfdl_esm2g	miroc_esm	ncar_ccsm4
cesm1_cam5	gfdl_esm2m	miroc_esm_chem	ncc_noresm1_m
csiro_mk3_6_0	giss_e2_h	miroc_miroc5	nimr_hadgem2_ao
fio_esm	giss_e2_r	mohc_hadgem2_es	

Una vez los datos han sido procesados y ordenados, entonces se procede a la modelación. El método Random forest fue utilizado para clasificar cada píxel para las distintas zonas agroclimáticas, para tres distintas temporalidades de tiempo, línea base (1970 – 2000), 2030s (2020 – 2049), 2050s (2040 – 2069). Fue usado el paquete Random Forest (Liaw y Wiener 2002) en el software estadístico R (R Core Team 2014) que implementa el método RF. RF fue utilizado en dos aplicaciones distintas: (1) en una variación no supervisada para producir una medida de disimilitud para agrupar ubicaciones de ocurrencia en grupos con características climáticas similares, (2) al definir los grupos resultantes de (1) como variable de respuesta, RF permitió clasificar las capas de datos climáticos de condiciones actuales y futuras. Seguido se presentará mayor detalle de cada aplicación:

- a) La zonificación agroclimática es una herramienta comúnmente utilizada para identificar ambientes homólogos y para priorizar intervenciones. También se ha utilizado para investigar el impacto del cambio climático (Fischer, Shah y Van Velthuisen 2002; Bunn et al. 2015). Para este caso, fueron desarrolladas zonas climáticas mediante la identificación de clústeres (agrupaciones) con características climáticas similares en los datos de ocurrencia mediante RF clustering (Shi y Horvath 2006). El problema no-supervisado, de la agrupación de los lugares de presencia, puede convertirse en uno supervisado mediante el uso de etiquetas artificiales, para distinguir los datos originalmente no etiquetados de los datos sintéticos tomados de una distribución de referencia (Shi y Horvath 2006). De esta manera, RF produce una medida de disimilitud que usamos como insumo para el agrupamiento (clúster) jerárquico, en lugar de usar distancias euclidianas para generar agrupaciones biológicamente significativas. Esto tiene como ventaja la insensibilidad frente a la distribución, a menudo, bajo una distribución no normal de los valores climáticos y la multicolinealidad. Las reglas de predicción de RF son útiles incluso para las variables correlacionadas (Boulesteix et al. 2012), lo que significó que era posible utilizar todas las variables bioclimáticas para el clustering. El número de centros de clúster para el agrupamiento jerárquico se determinó mediante la evaluación de un dendrograma de clúster. Las descripciones de las zonas climáticas se basaron en las diferencias promedio para cada subgrupo de variables y sus intervalos de confianza calculados mediante el paquete multcomp de R (Bretz, Hothorn y Westfall 2010), en la altitud y en la distribución geográfica.
- b) RF se aplicó para clasificar los datos climáticos de El Salvador en zonas agroclimáticas para café, usando las 20 variables bioclimáticas (Tabla 8). Primero, RF fue entrenado con muestras aleatorias de píxeles de cada tipo de clima y una muestra aleatoria de píxeles de pseudoausencias en El Salvador, que no tenía el “café” como se describe más arriba. El proceso fue repetido utilizando diferentes filtros de reducción del sesgo geográfico en minutos de arco de 0,5 ", 1 ", 1,5 ", 2 " y 2,5".

Para cada modelo de RF, se construyeron 500 árboles de decisión con cuatro variables seleccionadas en cada nodo. Los árboles crecieron hasta un tamaño completo, siguiendo la recomendación de aumentar el número de árboles hasta estabilizar el error de predicción de las corridas independientes (Boulesteix et al. 2012). Para un proceso más sólido, se entrenaron 25 clasificadores de RF en una submuestra aleatoria del 80% del tamaño de la muestra total y se utilizó el 20% restante para hacer una validación cruzada. En el caso del filtro de 2,5 ", esto significa que utilizando 5 clúster el algoritmo se entrenó en 16 muestras de cada clúster y en 40 muestras de pseudoausencia (presencia de 80:40 para muestras de pseudoausencia). Usando un filtro de 0,5", se seleccionaron 240 muestras de cada clúster (grupo) y 600 muestras de pseudoausencia (Presencia 1200: 600 para muestras de pseudoausencia).

Los árboles de clasificación de los bosques individuales, para cada método de filtrado geográfico, se combinaron en un bosque con 12.500 árboles. Estos clasificadores fueron extrapolados en mapas de variables bioclimáticas. El resultado del clasificador es una matriz que, para cada celda de píxel, contiene el porcentaje de votos de las clases individuales. Como resultado, se obtuvieron mapas de cada tipo de clima de café, más sitios de segundo plano clase "0" en donde es poco probable que se cultive el café, asignando a cada píxel el valor de la columna con el voto más alto. Además, se generaron mapas de aptitud sumando los votos de todos los tipos de clima idóneos para cada píxel. El valor del porcentaje más alto de los votos se interpretó como acuerdo entre de los modelos.

El mapa de consenso, entre los métodos de filtrado, se construyó seleccionando el valor modal para los diferentes tipos de clima y la media para los mapas de aptitud y el acuerdo existente

entre los modelos. Los últimos se normalizaron de 0 a 1 antes de calcular la media. Los pasos se repitieron para todos los datos climáticos futuros. La zona idónea futura más probable fue determinada, para cada píxel, por el valor modal a través de los resultados para los 19 GCM. Los mapas de aptitud y los mapas de acuerdo son la media de las proyecciones individuales.

Para reflejar la incertidumbre de la clasificación en los mapas de las zonas agroclimáticas, fueron agregadas dos clases: “No clasificado” y “Limitaciones”. Los píxeles de “no clasificado” fueron clasificados en una de las zonas agroclimáticas. Sin embargo, tuvieron una concordancia de clasificación por debajo del quinto percentil en los píxeles de las presencias, es decir, hubo un porcentaje alto de votos para otras zonas, por lo que se concluyó que la clasificación de estos píxeles no fue unívoco. Los píxeles de “Limitaciones” fueron clasificados en la clase “no apto”, pero tienen valores de aptitud por encima del primer percentil en lugares de presencias. Por lo tanto, se trata de píxeles que probablemente no son idóneos para la caficultura, pero donde, sin embargo, se encuentran algunas fincas.

Finalmente, la distribución actual se validó utilizando tres métricas del área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés); a) la AUC multiclase (Hand and Till 2001) implementada en el paquete R “pROC” (Robin et al. 2011), b) una AUC de presencia / pseudoausencia dentro de El Salvador, y c) una AUC obtenido de una muestra de presencia / pseudoausencia de la producción de café Arábica en América Central (Bunn, Castro y Lundy 2017). El AUC asume valores 0 – 1, un AUC de 0,5 indica que el desempeño no fue más que un muestreo aleatorio, mientras que 1,0 es una clasificación perfecta. Esta definición de la medida de AUC se puede ampliar a problemas de multiclase promediando todas las comparaciones de AUC por pares a una sola AUC multiclase (Hand and Till 2001). Esta medida se usó para evaluar la discriminación de las zonas agroclimáticas hecha por el clasificador de RF.

Para conocer cuáles son las áreas idóneas y las que no lo son, se utilizó un umbral, el percentil 1% de los datos de presencia del café, es decir, al grupo de presencias se les identificó con valores por encima de 0,2 (según criterio experto). Entonces, fueron reclasificadas las capas de acuerdo con este umbral, zonas con valores menores a 0,2 serán consideradas como áreas no idóneas para el café (áreas con color crema), y zonas con valores por encima del umbral son idóneas, pero siendo mucho más apta las áreas para el café las que están más cercanas a 1,0, las cuales se representan con colores verdes oscuros.

Posteriormente se realizó la identificación del gradiente de impacto, para establecer los diferentes tipos de estrategias de adaptación: adaptación incremental, adaptación sistémica, transformación, oportunidades y resiliencia sistémica. Aquí la descripción de dichas zonas:

- Las zonas de **adaptación incremental** son sitios donde las condiciones climáticas cambiarán, pero no representarán una amenaza para la producción de café, aunque demandarán medidas necesarias para lograr una producción óptima.
- Las zonas de **adaptación sistémica** son aquellas donde se presentarán cambios en el clima, que aunque no se descarta la producción de café en el futuro, si se deben tomar medidas más complejas para adecuar el sistema de producción de café arábica frente a condiciones más adversas.
- Las zonas de **transformación** son áreas donde es más probable que el cambio en el clima conlleve a que la producción del cultivo sea inviable y la adaptación requerirá un rediseño del sistema de producción o la transformación a nuevos cultivos. Los habilitadores externos serán fundamentales para apoyar el cambio.
- Los lugares que no se clasificaron en cualquiera de las AEZ para las condiciones

actuales, sino en las condiciones futuras se denominan sitios de **oportunidad**, los cuáles son sitios donde actualmente no existen buenas condiciones para la producción de café arábica, pero en el futuro las condiciones serán favorables para producirlo.

- Por último, las zonas de **resiliencia sistémica** son las zonas en las hay una alta incertidumbre en la asignación de la aptitud por parte de los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés). Píxeles con una concordancia menor de 55% entre las clasificaciones, fueron clasificados así.

La Figura 5 se presenta el esquema metodológico seguido en el análisis previamente descrito:

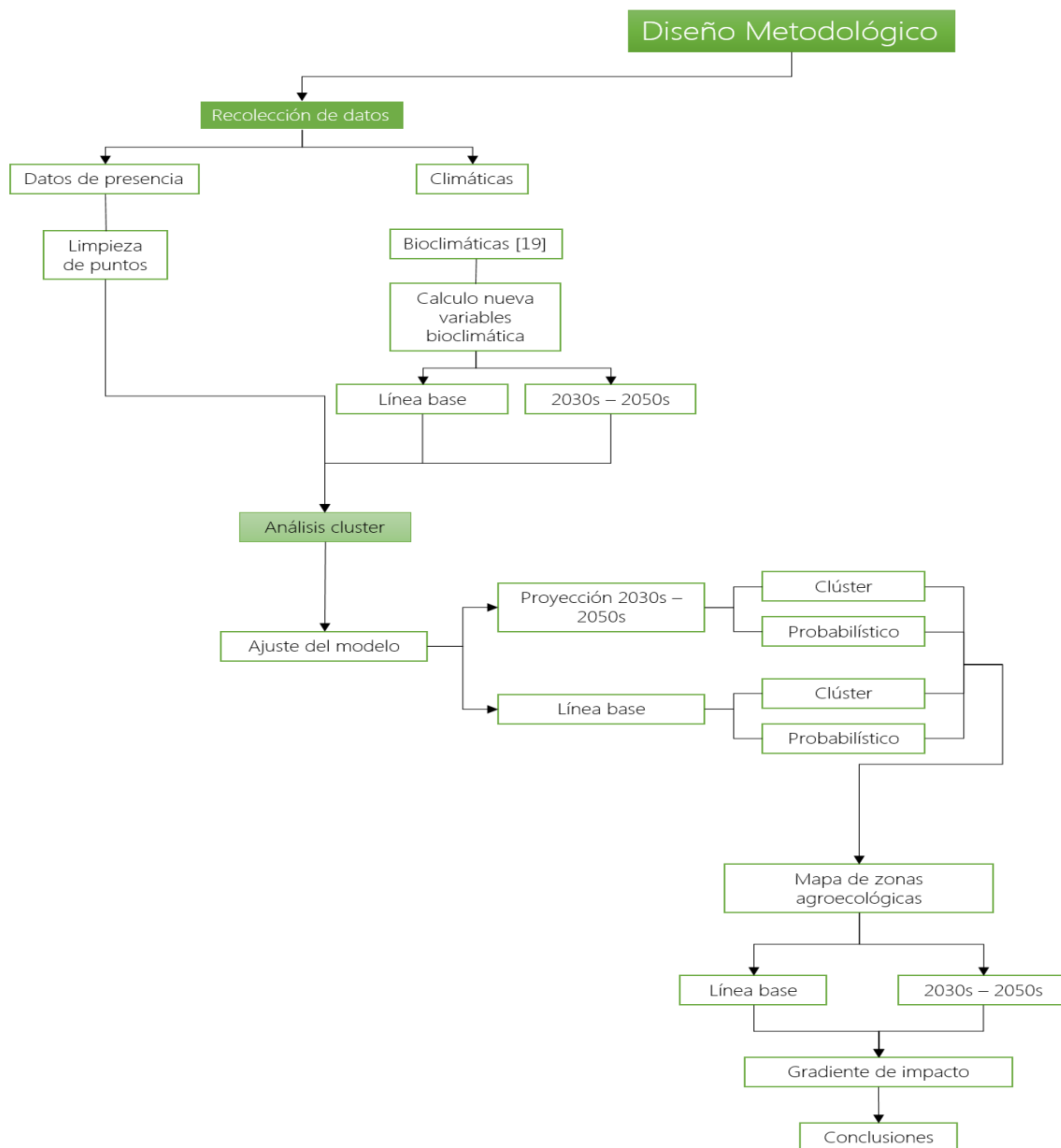


Figura 5. Diseño metodológico

4.2 Identificación participativa de prácticas y tecnologías de ASAC actuales y potenciales

Para la identificación de prácticas de adaptación, se realizaron consultas con científicos y técnicos que trabajan en el sector café en El Salvador. Para esto se realizaron dos talleres con técnicos de CENTA-café y adicionalmente se realizó un taller con productores. En cada taller con técnicos se realizó una presentación introductoria del estudio de exposición del café al cambio climático. El objeto es que los técnicos identifiquen prácticas de adaptación acordes con las amenazas identificadas para la producción de café. En cada taller se formaron de 6 a 8 grupos de trabajo tratando de dividirlos por cada nivel de exposición (rojo/transformación, amarillo/sistémica, verde/incremental). Al terminar las sesiones de discusión grupales, se priorizaron las medidas más importantes en cualquier etapa del cultivo que se consideran prioritarias. Luego se hizo una plenaria para presentar los trabajos en cada grupo.

4.3 Análisis costo – beneficio

El análisis costo – beneficio (ACB) requiere tener en cuenta los costos y beneficios generados por la adopción de las prácticas ASAC, también se requiere comparar con una línea base o estado actual para ser confrontada con escenarios de la implementación de prácticas ASAC. En ambos escenarios se identifican los beneficios de la adopción tecnológica involucrada en la adaptación de los productores para enfrentar el cambio climático.

Evaluación del escenario sin intervención.

Se realiza un análisis de la situación económica de los sistemas productivos y de las consecuencias del manejo de dichos sistemas productivos sobre los recursos naturales, antes de la introducción y adopción de las prácticas ASAC. Se establecen indicadores de rendimientos, ingresos y costos.

Evaluación del escenario con implementación de prácticas ASAC.

Con base en los resultados del modelaje de aptitud de café y los talleres con técnicos, se identificó una larga lista de medidas adaptación para disminuir los efectos negativos generados por el cambio climático para los diferentes gradientes de adaptación (Transformación, Adaptación sistémica y Adaptación incremental). De esta lista larga se priorizaron dos grupos de prácticas: renovación con variedades adaptadas a cada piso altitudinal y sistemas agroforestales. En el caso de prácticas de manejo de suelos, se espera que la renovación y establecimiento de nuevos sistemas se realizarán siguiendo un manejo sustentable de suelos basados en la fertilidad actual. Luego se priorizaron entre las prácticas específicas aquellas que podían tener más impacto en la adaptación, mitigación y productividad del café.

Estimación de flujos de caja y rentabilidad de los sistemas propuestos

Para continuar con el análisis de las medidas de adaptación al cambio climático, se realizó un ACB. Para obtener los indicadores del ACB se determinan los ingresos brutos y los costos que la medida de adaptación genera tomando como referencia los costos y precios de insumos encontrados en El Salvador, siendo la fuente técnicos de CENTA. Para cada medida, se asumió un periodo de ejecución de veinte años que corresponde a un ciclo de crecimiento de maderables (especies de heliófilas durables como cedro, caoba y laurel), se realizó la comparación entre costos y beneficios exclusivamente para este periodo. Para los propósitos de este estudio, se

recurrió a la literatura para estimar el crecimiento maderable de los sistemas, para así estimar los beneficios relevantes en el análisis.

En relación a los costos de los sistemas productivos se requiere información primaria acerca de los costos de producción tanto para la etapa de establecimiento como para la fase de mantenimiento, en términos de mano de obra empleada en la preparación del terreno, siembra, recolección, así como de los insumos utilizados (semillas, fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, transporte y otros). En este no han sido incluidos costos de herramientas y equipos, asistencia técnica, arrendamiento, intereses y otros costos indirectos. Con respecto a los costos de las prácticas de adaptación, fueron desglosados en costos de establecimiento o instalación y costos de mantenimiento, costos de recolección de la cosecha y costo de administración. Para obtener la información de costos e ingresos de las prácticas ASAC, se requirió información primaria que se obtuvo a través de entrevistas a técnicos y especialistas de CENTA-café.

Estimación de los indicadores de rentabilidad de las prácticas ASAC

El ACB en este caso, se ha utilizado para identificar las prácticas con mayor rentabilidad posible en comparación con las actuales prácticas (sin renovación de cafetales). Como resultado, se obtuvieron indicadores tales como el valor presente neto (VPN) y la relación beneficio-costos (B/C) de las medidas de adaptación al cambio climático, los cuales están sujetos a una tasa de descuento (TD). Además, se calculó la tasa interna de retorno (TIR) de cada una de las inversiones a las prácticas de adaptación por unidad de área (usamos la manzana como unidad de área por ser la que más se utiliza en El Salvador). El ACB se llevó a cabo con una tasa de descuento del 5% anual y adicionalmente se utilizó una tasa de 10%

5. RESULTADOS

5.1 Cambios de aptitud climática en áreas cafetaleras para 2030 y 2050

La sección de resultados comienza con una presentación de la definición de las zonas agroclimáticas y su distribución en El Salvador para los distintos periodos de tiempo, seguido de los resultados obtenidos a nivel probabilístico y luego se describen los resultados del gradiente de impacto.

Zonas agroclimáticas

Análisis del dendrograma de clustering jerárquico sugiere la presencia de 5 zonas agro-climáticas en la base de datos. El primer clúster presenta la mayor diferencia, en comparación con los demás, mientras los clústeres 2-5 fueron similares. Todos los clústeres tuvieron un tamaño similar, a excepción del clúster 4 el cual tuvo un tamaño mayor.

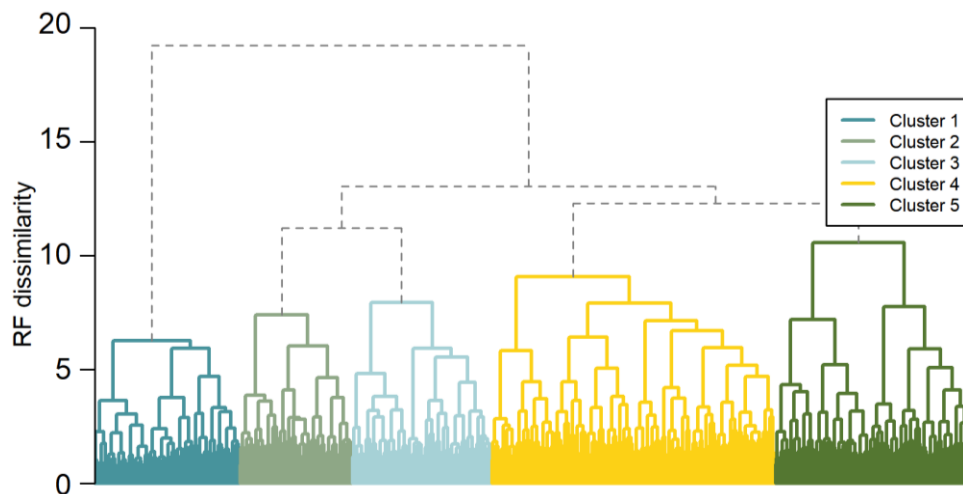


Figura 6. Dendrograma de clustering jerárquico usando disimilitudes de RF. Los colores indican los grupos finales.

Acorde con las pruebas estadísticas realizadas de ANOVA y los intervalos de confianza (Figura 6) se identificaron las diferencias entre cada clúster. Esto permitió estimar el tipo de clima que se encuentra en cada una de las zonas.

- Clúster 1 temperaturas altas durante el año y durante la época más seca. En comparación con los otros clústeres, la precipitación fue variable y en la época seca fue menor que el resto.
- Clúster 2: temperaturas y valores de precipitación cercanos al promedio de toda la muestra.
- Clúster 3: temperatura promedio alta, pero también, entre todos los clústeres el rango más alto de temperatura diaria. Durante todo el año, la precipitación fue más uniforme
- Clúster 4: temperaturas cercanas al promedio de todas las muestras, pero la precipitación anual fue menor que el resto de clúster.
- Clúster 5: temperatura más baja de todos los clústeres y la precipitación anual más alta.

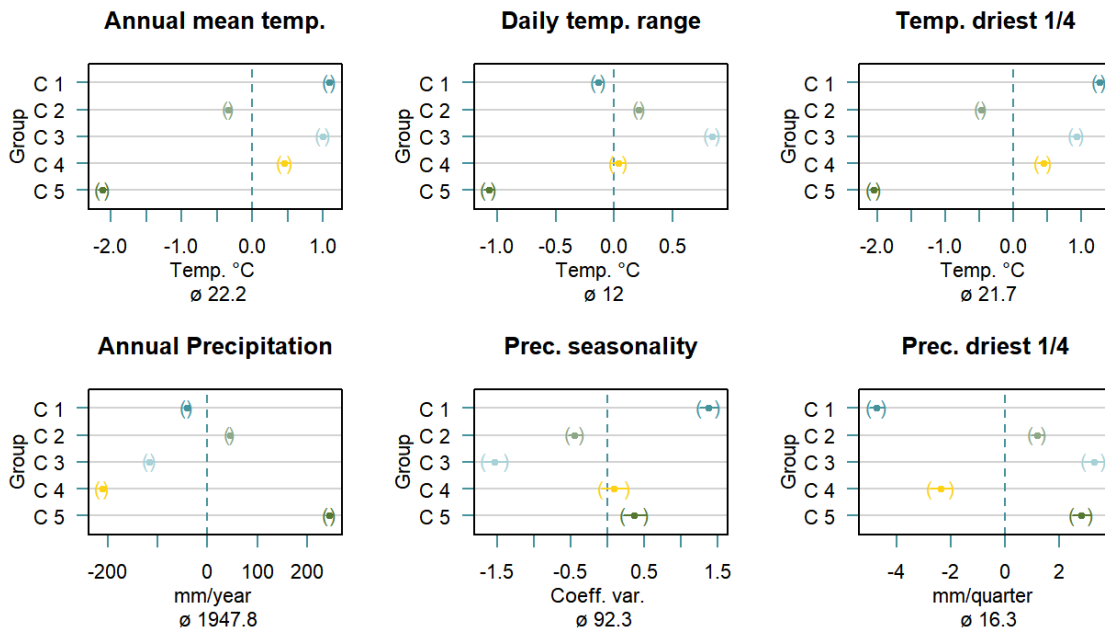


Figura 7. Contrast plots de las variables bioclimáticas. Colores representan los clústeres.

Para entender las diferencias de altura de los clústeres, se hizo un gráfico de densidad de los valores. Todos los clústeres cubren rangos amplios de altura. Clúster 1, 2 y 4 tienen su media en altitudes medianas mientras que clúster 3 tiene altitudes más bajas. Clúster 5 se encuentra principalmente sobre las mayores altitudes.

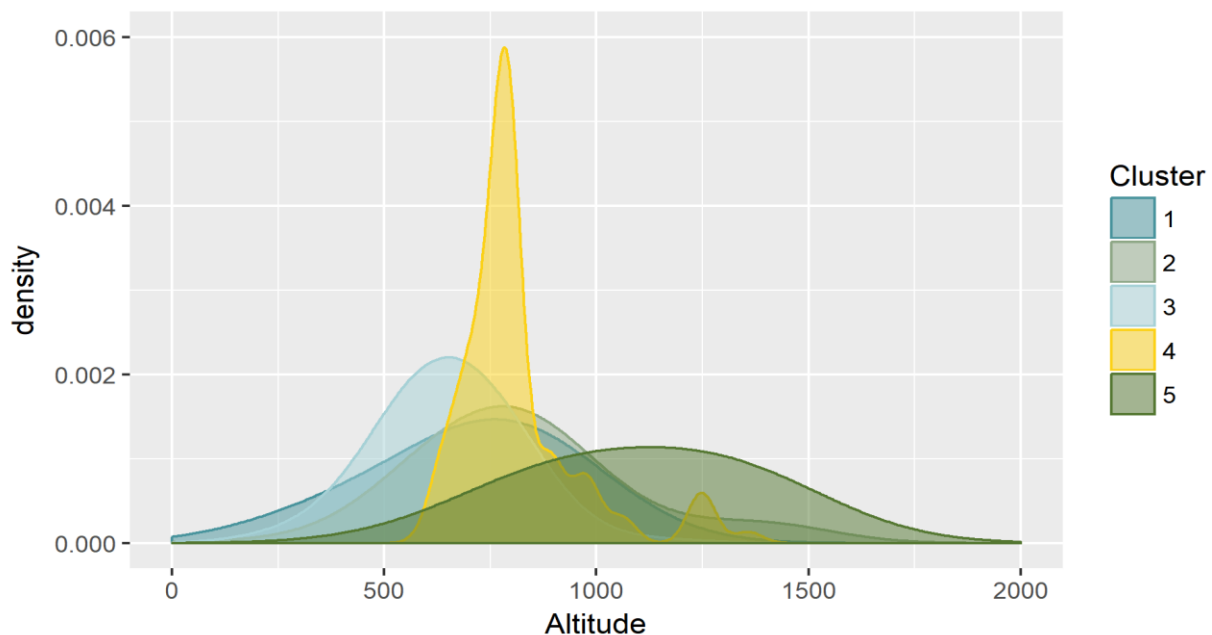


Figura 8. Gráfico de densidad de la distribución altitudinal de los clústeres. Colores indican los clústeres.

Adicionalmente, la distribución de los clústeres fue graficada espacialmente. Clúster 1 se encontraba al sur, en el lado del Pacífico de las cordilleras; clúster 2 en el Norte-Nororiente; clúster 3 en las zonas intermedias de las cordilleras; clúster 4 al Noroccidente, en los alrededores de Santa Ana y; clúster 5 en las partes altas de las cordilleras. La combinación de estos factores generó una descripción de las zonas climáticas según sus características.

Tabla 10 Características biofísicas de los clusters

Cluster	Altitud	Clima	Geografía	Nombre
1	Intermedio	Caliente-Variable	Pacífico	Medio-Cálido
2	Intermedio	Promedio	Nororiente	Medio
3	Bajo	Caliente	Interior	Bajo-Interior
4	Intermedio	Seco	Noroccidente	Medio-Seco
5	Alto	Frío-Húmedo	Cordilleras	Alto-Húmedo

Como comentario general, no se nota una clara diferencia en los valores de altura. Esto se debe al uso de las 20 variables bioclimáticas para el análisis de clúster. Metodologías alternativas usan una base de variables limitadas que son influyentes para las diferencias en los sistemas de producción según expertos. Adicionalmente a las 5 zonas agroecológicas se estimaron las zonas con limitaciones y las zonas no clasificados .

En cuanto a la evaluación de desempeño del modelo, se encontraron diferencias relacionadas con la ubicación geográfica (Figura 9). Usando un filtro de 30" con 5.230 puntos para entrenar el AUC para la clasificación de aptitud (presencia vs. Pseudo ausencia) tenía valores altos en todas repeticiones de entrenamiento. El AUC Multiclase igualmente tenía valores que indican un muy buen desempeño para diferenciar los 5 clusters más las pseudoausencias. El AUC de aptitud en Centro América en cambio tenía valores bajos con alta variabilidad. Unas repeticiones del entrenamiento resultaban en valores cerca de 0.5 indicando una clasificación no mejor que al azar. Con un mayor filtro geográfico se bajó el desempeño de la clasificación usando casos de El Salvador, pero se aumentó el desempeño de la predicción de áreas en Centroamérica. Dado este trade-off entre especificidad y capacidad de generalizar, se decidió emplear todos los modelos en conjunto.

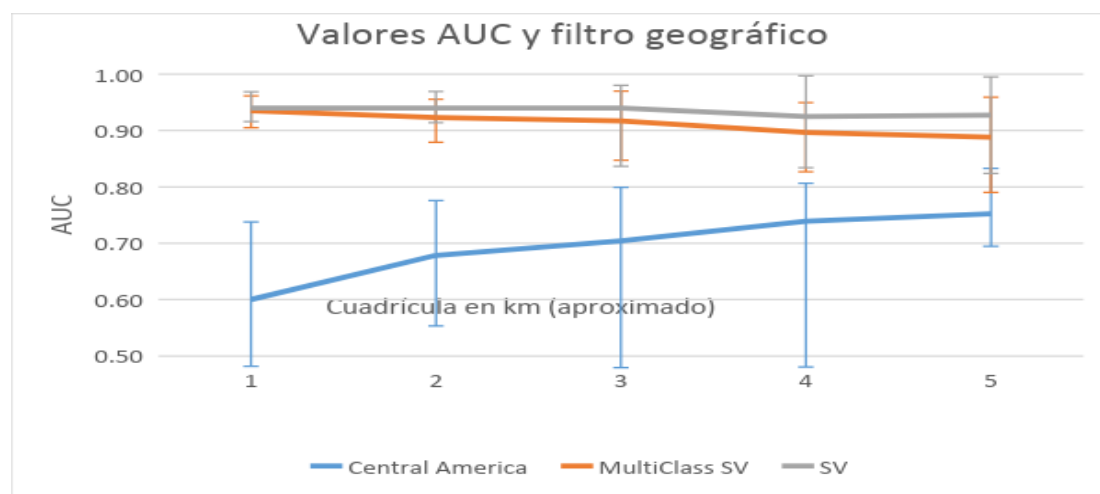


Figura 9. Valores AUC y filtro geográfico. Central America con datos fuera de El Salvador (azul), Multiclass El Salvador es el promedio del pairwise AUC (naranja), y la línea gris es el AUC de El Salvador de presencia vs pseudoausencia.

Distribución de zonas agroclimáticas

En la Figura 10 se ilustra el resultado para las zonas agroclimáticas para tres periodos de tiempo.

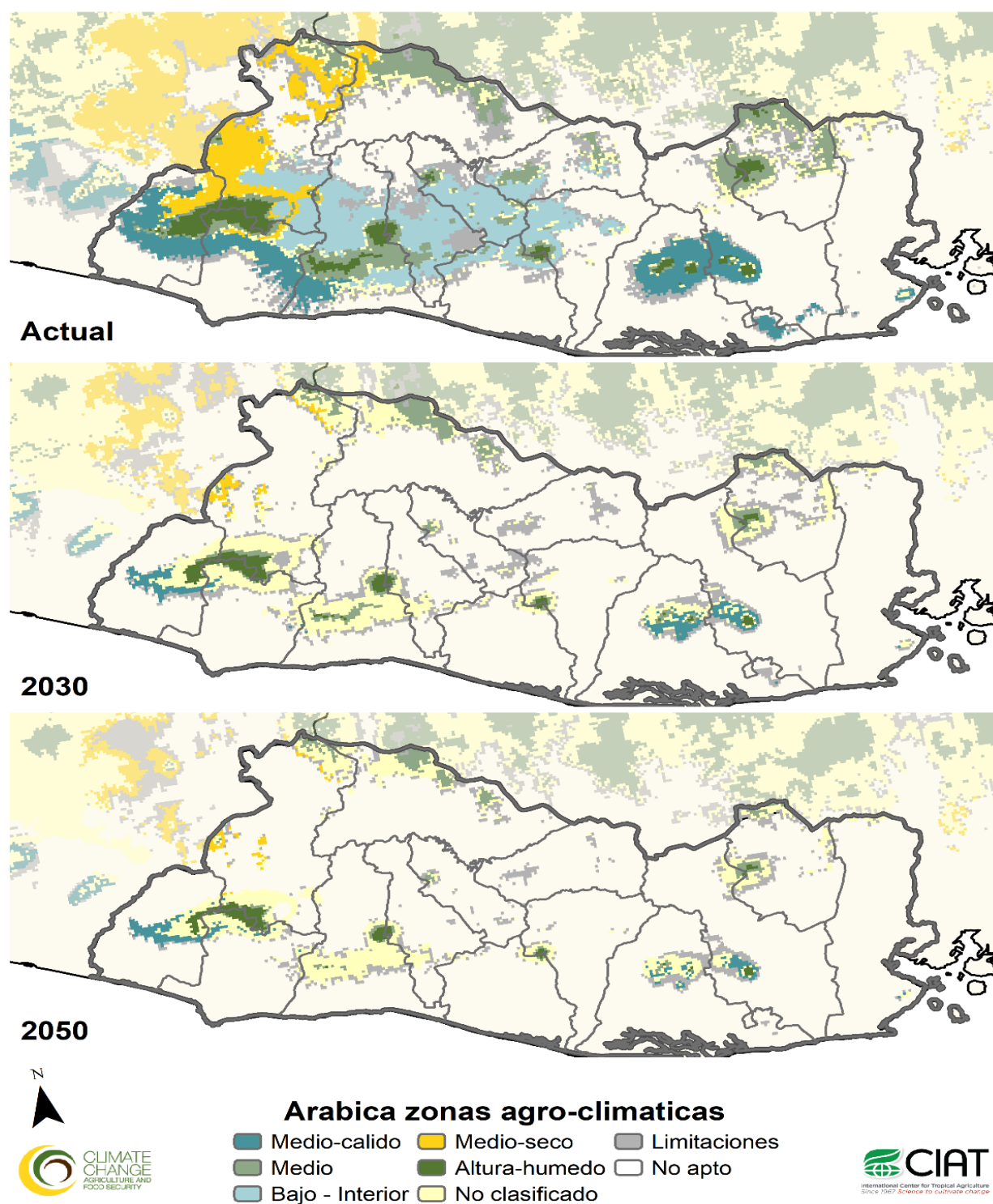


Figura 10. Zonas agroclimáticas para café bajo distintas temporalidades (línea base, 2030s, 2050s)

Para el clima actual, la clasificación reprodujo bien la distribución de las presencias y las pseudoausencias. Se notan grandes zonas agroclimáticas de los cinco tipos a lo largo y ancho de El Salvador, destacándose mayor aptitud en los departamentos de Sonsonate y la Libertad, y menor aptitud en la Paz y La Unión – al sur y este del país.

En cuanto a escenarios de cambio climático, los análisis presentan un gran cambio en las características de las zonas climáticas para los períodos 2030 y 2050, especialmente para las zonas bajas y medias, las cuales prácticamente cambian sus características de forma drástica. La zona clasificada como alta conserva en parte sus características, pero en un área limitada. No se prevé un cambio de categorías por otras, y en cambio, las zonas medias pasan en parte a un tipo de clima que no ha sido clasificado. Lo anterior indica que gran parte de esas condiciones climáticas donde se encuentra el café actualmente se perderán en el futuro, lo que supone todo un desafío en materia de adaptación.

En cuanto a incertidumbre derivada de los modelos, existen diferencias, pero en todos los casos los escenarios son desfavorables para el cultivo del café, sólo variando la intensidad de los efectos. Una comparación de la distribución bajo GCM con impactos optimistas, medias y pesimistas ejemplifica la incertidumbre de la proyección climática (Figura 11). En el GCM “Miroc_esm_chem” se observa una disminución dramática de las áreas potenciales para el café. Este escenario hasta el año 2050 resultaría en un incremento de temperatura por 2.6°C y un aumento de precipitación anual por 145mm. En el GCM “Fio_esm” se observa una reducción fuerte pero menos dramática de las áreas potenciales para el café. Este escenario hasta el año 2050 resultaría en un incremento de temperatura por 1.6°C y una reducción de precipitación anual por -180mm. El GCM “Mri_cgcm3” representa el menor impacto proyectado, ya que hasta el año 2050 resultaría en un incremento de temperatura por 1.2°C y un aumento de precipitación anual por 78mm. Las diferencias del impacto se pueden explicar en gran parte por el aumento de la temperatura.

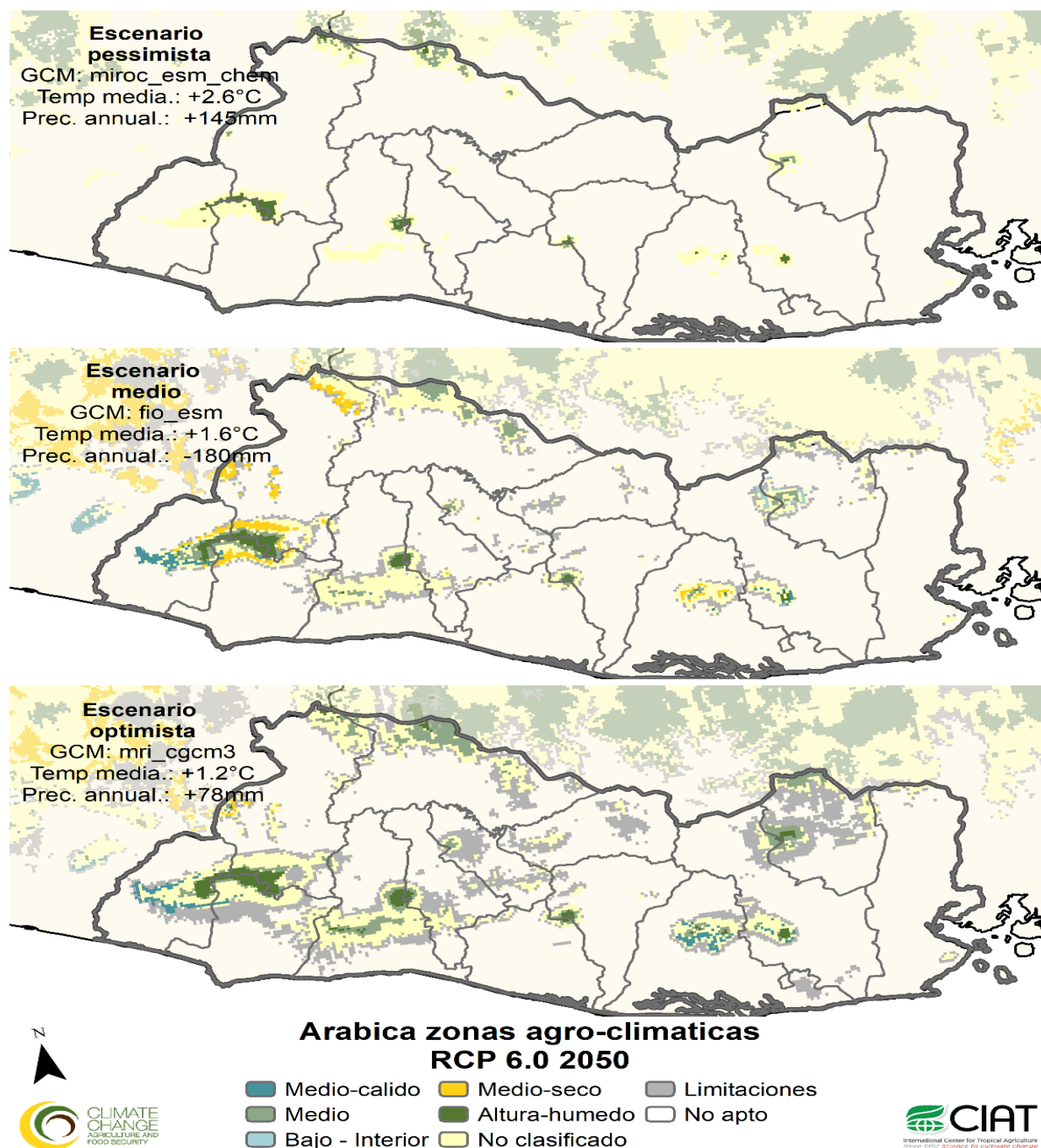


Figura 11. Distribución de zonas agroclimáticas en 2050 del escenario RCP 6.0 en GCM con impactos pesimistas, medias, optimistas.

Distribución de aptitud climática

Las zonas más aptas¹ bajo la línea base o clima actual (Figura 12) se localizan en Sonsonate, La Libertad, Usulután, San Miguel y departamentos localizados al oeste de El Salvador; de otro lado, el departamento que no registra aptitud es La Unión –apenas unos cuantos píxeles en el

¹ Los resultados de tipo probabilístico están en el rango desde 0 (no apto) hasta 0,98 (excelente aptitud climática).

Norte de este departamento con aptitud muy baja.

Con el escenario de cambio climático para 2030 y 2050 se puede observar una reducción considerable de las áreas aptas para la producción de café, especialmente en aquellas zonas que están relacionadas con las categorías altas y bajas de la clasificación climática actual. Los resultados de la modelación muestran que prácticamente las zonas aptas para la producción de café se reducirían a las partes más altas de las montañas de El Salvador.

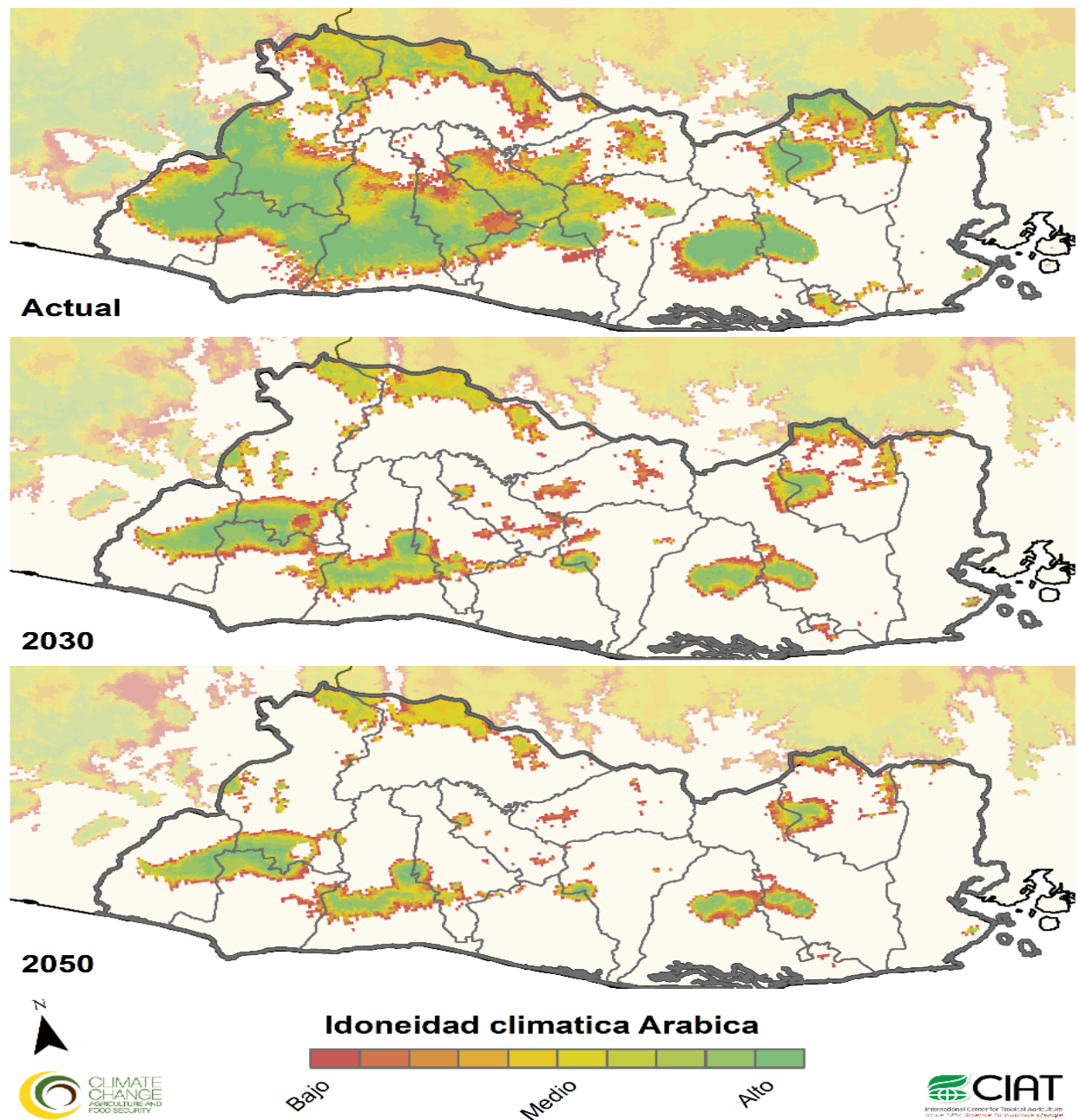


Figura 12. Zonas aptas tipo probabilística

Gradiente de impacto

La sobreposición de las zonas agroclimáticas entre los distintos periodos dejó como resultado el gradiente de impacto, aquí se presentan los distintos tipos de cambios. Estos resultados sugieren que habrá una gran área impactada negativamente sobre la aptitud del café, los mayores impactos se verán hacia el 2050s, donde las zonas de transformación se amplían considerablemente principalmente en el centro del país, departamentos como Cuscatlán, San Vicente, y Cabañas; algo para recalcar, es que las zonas de adaptación incremental se sitúan principalmente en dos zonas, una entre Usulután y San Miguel, mientras que la segunda zona se ubica en la cordillera Apaneca – Ilamatepec, entre los departamentos de Ahuachapán, Santa Ana y Sonsonate.

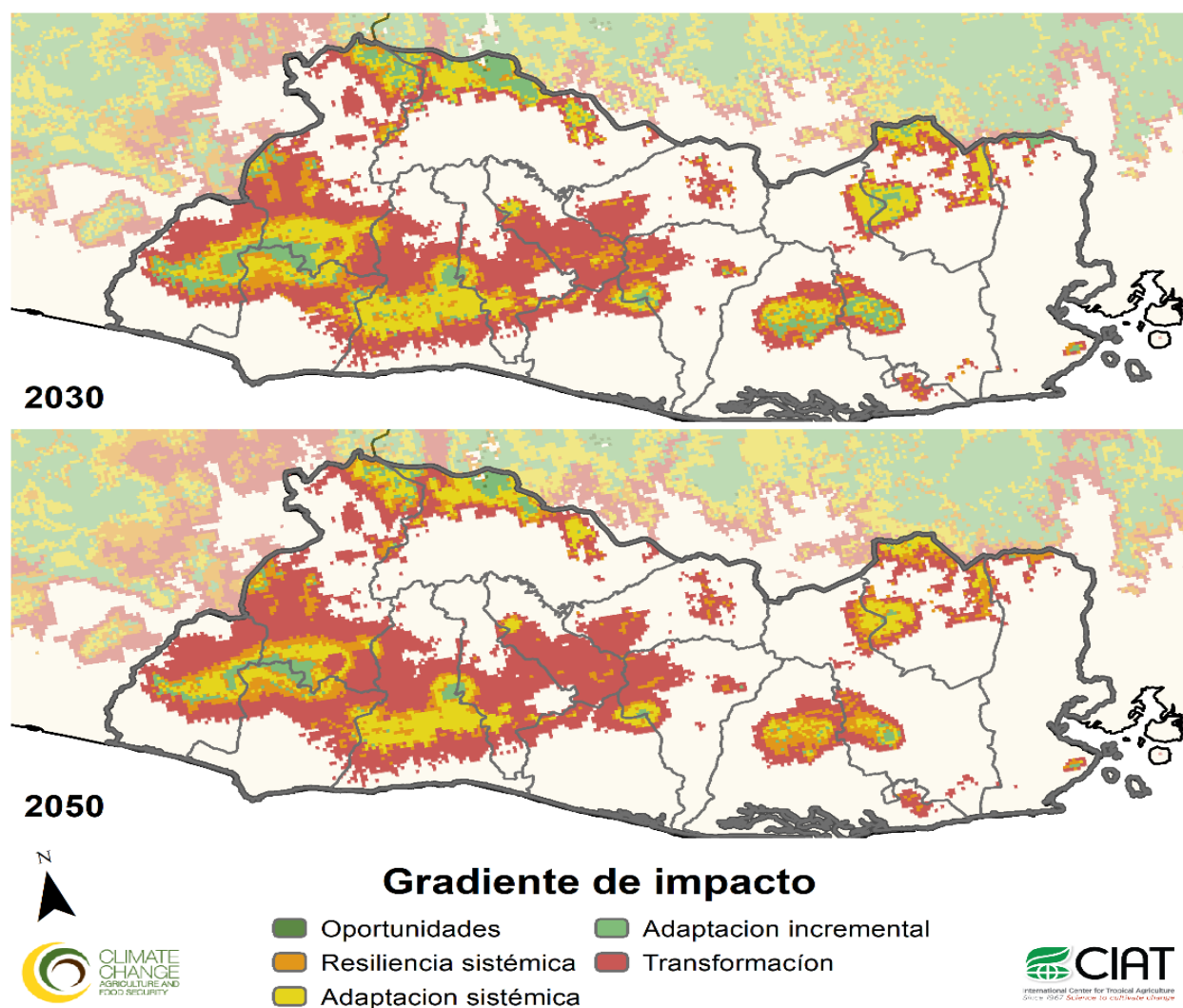


Figura 13. Gradiente de impacto

5.1.1 Impacto de los gradientes en las fincas actuales

CENTA-Café ha realizado un muestreo de 10,584,584 parcelas de café para la caracterización de la fertilidad de los suelos en áreas sembradas con Café en El Salvador. Con base a estos puntos georreferenciados, estimamos que bajo el modelaje actual no tenemos fincas no aptas para el cultivo de café actualmente. Para el año 2030, aproximadamente 20% de las fincas estarán en el área de transformación (área que supone que necesitaran una adaptación transformativa, por lo que requerirá un rediseño del sistema de producción o la transformación a nuevos cultivos), mientras que para el año 2050 el porcentaje de fincas en el área de transformación aumenta a 30%. Mientras 18% de las fincas se mantendrán en áreas con una adaptación incremental (que requiere menores esfuerzos de adaptación y corresponde a áreas de mayor altitud) para el 2030 y siendo el porcentaje de fincas en esta área solamente 8% para el 2050 (Figura 14 a, b). Esto indica que para el 2030, 80% de las fincas estarán en áreas aptas para el cultivo, pero para el 2050 solamente 70% de las fincas estarán en áreas aptas. Dado el tamaño de la muestra de puntos y la cobertura en las diferentes regiones cafetaleras, esto podría representar la realidad del sector café en el país ya que la muestra representa un 50% de las fincas cafetaleras.

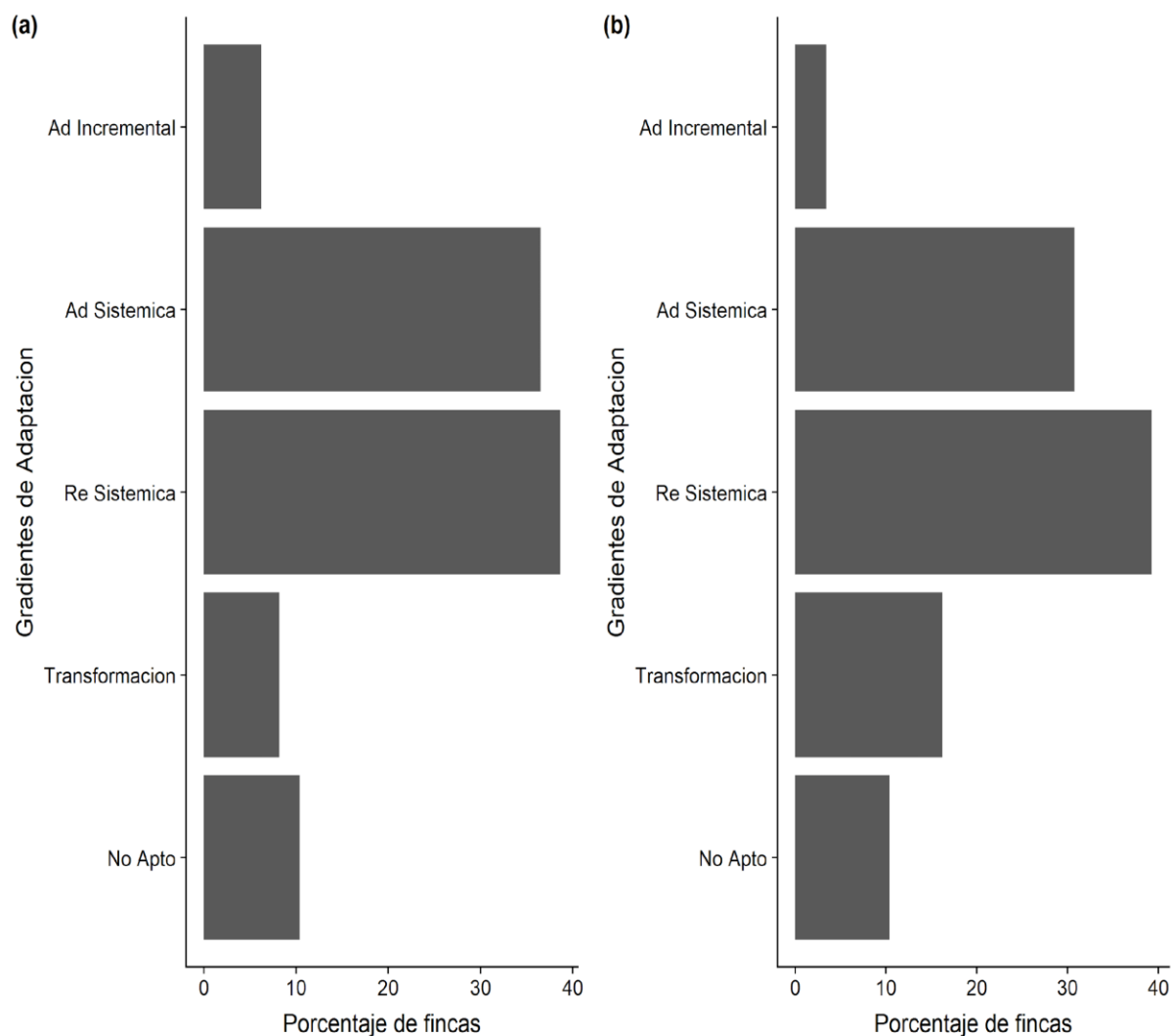


Figura 14. Porcentaje de fincas en cada gradiente de adaptación para escenarios de RCP6.0 para los años 2030 (a) y 2050(b). Ad Incremental = Adaptación incremental, Ad Sistemica = Adaptación sistémica, Re Sistemica = Resiliencia sistémica.

5.2 Identificación participativa de prácticas y tecnologías de ASAC actuales y potenciales

En general nueve diferentes amenazas de cambio climáticos fueron identificados. El aumento de la temperatura y la reducción o variabilidad de la precipitación fueron las más importantes que impactaría la producción de café de acuerdo con los técnicos de CENTA-Café. En las tres zonas de gradiente de impacto el aumento de la temperatura parece ser la amenaza de mayor impacto percibido y esperado. Sin embargo, en las zonas de adaptación incremental (con menor impacto de cambio climático) los síntomas que más se mencionaron son reducción de la fertilidad y aumento de vientos. Mientras en las otras zonas (que necesitan mayor transformación del sector) se identificaron aumento de temperatura y variabilidad de temperatura como las amenazas más importantes, lo que significa que mientras en las zonas más altas (Adaptación incremental) existen otras amenazas para la producción de café, en las zonas más bajas (Adaptación sistémica y Transformación) las preocupaciones de los técnicos se concentran en mantener la aptitud climática del cultivo contra el efecto de cambios en la temperatura y la precipitación (Tabla

11).

Tabla 11. Identificación de los principales síntomas de cambio climático por cada una de las zonas de gradientes de impacto, de acuerdo a la percepción de los técnicos de CENTA-café.

Zona de café o gradiente de Impacto	Síntoma de cambio climático	Frecuencia de respuestas de técnicos de CENTA-Café
Transformación	Aumento de temperatura	9
	Inadecuada Precipitación	8
	Aumento de sequía	6
	Exceso de lluvia	4
Adaptación sistémica	Aumento de temperatura	14
	Variabilidad climática	10
	Aumento de viento	4
	Desertificación	3
Adaptación incremental	Aumento de temperatura	8
	Aumento de sequía	4
	Exceso de lluvia	4
	Pérdida de fertilidad	4
	Aumento de viento	2
	Aumento de riesgo	1

5.2.1 Prácticas priorizadas por gradiente de impacto

En la Tabla 12 se muestran las prácticas priorizadas por los técnicos de CENTA-Café para cada nivel de impacto. Las prácticas que se mencionaron por los técnicos de CENTA trataron de ser específicas por cada gradiente. Estas prácticas muestran a groso modo los esfuerzos necesarios más probables para adaptarse a cambio climático en cada área de impacto de cara a cambio climático. En general los técnicos y especialistas de CENTA identifican tres grandes medidas de adaptación en las tres áreas: manejo de sombra, uso de variedades tolerantes (a roya, a caída de frutos y alta temperatura) y manejo de suelos (conservación de suelo y manejo de la nutrición), así como otras medidas menos frecuentes.

Esta priorización de los técnicos es consecuente con lo encontrado en la literatura acerca de las necesidades de los sistemas agroforestales en la región: manejo de las especies forestales (sombra, madera, frutales y fijación de nitrógeno), manejo y conservación de suelo (reservas de carbono, productividad y biodiversidad) y manejo de plagas y enfermedades, considerando los impactos recientes de la roya.

Tabla 12 Prácticas priorizadas por técnicos de CENTA-Café por zona de gradiente de impacto en El Salvador.

Transformación		Adaptación sistémica		Adaptación incremental	
Práctica	Frecuencia	Práctica	Frecuencia	Práctica	Frecuencia
Aumento de sombra	4	Aumento de sombra	6	Conservación de suelos	6
Diversificación	4	Conservación de suelos	5	Uso de variedades tolerantes (T, roya)	6
Uso de variedades tolerantes (T, roya)	4	Uso de variedades tolerantes (T, roya)	3	Aumento de sombra	4
Conservación de suelos	3	Nutrición de planta	3	Cortinas rompeviento	2

Nutrición de planta	3	Aumentar densidad de café	2	MIP	2
Cosecha de agua	3	Cortinas rompeviento	2	Nutrición de planta	1
Renovación de café	2	Abono Orgánico	1	Cobertura	1
Abono Orgánico	1	Cosecha de agua	1		
Drenaje	1	Estratificar sombra	1	Cosecha de agua	1
		Manejo integrado de plagas	1		
Fungicidas	1	Uso de cobertura	1	Incorporar MO	1
Renovación de sombra	1			Renovación sombra	1
Riego en zonas específicas	1				

En la zona de transformación, el aumento de sombra es la práctica que ha sido mencionada con mayor frecuencia, adicionalmente la diversificación es mencionada como una medida prioritaria. Estas dos medidas fueron mencionadas con mayor frecuencia y se relacionan con manejo de sistemas agroforestales, por lo que la estrategia más clara en la zona de transformación (que está principalmente ubicada en el bajo) se relaciona con **sistemas agroforestales más diversificados** (a base de Musáceas, Frutales y Maderables). La siguiente práctica priorizada en la zona de bajo, fue el establecimiento de **variedades tolerantes** (principalmente a alta temperatura y enfermedades). También se mencionan conservación de suelos y manejo de nutrición como medidas de adaptación, ambas medidas pueden ser agrupadas como **manejo de suelos** en general. La conservación de suelos, se menciona como medida principal contra el riesgo de aumento de sequía en la zona baja. Cabe mencionar que, para la zona baja, los técnicos han mencionado con mayor frecuencia medidas de cosecha de agua y riego en áreas localizadas. Aunque para las otras zonas, se menciona cosecha de agua, es en la zona baja que se menciona con mayor frecuencia, además riego es mencionado solamente en la zona baja (Transformación).

En la zona de adaptación sistémica (zona intermedia), la medida más importante que se menciona es el aumento de sombra, aunque no se menciona si este aumento de sombra es con una mayor diversificación de los sistemas. Los técnicos mencionan que las especies arbóreas para este aumento de sombra deberían ser leguminosas (generalmente del género *Inga* que han sido usadas como sombra tradicionalmente), por lo que puede haber oportunidades de incorporar especies de mayor valor. A diferencia de la zona de bajo, la segunda medida de adaptación identificada por los técnicos fue la conservación de suelos. Si agregamos que los técnicos han mencionado también el manejo de nutrición el manejo de suelos parece ser de mucha prioridad para esta zona. La tercera práctica de importancia que ha sido mencionada son las variedades tolerantes (al aumento de temperatura y enfermedades).

En la zona de adaptación incremental (zona alta), por otro lado, el manejo de suelos (conservación de suelos y manejo de la nutrición) ha sido la medida de mayor prioridad. El uso de variedades tolerantes (sobre todo a roya y otras enfermedades) se menciona como la segunda medida de prioridad, mientras la tercera medida corresponde a aumento de sombra. Sin embargo, en esta zona se menciona el manejo integrado de plagas como otra de las medidas prioritarias, esto se relaciona con el hecho que los técnicos han mencionado un aumento enfermedades (principalmente roya) en las zonas altas. Pareciera ser que las prácticas

priorizadas en la zona alta se relacionan con mantener o aumentar productividad (manejo de suelos y control de enfermedades), mientras en las zonas intermedias y bajas, las medidas priorizadas se enfocan mayormente mantener la actividad del café en la zona, así como diversificar ingresos (aumento de sombra y mayor diversificación).

Sistemas agroforestales diversificados

La adaptación natural del café a la sombra ha sido siempre un argumento que ha favorecido el desarrollo y mantenimiento de las prácticas agroforestales en la producción de café (Beer et al., 1997; DaMatta, 2004; Leon, 1998a, b; Muschler, 2004). Así, esto representa una oportunidad para el desarrollo de sistemas agroforestales diversificados para la generación de mayores y más diversificados ingresos. En la actualidad, muchas de las especies usadas como sombra pertenecen a la familia Fabaceae (leguminosas de servicio) debido a la capacidad de fijación biológica de nitrógeno, de ahí que el componente arbóreo de los sistemas agroforestales de café en El Salvador está dominado típicamente por tres especies del género *Inga*, comúnmente llamados pepetos. Especies como pepeto de río (*Inga vera*), pepeto negro (*Inga punctata*) y pepeto peludo (*Inga oerstediana*) son las especies más típicas de los sistemas de café en El Salvador. Con la excepción de Costa Rica donde *Erythrina poeppigiana* es la especie de árbol más abundante en los SAF de café, el género *Inga* ha sido usado predominantemente como árbol de sombra en sistemas de café en el resto de Mesoamérica.

Se menciona comúnmente que los estratos de sombra en cafetales pueden facilitar el crecimiento del cultivo (supresión de malezas, modificar microambiente, mejorar la fertilidad, e incrementar calidad) y diversificar los productos comerciales (Beer, 1987; Beer et al., 1997). En los talleres con los técnicos de CENTA-Café, la influencia de la sombra sobre el microclima ha sido la mayor por la cual se sugiere un aumento de sombra. Sin embargo, la diversificación siempre ha sido un argumento para la promoción de sistemas agroforestales de café más diversos donde el mercado juega un rol crítico en el mantenimiento de las especies del estrato de sombra (Mcneely and Schroth, 2006). No obstante, los sistemas agroforestales actuales en Centroamérica tienen una configuración con pocas especies con alto valor comercial ya sea como maderables o frutales.

En esta medida de adaptación se pretende que los sistemas agroforestales incorporen especies arbóreas de mayor valor para los productores para la generación de ingresos, por ejemplo, maderables y frutales (Musáceas y cítricos). En este sentido, los sistemas agroforestales de café a base de maderables y banano, además de tener potencial para la conservación de la diversidad arbórea y otros servicios eco sistémicos generan ingresos adicionales para los productores. En la mayoría de los casos la venta de Musáceas provenientes de cafetales a intermediarios es indicada como la segunda fuente en importancia para generación de ingresos después del café en otros países como Honduras y Nicaragua. Dos factores principalmente hacen de las musáceas un componente de sombra para la mayor generación de ingresos, una especie de rápido establecimiento y a la vez una continua producción e ingreso a lo largo del año. Los maderables por otro lado representarán un ingreso fuerte a largo plazo.

Especies maderables como Nogal (*Juglans olanchana*), Cedro (*Cedrela odorata*), Laurel (*Cordia alliodora*), Caoba (*Swietenia humilis*), coyote (*Platymiscium pinnatum/parviflorum*), granadillo (*Dalbergia retusa/glomerata*) y Genizaro (*Samanea saman*), pueden ser usados en sistemas agroforestales con café, basados en la disponibilidad de semilla y la adaptación de especies a la zona de café. En general estas especies tienen un alto valor maderable y presentan una amplia distribución y rango de adaptación. Solamente dos especies al parecer presentan una distribución limitada, el nogal es una especie más restringida a las zonas altas que podría establecerse en estas. Por otro lado, la caoba del pacífico podría ganar aptitud climática en zonas

medias (y algunas zonas altas) con cambio climático y presentar un mayor rango de distribución.

Renovación y establecimiento con variedades adaptadas

La utilización de variedades tolerantes a alta temperatura o a roya es otra de las medidas de adaptación que fue priorizada por los técnicos de CENTA. Adicionalmente se han mencionado la renovación y la rehabilitación de cafetales, ya que ambos están relacionados parece pertinente mencionar que la medida de adaptación se debe relacionar con la renovación y establecimiento de cafetales con variedades más productivas y tolerantes a estrés (biótico y abiótico). La **renovación de cafetales**, deberá ser clave para esta medida de adaptación, ya que solamente 25% de las parcelas de café tienen una edad menor a 10 años (según la base de datos de CENTA sobre análisis de suelos y descripción de cafetales), mientras que las plantaciones con edad mayor a 20 años corresponden a aproximadamente 50% de los datos. Esto significa que en parte la baja productividad (y susceptibilidad a roya) de las plantaciones, se deben al agotamiento de las plantaciones debido a la edad (mayores a 20 años). En este sentido, CENTA-Café ha probado tener la infraestructura y el personal técnico-científico para proveer material vegetal de variedades mejoradas (al menos variedades tolerantes a roya). En los últimos tres años, CENTA-Café ha comenzado un plan de renovación de cafetales utilizando principalmente variedades de catimor. Por otro, lado variedades resistentes a la roya del café (catimores) parecen mostrar una mayor tolerancia a stress hídrico y posiblemente más tolerante a altas temperaturas. Esto puede ser explicado por tener genes de café robusta (*C. canephora*). La Tabla 13, muestra las variedades disponibles en El Salvador y su aptitud para las diferentes zonas de gradientes de impacto, así Cuscatleco, Catisic, Pacas y Costa Rica-95 son las variedades más importantes para la zona baja e intermedia (gradiente de Transformación y Adaptación Sistémica). Mientras, Pacamara, Bourbon, Anacafe14 y Costa Rica-95 fueron mencionadas como las variedades más aptas para las zonas altas (Adaptación incremental).

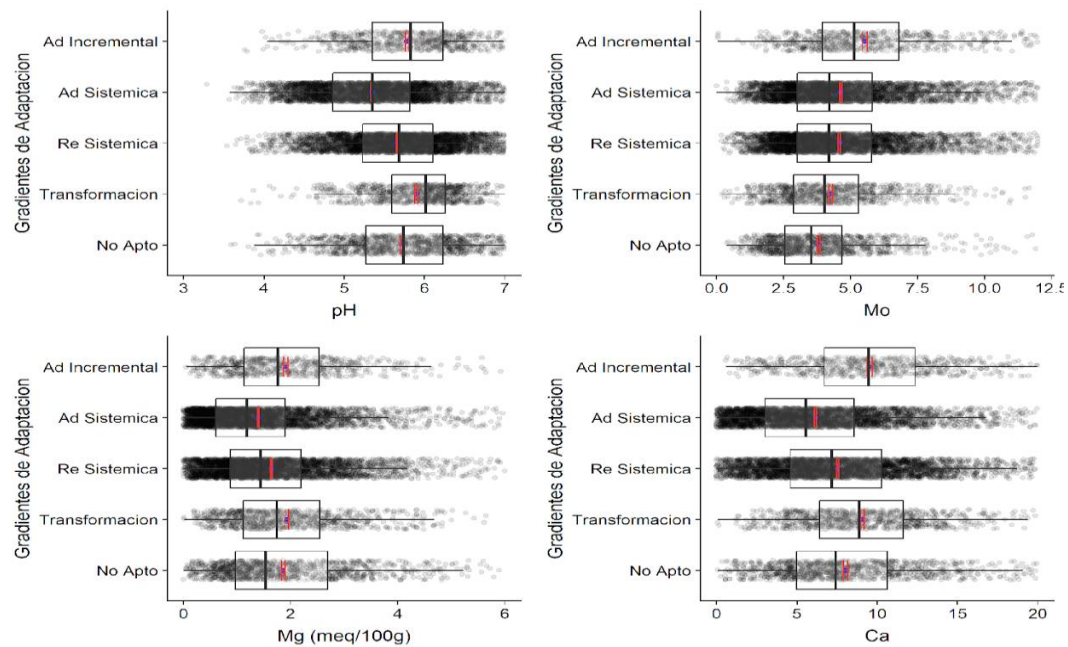
Tabla 13. Variedades de café que han sido mencionadas por los técnicos de CENTA-Café, como aptas para cara una de las zonas del gradiente de impacto.

Transformación		Adaptación sistémica		Adaptación incremental	
Práctica	Frecuencia	Práctica	Frecuencia	Práctica	Frecuencia
Cuscatleco	13	Cuscatleco	13	Pacamara	17
Catisic	12	Catisic	11	Bourbon	9
Pacas	8	Costa Rica-95	11	Anacafe14	7
Costa Rica-95	5	Pacas	6	Costa Rica-95	6
Sarchimor	5	Catimor	4	Geisha	5
Catimor	3	Sarchimor	4	Marsellesa	3
Catuai	3	Bourbon	3	Tekisic	3
Sampacho	3	Catuai	3	Pacas	2
Robusta	2	Icatu	2	Catisic	1
		Anacafe14	1	Catuai	1
		Marsellesa	1	Colombiano	1
		Tekisic	1	Cuscatleco	1

Manejo de la fertilidad del suelo

La baja productividad de café de los pequeños productores continúa siendo una preocupación entre las organizaciones de cafetaleros. A pesar que la baja productividad depende de varios factores; el cambio climático, brotes de enfermedades y deficiente manejo de suelo, son identificados a menudo por los productores y técnicos como los factores más importantes que reducen rendimientos. Los costos de fertilización representan el costo de producción principal, solamente después de la cosecha. Por lo que, aumentos de los precios de combustibles (y por

consiguiente de los fertilizantes) o reducción de los precios de café conllevan a menudo en una reducción parcial o total de la fertilización. Las limitantes de suelos son similares en las diferentes gradientes de altitud; ya que a pesar que hay mucha variabilidad en la fertilidad de suelos, hay pocas diferencias en los diferentes parámetros de fertilidad con respecto a los gradientes de adaptación (Figura 15). Por otro lado, los productores que usan fertilizantes sintéticos (productores convencionales) han tratado mejorar su fertilización con base en análisis de suelos. Sin embargo, hay pocos técnicos capacitados en la interpretación de análisis de suelos que ayuden efectivamente al desarrollo de una fertilización más eficiente y rentable. Por lo tanto, mejorar el manejo de la fertilidad de suelos sigue siendo una medida importante de adaptación en las diferentes zonas.



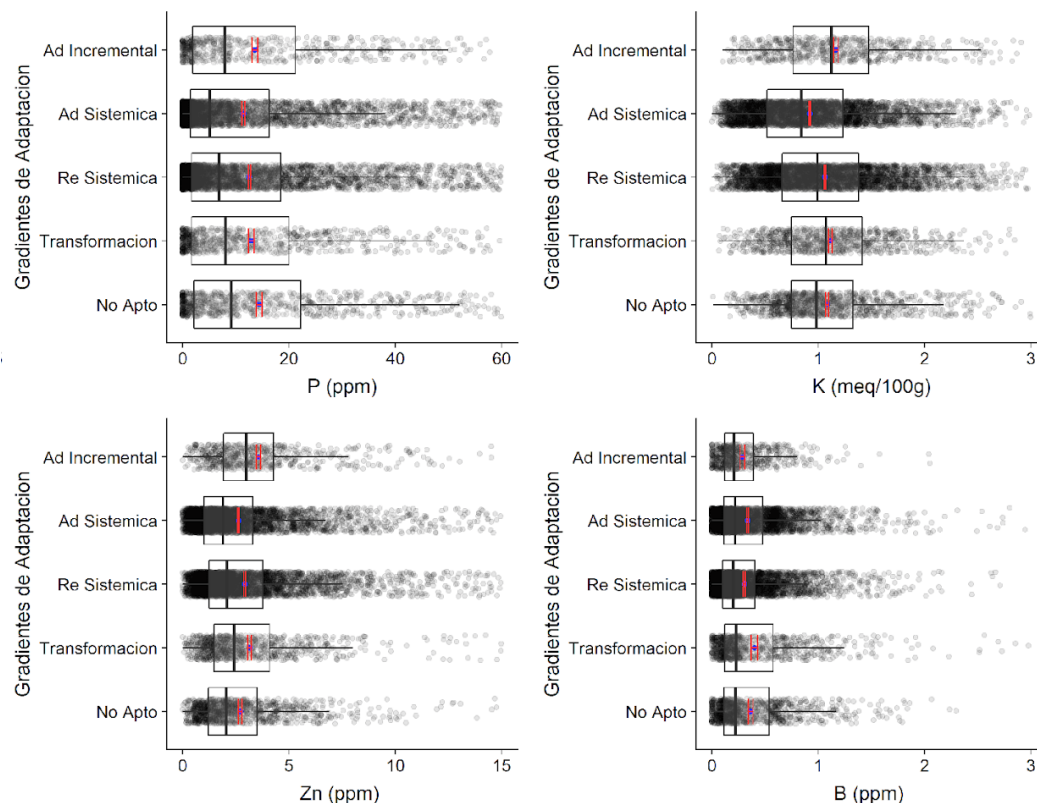


Figura 15. Nivel de diferentes parámetros de fertilidad de suelos (pH, MO, P, K, Ca, Mg, Zn, B) por las diferentes gradientes de impacto. Basado en datos de CENTA Café

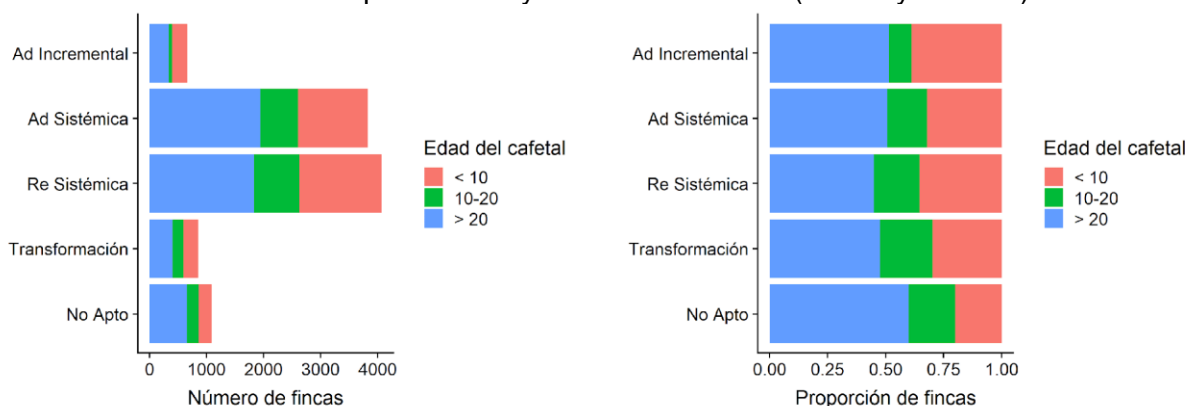
Análisis costo – beneficio

Práctica de renovación de cafetales con variedades tolerantes

La **renovación de cafetales**, deberá ser clave como medida de adaptación, ya que solamente 25% de las parcelas de café tienen una edad menor a 10 años (según la base de datos de CENTA), mientras que las plantaciones con edad mayor a 20 años corresponden aproximadamente a un 50% de los datos (Figura 16). Esta tendencia es independiente de los gradientes de adaptación (relacionados con la altitud), a pesar que los cafetales situados a menor altitud muestran menor proporción plantaciones jóvenes. Así, la baja productividad y susceptibilidad a roya de las plantaciones son debidas al agotamiento atribuido a la edad de las plantaciones y al ser establecidas hace más de 20 años con variedades susceptibles a roya. En general, las plantaciones viejas (>20 años) se encuentran distribuidas en toda la zona cafetalera, aunque las zonas cafetaleras de Chalatenango y Morazán, muestran tener mayor concentración de parcelas con edades menores a 10 años (Anexo 2).

La utilización de variedades tolerantes a roya (y en cierta medida a mayor estrés hídrico) es una de las medidas priorizadas después de la consulta con los técnicos y el análisis de la edad de plantaciones. Adicionalmente, la práctica de variedades tolerantes no debe estar desligada de la renovación y la rehabilitación de cafetales, ya que ambos están relacionados. De esta forma la medida a la que le será estimado el costo-beneficio será la renovación y establecimiento de

cafetales con variedades más productivas y tolerantes a estrés (biótico y abiótico).



De la lista larga de potenciales variedades priorizadas por gradiente de adaptación, ha sido seleccionado un grupo más reducido que presenta desde niveles medios a altos en cuanto a calidad en taza (<https://varieties.worldcoffeeresearch.org/es/info/catalog>). De las variedades priorizadas para la renovación solamente la variedad Catísic (Catimor) presenta un bajo potencial en taza. Las variedades de Sarchimores (Cuscatleco, Marsellesa y Parainema), así como el Anacafe 14 (Catimor), presentan un potencial intermedio de calidad en taza. Mientras que las variedades priorizadas para la zona incremental, como el Tekísic (un Borbón mejorado) y Pacamara (Pacas X Maragogipe) presentan un alto potencial en taza, pero a la vez susceptibilidad a roya, por lo que deben plantarse en los sitios de mayor altitud y acompañado de un manejo integrado de plagas y enfermedades.

Tabla 14. Lista priorizada de variedades por gradiente de adaptación.

Transformación y Resiliencia sistémica	Adaptación sistémica	Adaptación incremental
Variedades priorizadas	Variedades priorizadas	Variedades priorizadas
<p>Sarchimores: Cuscatleco (>700 msnm) Marsellesa (>700 msnm) Parainema (>700 msnm)</p> <p>Catimor: Catísic (700-1300 msnm):</p> <p>San Pacho</p>	<p>Sarchimores: Cuscatleco (>700 msnm) Marsellesa (>700 msnm) Parainema (>700 msnm)</p> <p>Catimor: Catísic (700-1300 msnm) Anacafe 14 (>900 msnm)</p> <p>San Pacho</p>	<p>Borbón: Tekísic (>1000 msnm)</p> <p>Pacamara (>1000 msnm)</p> <p>Catimor: Catísic (700-1300 msnm) Anacafe 14 (>900 msnm)</p>

Flujo de caja y ACB de la práctica de renovación con variedades tolerantes a roya

En este primer escenario, se midió el impacto de la medida de adaptación que provee solamente renovar plantaciones con variedades tolerantes a roya. el impacto que tiene esta práctica es un aumento de producción por el cambio de variedad. En este caso, la renovación de plantaciones viejas (>20 años) están dominadas en un 60% por Bourbon y Pacas en un 30%, dejando solamente un 10% de otras variedades (Anexo 3). En este sentido son dos efectos de esta medida de adaptación, aumento de productividad por la menor edad (ya que el café tiene su

máxima productividad a edades entre los cuatro a siete años) y reducción de susceptibilidad a roya.

Los supuestos de este análisis económico de rentabilidad son:

Para el escenario sin renovación se considera que los sistemas productivos predominantes actuales tienen baja productividad y para efectos del análisis, se ha fijado en 10 oro qq/mz correspondiente a un 15% mayor a los reportados en 2016. Bajo este manejo se realiza una sola fertilización y un solo control de malezas, por lo que los costos de producción son menores para el análisis. El costo de jornal es tomado como el oficial (US\$ 8.12/jornal) para El Salvador; la recolección de café tiene un costo de US\$1.62/arroba (US\$ 32.4/qq cosechado).

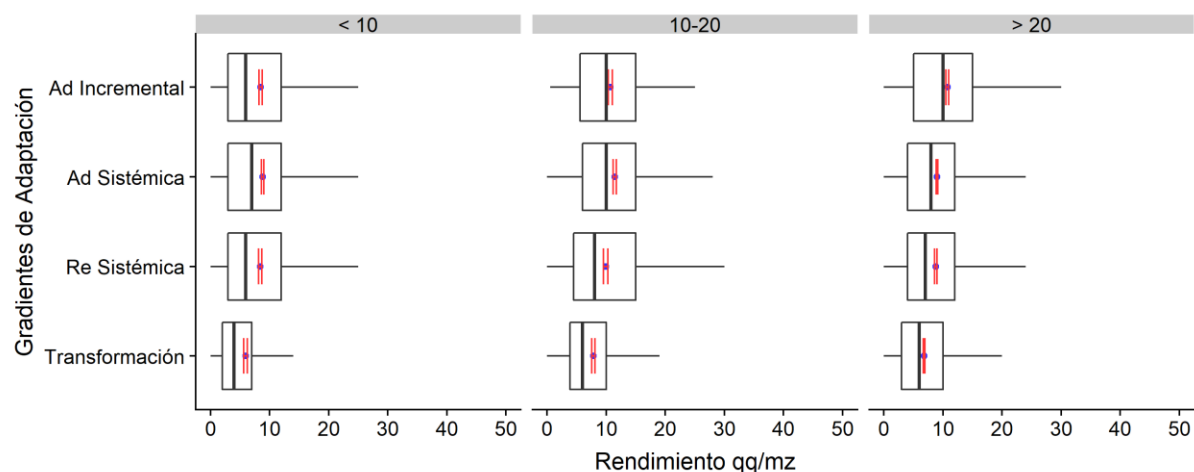


Figura 17. Rendimiento de café para el año de 2016 en parcelas de productores a diferentes edades de la plantación y gradientes de adaptación, fuente datos de CENTA-café.

Para la renovación de café, se estima que se manejará una densidad de 2.800 plantas/mz (2,5m de distancia entre cada línea y 1m de distancia entre las plantas). Adicionalmente se realizarán dos aplicaciones de fertilizante al año y fertilizaciones foliares de micronutrientes que los análisis han mostrado ser deficientes (Anexo 4). El horizonte de tiempo del análisis es de 20 años (para ser comparable con las otras prácticas, especialmente que involucran maderables), considerando que el ciclo de producción del cultivo de café es de 8 años, y que después de esta edad se puede estabilizar la producción con podas adecuadas hasta completar 20 años.

Tabla 15. Indicadores de rentabilidad a nivel de parcela de la medida de adaptación de renovación de café con variedades tolerantes y manejo adecuado de fertilizantes y manejo integrado de plagas.

	Escenario sin renovación (1 mz)	Escenario con renovación de sistemas con Inga en zona Intermedia (1mz)
TIR (5%)		19%
VPN (5%)	1,189.88	3,472.33
Relación C/B (5%)	1.10	1.19
VPN (10 %)	812.87	1,598.75
Relación C/B (10 %)	1.10	1.15

Los resultados de la evaluación financiera a nivel de parcela de la renovación de café, con manejo adecuado de fertilizantes y manejo integrado de plagas indican que la adopción de esta práctica tendrá un impacto favorable en la rentabilidad para el productor. El indicador de Valor Presente Neto (VPN) es positivo y oscila entre US\$ 3.472 y 1.599 para una tasa de descuento de 5 y 10%, respectivamente. Comparando este resultado con los datos del escenario sin renovación, se observa que la medida de adaptación al cambio climático tiene un excedente económico. Sin embargo, se nota que aun con un aumento del rendimiento de café se mantienen bajos ingresos a nivel de la familia ya que los beneficios permanecen bajos (Figura 18 y Figura 19). Con la renovación se logra aumentar los beneficios por encima de US\$ 1.000/mz en los primeros años de la plantación, sin embargo, los altos costos de mano de obra por cosecha reducen la rentabilidad.

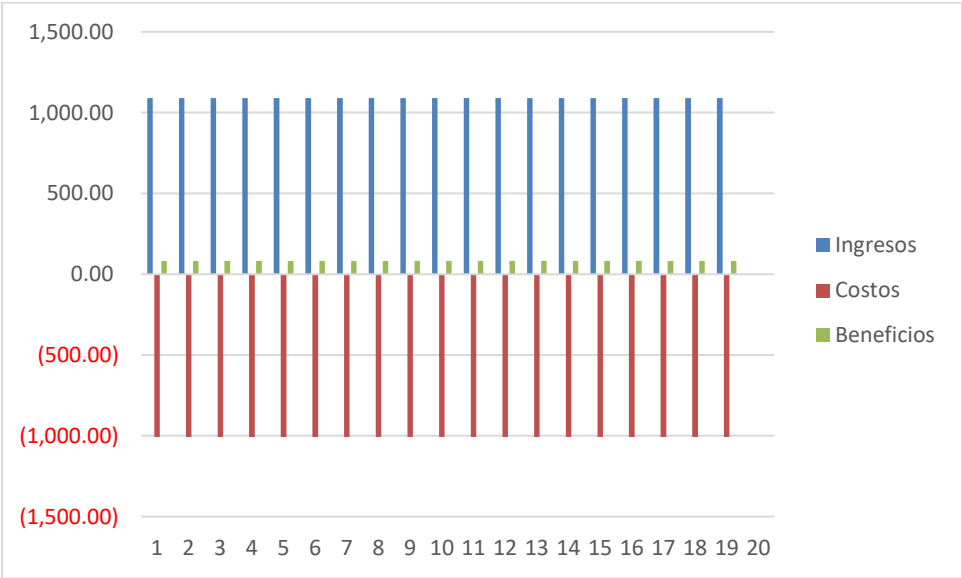


Figura 18. Flujo de ingresos y costos de sistemas de café actuales con una media de rendimiento de 10 qq oro/mz por 20 años.

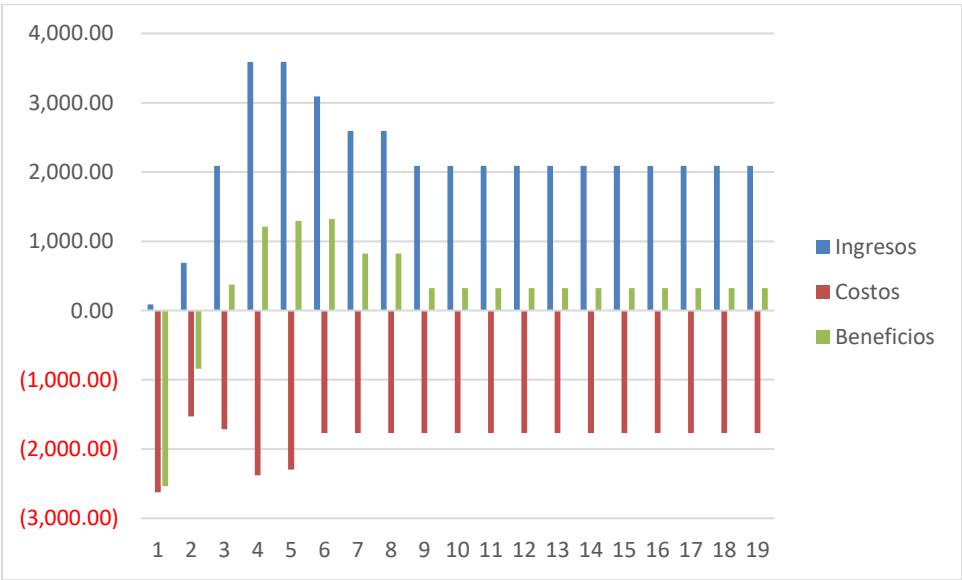


Figura 19. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra de Inga en zonas intermedias (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).

En el escenario con renovación de café, se observa adicionalmente un aumento en los costos, estos costos se mantienen altos aún después de los 10 años de edad de la plantación, debido principalmente a mano de obra. En el caso de las familias que realizan la cosecha de sus propias fincas, generarían ingresos como resultado del uso de su propia mano de obra, pero por otro lado, si contratan mano de obra externa generaría empleos e ingresos en los vecinos dentro de las comunidades.

Los costos desglosados para el escenario de plantaciones sin renovación se muestran en la tabla 16. Bajo condiciones de baja rendimiento el costo total anual (incluyendo cosecha) es US \$994.5; los costos mayores se relacionan a mano de obra, tanto el costo de cosecha de café que representa el 35% del costo total, mientras el costo de mano de obra de otras labores representa aproximadamente otro 35% del costo de producción. Es este escenario suponemos dos fertilizaciones al año, ya que los datos de CENTA muestran que plantaciones sin fertilización o una fertilización presentaron rendimientos menores a 10 qq/mz (anexo 15).

Tabla 16. Costos desglosados de mantenimiento de plantaciones sin renovación con un rendimiento promedio de 10 qq/mz.

Mano de obra		Jorn	Costo	Costo/mz
Podas de cafetal		4	8.12	32.48
Manejo de sombra permanente		6	8.12	48.72
1er control malezas en forma manual		8	8.12	64.96
2° control de maleza (manual)		6	8.12	48.72
1er deshije		4	8.12	32.48
1 era. Fertilización al suelo (tradicional)		3	8.12	24.36
1 era. Fertilización foliar - prefloración		2	8.12	16.24
2 da. Fertilización foliar - postfloración		3	8.12	24.36
Control de enfermedades		3	8.12	24.36
Mantto. De calles y cercos		3	8.12	24.36
Caporal de cultivo		1	8.12	8.12
				349.16
Insumos	Cantidad	Unidad	Precio	Costo/mz
Formula 12-05-18	3	Dólares / sacos de 220 lbs.	35	105
Urea (sacos)	2	Dólares/saco 150 lb	28	56
Altos 10-sl	0.25	Dólares / litro	45	11.25
Metalosato de boro	0.6	Dólares / litro	12	7.2
Beauveria bassiana	1	Dólares/lb	5	5
Metalosato de zinc	0.7	Dólares / litro	12	8.4
Transporte de insumos/otros insumos		Costo total		5.70
				198.55
Costo recolección				

Recolección	10	Dólares/qq oro	32.4	356.4
Costo total de operaciones				904.11
Imprevistos 10%				90.411
Costo total				994.5

Los costos de renovación del primer año con sistemas agroforestales con Ingas se presentan en la tabla 14. El costo total del primer año es US \$ 2619 (los costos de los tres primeros años se presentan como anexo en un archivo Excel), en este el costo principal corresponde a insumos, ya que el costo de plantas de café representa el mayor porcentaje. Mientras el costo de establecimiento de la sombra corresponde solamente a US\$ 150.

Tabla 17. Costos desglosados de renovación de un sistema agroforestal con Inga que mantenga un rendimiento de 20 qq de café oro/mz.

Mano de obra		Jorn	Costo	Costo/mz
Limpia de terreno para siembra		5	8.12	40.6
Deliniado y estaquillado		2	8.12	16.24
Aplicación de enmiendas (encalado)		3	8.12	24.36
Ahoyado en cafetal		25	8.12	203
Siembra de plantas de cafetos		17	8.12	138.04
1er control malezas en forma manual		8	8.12	64.96
2 do. Control de maleza (manual)		6	8.12	48.72
Control de maleza (químico)		3	8.12	24.36
Control de plagas y enfermedades		3	8.12	24.36
Fertilización orgánica al suelo		4	8.12	32.48
Fertilización en siembra de plantas		3	8.12	24.36
1 era. Fertilización foliar		3	8.12	24.36
2 da. Fertilización foliar		3	8.12	24.36
Mantto. De calles y cercos		3	8.12	24.36
Caporal de cultivo		8	8.12	64.96
Obras de conservación de suelos		2	8.12	16.24
				795.76
Insumos	Cantidad	Unidad	Precio	Costo/mz
Bocashi	38	Dólares /qq	3	114
Formula 12-05-18	3	Dólares / sacos de 220 lbs.	35	105
Urea (sacos)	2	Dólares/saco 150 lb	28	56
Metalosato multimineral	1	Dólares / litro	12	12
Metalosato de zinc	1	Dólares / litro	12	12
Metalosato de boro	1	Dólares / litro	12	12
Cal agrícola	7.5	Dólares/quintal	2	15
Altos 10-sl	0.25	Dólares / litro	45	11.25
Difusores brocap	24	Unidades	0.18	4.32

Planta de café	2800	Dólares / planta	0.231	646.8
Transporte planta de café (vivero de finca)	2800	Plantas	0.15	420
Transporte de insumos/fertilizantes	8	Dólares/saco	1	8
Transporte de insumos/otros insumos		Costo total		18.71
				1435.08
Costo siembra de sombra				
Planta de árbol (vivero de finca)	100	Dólares / planta	0.35	35
Transporte planta de árbol (vivero de finca)	100	Dólares / planta	0.15	15
Siembra de plantas de arboles	100	Dólares / planta	0.5	50
Otros gastos de establecimiento				50
Costo total de establecimiento de sombra				150.00
Costo total de operaciones				2380.84
Imprevistos 10%				238.1
Costo total				2619

Sistemas agroforestales diferenciados por gradiente de adaptación

El café presenta características de una planta tolerante a la sombra con bajos valores de puntos de compensación de luz (15 a 20 mmol/m²/s) y bajos valores de saturación de luz (500 y 900 mmol/m²/s para hojas aclimatadas a la sombra y hojas a pleno sol, respectivamente), así como fotoinhibición a altos valores de radiación, especialmente bajo condiciones limitantes de agua y nitrógeno (da Matta and Maestri, 1997; Franck, 2005).

La sombra de 40-70% está en el rango aceptable para el café de acuerdo con muchos estudios (Beer et al, 1998, Muschler, 1998, Vaast et al, 2005). Sin embargo, se propone una sombra de 50%, ya que no representa una reducción fuerte en la producción sobre todo en condiciones sub-óptimas para el café y presenta todas las ventajas ecológicas para el cultivo (ciclaje de nutrientes, microclima, diversificación). En Costa Rica, la producción de café en una zona óptima (1.200 m.s.n.m. y suelos fértiles) presentó una reducción de producción de solamente 10% bajo la sombra de 50% con *Inga densiflora* en 7 años de evaluación (Siles et al, 2010). Así mismo, una sombra de 50% representa una reducción en la temperatura máxima de hasta 3oC (promedio 2,2oC), mientras una sombra de 75% puede reducir la temperatura de aire dentro de la plantación hasta en 4,5oC con promedio de 3,1oC (Siles et al 2010, Siles et al 2013).

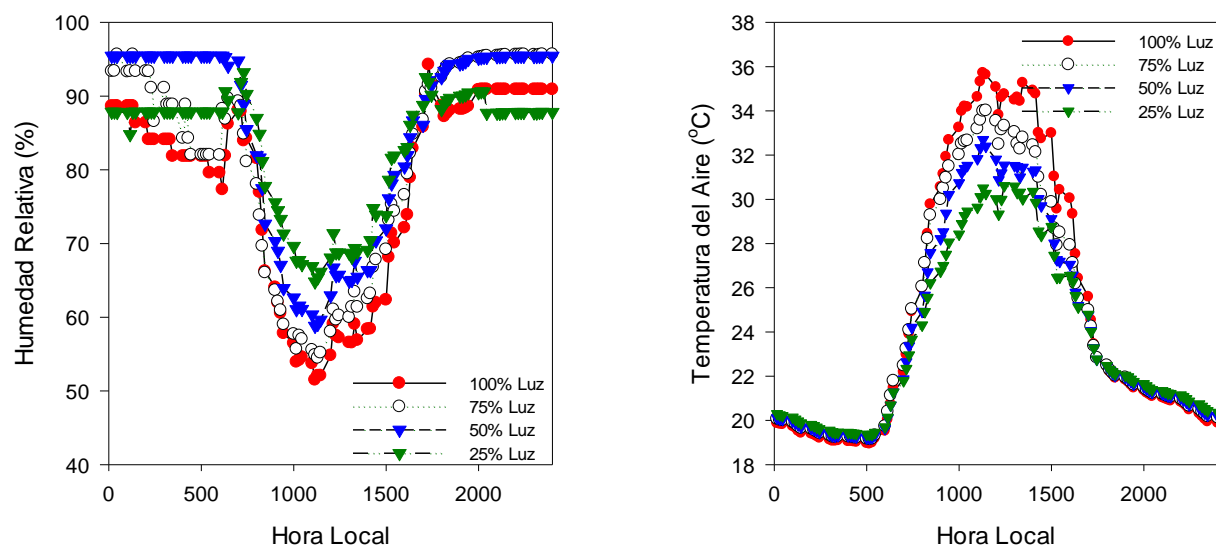


Figura 20. Temperatura y humedad relativa bajo sistemas agroforestales de café con banano con diferentes niveles de sombra (datos no publicados, pero recopilados para la publicación Siles et al 2013).

Así, para los diferentes gradientes de adaptación se pretende adaptar sistemas agroforestales con un límite de sombra de 50%, pero con una composición diferente:

Las fincas en menor altitud (en el gradiente de transformación y resiliencia sistémica) generalmente presentarán menor potencial producción de café (zonas marginales de producción y calidad), por lo que se proponen sistemas agroforestales diversificados, ya que estas zonas tendrán potencial para la diversificación de otros productos. El banano, por ejemplo, tendrá un ciclo de producción más corto (debido a una mayor temperatura) y podría ser manejado para mayor productividad y calidad, especialmente con sistemas con una distribución adecuada de las plantas en la plantación (franjas de cultivos) y el número adecuado de tallos/mata. En este sistema se podrán incorporar otros cultivos que aporten a la generación de ingresos (cítricos o jocote corona).

Las fincas a mayor altitud (gradiente de adaptación incremental) priorizarán la producción de café (nicho de calidad y buenos rendimientos), con sistemas agroforestales con árboles de servicios. La estrategia de mejora se puede enfocar en arreglos entre los árboles para aumentar la luz al café, reducir la incidencia de enfermedades y asegurar una mejor producción y calidad. Al mismo tiempo, árboles de servicio (árboles leguminosos como Pepetos y Nacapirol del género Inga), presentan la oportunidad de un mayor aporte al reciclaje de nutrientes por medio de una renovación de la sombra. Las fincas a mediana altitud (gradiente de adaptación sistémica) tienen el potencial de enfocar su producción tanto a café como en otros productos de diversificación como maderables (sistemas agroforestales con maderables). Esto se logrará tratando de seleccionar especies de alto valor y manejar las densidades adecuadas de árboles para una mejor distribución de la luz al café. Se seleccionarán especies de sombra de alta calidad de madera y estrategias de raleo y podas de árboles para reducir la competencia por luz. En la tabla siguiente se muestran la configuración de los sistemas que se analizarán por cada gradiente de adaptación (Tabla 18).

Tabla 18. Descripción de sistemas agroforestales propuestos para los diferentes gradientes de adaptación (ver anexo 5 para un diagrama de cada una de los sistemas propuestos).

Transformación y resiliencia sistémica	Adaptación sistémica	Adaptación Incremental
<p>Sistemas agroforestales diversificados</p> <p>En estos son sistemas se promoverá una densidad de café de 2.800/mz (2,5m X 1m).</p> <p>El componente de sombra será diversificado con maderables y frutales (Musáceas). Los frutales serán sembrados en franjas (Musáceas como banano seda o limón). En el caso de musáceas la densidad será 175 plantas/mz. Una densidad inicial de 140 árboles maderables /mz y una densidad final de 80 a 120 individuos/mz dependiendo de la especie.</p>	<p>Sistemas agroforestales con maderables</p> <p>En estos sistemas se promoverá una densidad de café de 2.800/mz (2,5m X 1m).</p> <p>El componente de sombra estará dominado principalmente por maderables. Se seleccionarán especies de alto valor y se establecerán a una densidad inicial de 233 árboles maderables /mz (7,5m X 5m) y una densidad final de 100 a 120 individuos/mz dependiendo de la especie, pero adicionalmente con diferentes eventos de aprovechamiento.</p> <p>Actualmente, existen pocas experiencias con maderables en cafetales en el Salvador, pero existe mucho potencial para aumentar la rentabilidad.</p>	<p>Sistemas agroforestales con árboles de servicios</p> <p>En estos son sistemas se promoverá una densidad de café de 2.800/mz (2,5m X 1m).</p> <p>El componente de sombra estará dominado principalmente por leguminosas. Los técnicos de café en El Salvador han promovido principalmente este sistema que está dominado por especies del género Inga. El beneficio es para el café y la producción de leña. La densidad que se propone será de 140 individuos/mz (10m X 5m).</p> <p>Será mantenido en áreas de mayor potencial para el café, donde se podrá potenciar la producción de café de mayor calidad.</p>

Sistemas agroforestales con árboles de servicios para el gradiente de Adaptación Incremental

En la zona de adaptación incremental se recomienda mantener sistemas agroforestales de café que incorporen árboles de servicio, como se han manejado tradicionalmente los sistemas de café. En esta zona se espera que la aptitud de café se mantenga y se pueda potenciar la producción de café de alta calidad. Los árboles de servicio en general son árboles fijadores de nitrógeno y a pesar que los productores posiblemente no son conscientes de esta propiedad, ellos observan el efecto benéfico en términos de fertilidad de suelos. Géneros tales como Albizia, Inga, Leucaena de la familia Mimosaceae y géneros como Erythrina y Gliricidia de las Fabaceae son usados comúnmente en sistemas de café, especialmente en Mesoamérica (Lambot and Bouharmont, 2004; Leon, 1998b; Muschler, 2004). En países de América Central (como Nicaragua y Guatemala), pocas especies de Inga (*I. punctata*, *I. densiflora*, *I. oerstediana*, *I. edulis*, *I. spectabilis*, *I. juinicuil*, entre otras) son mencionadas como sombra en plantaciones de café y cacao (Zamora and Pennington, 2001), sin embargo, posiblemente hasta un total de 20 especies de Inga pueden ser usadas en SAF de café (Leon, 1998b; Muschler, 2004; Muschler, 1999; Yépez et al., 2002; Lambot and Bouharmont, 2004).



Figura 21. Especies de *Inga* sembradas en cafetales en zonas óptimas para el café. (*Inga vera*, *Inga oerstediana* e *Inga punctata*).

Para el caso de El Salvador, las especies leguminosas como *Inga vera*, *Gliricidia sepium*, *Inga juinicuil* (sin. *I. paterna*), son las especies que presentan mayor aptitud climática. *Inga punctata* e *Inga oerstediana* presenta menor aptitud en el país, concentrándose en las áreas de mayor altitud, mientras *Inga densiflora* presenta una aptitud marginal en el país (Figura 21). En este sistema se pretende establecer árboles leguminosos a densidades de 100 individuos por ha, sin embargo, en Costa Rica densidades de hasta 278 individuos/ ha pueden ser encontrados, con distanciamiento de 6x6 m y un nivel de sombra que varía entre 50 a 60% (Siles et al 2010).

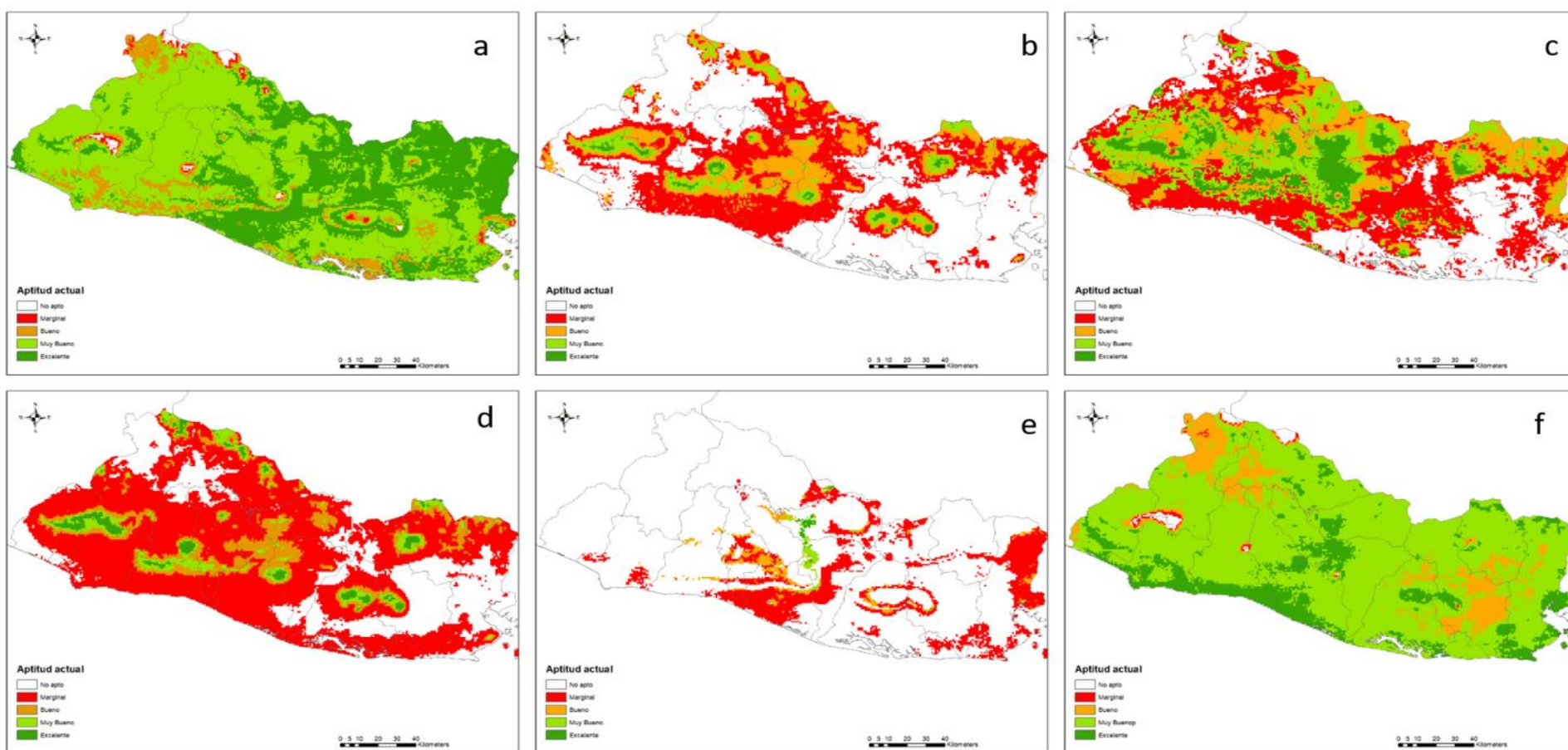


Figura 22. Aptitud climática para condiciones climáticas actuales de diferentes especies leguminosas usadas como sombra en El Salvador (a: *Inga vera*; b: *Inga punctata*; c: *Inga juinicuil*, antes *I. paterna*; d: *Inga oerstediana*; e: *Inga densiflora*; f: *Gliricidia septium*). Las aptitudes climáticas para estas especies son marginal (en color rojo), bueno (naranja), muy bueno (verde) y excelente (verde oscuro).

Flujo de caja y ABC del establecimiento de sistemas agroforestales con árboles de servicios para el gradiente de Adaptación Incremental

En este escenario se mide el impacto sistemas agroforestales con especies de Inga en la zona de adaptación incremental, se recomienda también renovar las plantaciones con variedades tolerantes a roya, pero también con variedades de alta calidad de taza como Tekisic y Pacamara. Los árboles se sembrarán a una densidad de 140 individuos/mz, y las especies que se utilizarán dependerán de la localidad específica, sin embargo Inga vera; Inga punctata; Inga juinicuil e Inga oerstediana están dentro de las especies de mayor preferencia.

Los supuestos de este análisis económico de rentabilidad son:

Además del supuesto del primer escenario (precios de mano de obra y precios de recolección), en este escenario también se promoverá una densidad de café de 2.800 plantas/mz (2,5m de distancia entre cada línea y 1m de distancia entre las plantas). En este escenario también se supone un manejo adecuado de nutrientes y uso de fertilizaciones foliares con micronutrientes. El horizonte de tiempo del análisis es de 20 años (para ser comparable con las otras prácticas, especialmente que involucren maderables), considerando que el ciclo de producción del cultivo de café es de 8 años, y que después de esta edad se puede estabilizar la producción con podas adecuadas hasta completar 20 años. La diferencia más importante de este escenario es que suponemos que por estar en una zona que seguirá siendo óptima para los picos de producción se alcanzarán en el 5to y 6to año, llegando a alcanzar rendimientos de 40 qq/mz.

Tabla 19. Indicadores de rentabilidad a nivel de parcela de la medida de adaptación de renovación de café en Sistemas Agroforestales con árboles de servicio en la zona adaptación incremental, con el supuesto de manejo adecuado de fertilizantes y manejo integrado

	Escenario sin renovación	Escenario con renovación en la zona de Adaptación Incremental con Inga, suponiendo mayor rendimiento y calidad
TIR (5%)		26%
VPN (5%)	1.189,88	6.810,41
Relación B/C (5%)	1,10	1,32
VPN (10 %)	812,7	3.665,14
Relación B/C (10 %)	1,10	1,32

En la zona de adaptación incremental, la renovación de café bajo sistemas agroforestales con árboles de servicio (leguminosas), con un adecuado manejo de fertilizantes y manejo integrado de plagas tendrán un TIR de 26%. Esta tasa es mayor si se compara con una renovación con variedades tolerantes que no implique una zona muy óptima para el café (escenario anterior con una TIR de 19%). En este escenario una mayor rentabilidad se obtiene por presentar un mayor rendimiento de café, sin embargo, también podría aumentar su rentabilidad por un precio diferenciado por una mejor calidad de café. El indicador de Valor Presente Neto (VPN) es positivo y oscila entre US\$ 6, 810 y 3, 665 para una tasa de descuento de 5% y 10%, respectivamente. Comparando este resultado, con los datos del escenario sin renovación, se observa que la medida de adaptación al cambio climático tiene un excedente económico bastante alto. Incluso comparando este escenario con el escenario de renovación solamente (sin estar en una zona óptima o de estricta altura), se puede observar un incremento del VPN de casi 100%. Como en el escenario pasado el flujo de ingresos y costos muestra un aumento en los costos en todos los

años en comparación con una condición actual (Figura 23). Un aumento de rendimiento conlleva también un aumento de costos, debido a que los costos de recolección de la cosecha representan entre el 43 al 55% de los costos de producción.

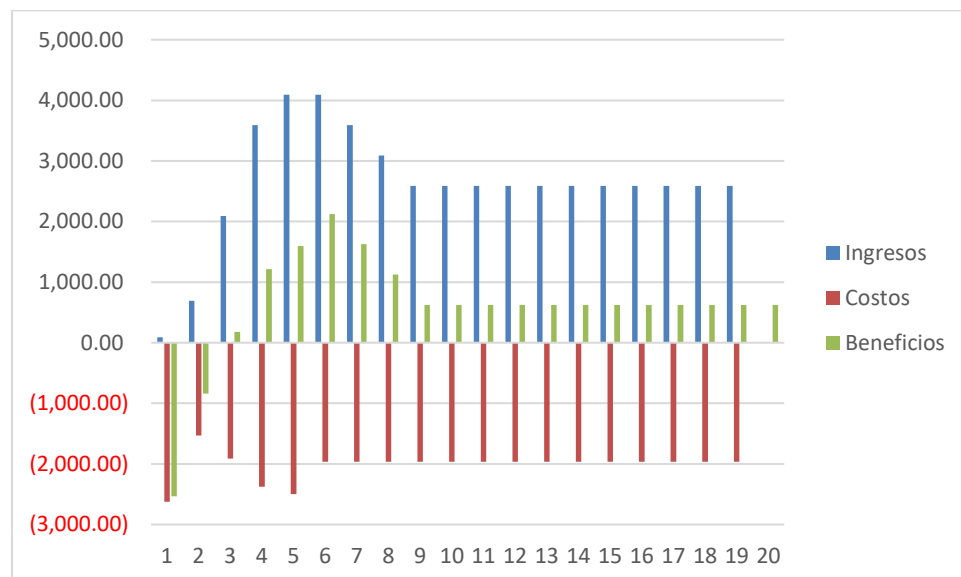


Figura 23. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra de Inga en zonas altas en buenos suelos (máximo de rendimiento de 40 qq oro/mz en el 5to y 6to año).

Los costos de establecimiento para este escenario se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Costos desglosados de renovación de un sistema agroforestal con Inga que mantenga un rendimiento de 25 qq de café oro/mz considerando que tiene mayor potencial por establecerse en una zona óptima.

Mano de obra	Jorn	Costo	Costo/mz
Limpia de terreno para siembra	5	8.12	40.6
Deliniado y estaquillado	2	8.12	16.24
Aplicación de enmiendas (encalado)	3	8.12	24.36
Ahoyado en cafetal	25	8.12	203
Siembra de plantas de cafetos	17	8.12	138.04
1er control malezas en forma manual	8	8.12	64.96
2 do. Control de maleza (manual)	6	8.12	48.72
Control de maleza (químico)	3	8.12	24.36
Control de plagas y enfermedades	3	8.12	24.36
Fertilización orgánica al suelo	4	8.12	32.48
Fertilización en siembra de plantas	3	8.12	24.36
1 era. Fertilización foliar	3	8.12	24.36
2 da. Fertilización foliar	3	8.12	24.36
Mantto. De calles y cercos	3	8.12	24.36
Caporal de cultivo	8	8.12	64.96

Obras de conservación de suelos		2	8.12	16.24
Costo total de mano de obra				795.76
Insumos	Cantidad	Unidad	Precio	Costo/mz
Bocashi	38	Dólares /qq	3	114
Formula 12-05-18	3	Dólares / sacos de 220 lbs.	35	105
Urea (sacos)	2	Dólares/saco 150 lb	28	56
Metalosato multimineral	1	Dólares / litro	12	12
Metalosato de zinc	1	Dólares / litro	12	12
Metalosato de boro	1	Dólares / litro	12	12
Cal agricola	7.5	Dólares/quintal	2	15
Altos 10-sl	0.25	Dólares / litro	45	11.25
Difusores brocap	24	Unidades	0.18	4.32
Planta de café	2800	Dólares / planta	0.231	646.8
Transporte planta de café (vivero de finca)	2800	Plantas	0.15	420
Transporte de insumos/fertilizantes	8	Dólares/saco	1	8
Transporte de insumos/otros insumos		Costo total		18.71
Costo total de insumos				1435.08
Costo siembra de sombra				
Planta de árbol (vivero de finca)	100	Dólares / planta	0.35	35
Transporte planta de árbol (vivero de finca)	100	Dólares / planta	0.15	15
Siembra de plantas de arboles	100	Dólares / planta	0.5	50
Otros gastos de establecimiento				50
Costo total de establecimiento de sombra				150.00
Costo total de operaciones				2380.84
Imprevistos 10%				238.1
Costo total				2619

Sistemas agroforestales con maderables para el gradiente de Adaptación Sistémica

Los sistemas agroforestales con café podrían significar una fuente importante de producción de madera para El Salvador y Mesoamérica en general. Los árboles maderables en sistemas agroforestales tienen condiciones diferentes de crecimiento comparados con aquellos en condiciones de bosque o plantaciones puras, principalmente debido a la aplicación frecuente de fertilizantes y que no se somete a competencia con árboles vecinos. La incorporación de árboles maderables en cafetales presenta el potencial de mayores ingresos netos a largo plazo por unidad de área. Sin embargo, la adopción con maderables en cafetales representa una serie de retos como: i) selección de las especies idóneas según el clima; ii) el desconocimiento sobre la densidad óptima en el sistema y el mantenimiento para evitar competencia (Viera 2004); iii) el poco conocimiento silvicultural sobre el manejo de los maderables (Orozco et al. 2005); y iv) **los aspectos legales necesarios para el aprovechamiento de los árboles maderables en el turno de corta.**

Especies maderables como Cedro (*Cedrela odorata*), Laurel (*Cordia alliodora*) y Caoba (*Swietenia humilis*) presentan desde muy buena a excelente aptitud climática en El Salvador que incluye las áreas cafetaleras (Figura 9). Mientras existe potencial para otras especies como coyote (*Platymiscium pinnatum/parviflorum*), granadillo (*Dalbergia retusa/glomerata*), Genizaro (*Samanea saman*), Nogal (*Junglans olanchana*), cortez blanco (*Tabebuia chryzantha*) y Aceituno (*Simarouba amara*) que pueden ser usados en sistemas agroforestales con café, basados en la disponibilidad de semilla y la adaptación específica de las especies a la zona de café. En general, las especies para las cuales se muestra la aptitud en la Figura 24, son especies de un alto valor maderable y presentan una amplia distribución y rango de adaptación. Solamente dos especies al parecer presentan una distribución limitada, el nogal es una especie más restringida a las zonas altas, que podría ser priorizada en zonas más altas. Por otro lado, Genizaro ha mostrado tener también una restricción de distribución, mostrando ser más apta en zonas bajas. Laurel, Cedro y Caoba muestra una buena aptitud climática para las zonas de café.

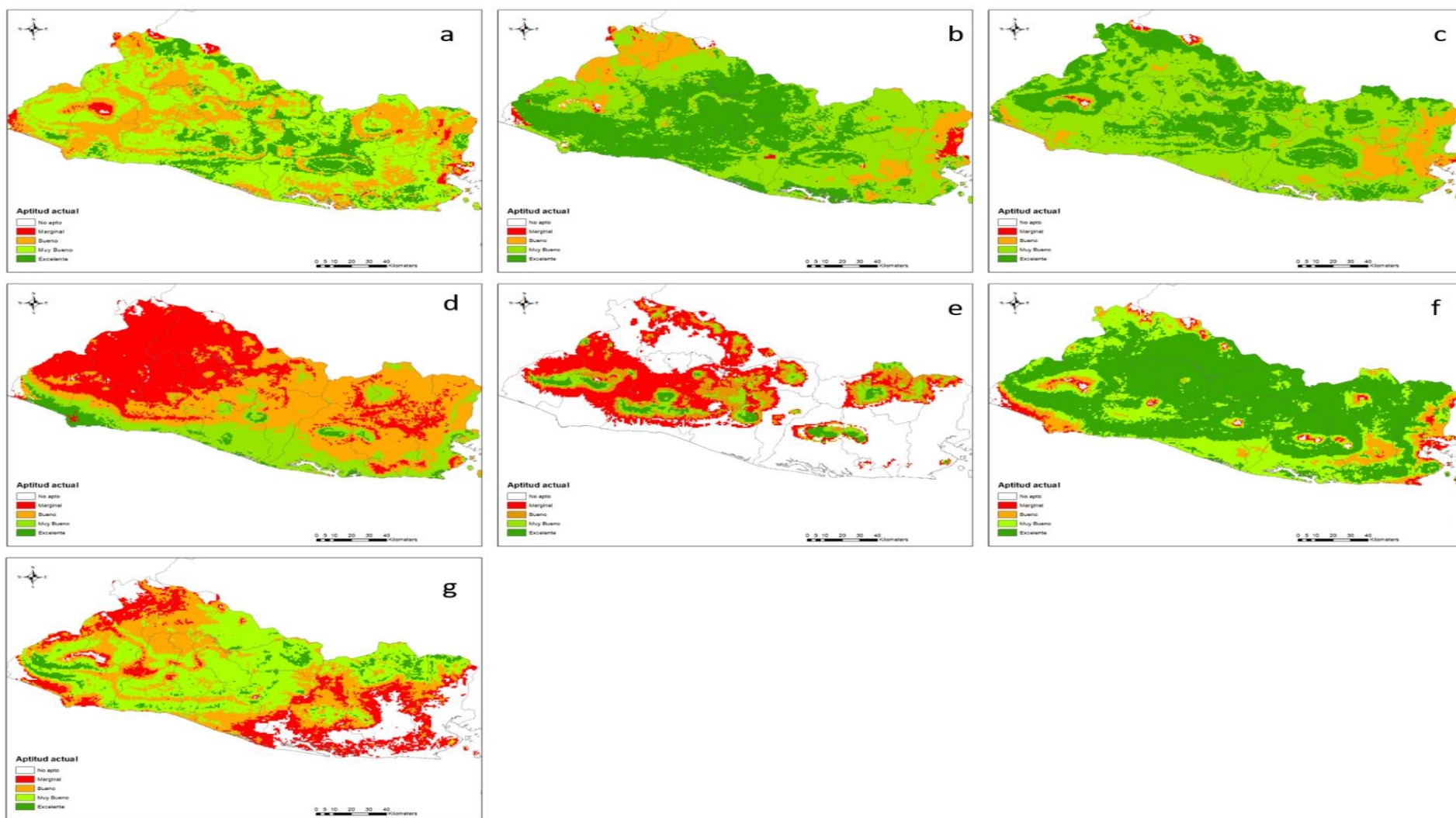


Figura 24. Aptitud climática de diferentes especies maderables **nativas** para El Salvador. a: Cedro (*Cedrela odorata*); b: Caoba (*Swietenia humilis*); c: Laurel (*Cordia alliodora*); d: Genizaro (*Samanea saman*); e: Nogal (*Juglans olanchana*), f: Cortez blanco (*Handroanthus chrysanthus*, sinónimo *Tabebuia chrysantha*), g: Aceituno (*Simaurouba glauca*). Las aptitudes climáticas para estas especies son marginal (en color rojo), bueno (naranja), muy bueno (verde) y excelente (verde oscuro).

En Honduras y Guatemala, ya hay esfuerzos de para que los productores de café incorporen árboles maderables de alto valor comercial en sus fincas, logrando diversificar con especies como cedro (*C. odorata*), caoba (*S. humilis*) y laurel (*C. alliodora*). En un estudio realizado en Guatemala por Martínez (2005), se concluyó que la mejor rentabilidad de colocar especies maderables en los cafetales fue para cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia humilis*), tomando en consideración los precios del mercado y cadenas de valor regionales por metro cúbico de madera neta aprovechable.

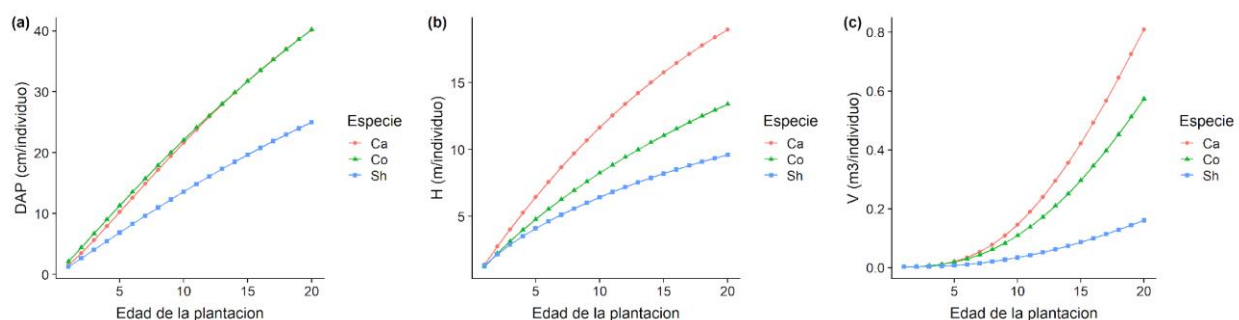


Figura 25.. Crecimiento del diámetro a la altura del pecho (DAP), altura (H) y volumen (V) de *Cordia alliodora* (Ca), *Cedrela odorata* (Co) y *Swietenia humilis* (Sh), tres especies con potencial en sistemas agroforestales en El Salvador. (Fuente: Jiménez, 2010, Jimenez et al 2013, Somarriba et al, 1987)

El potencial productivo de Laurel, Cedro y Caoba en cafetales podría alcanzar 0,8, 0,6 y 0,2 m³/árbol después de 20 años (Figura 25). Lo que representa entre 60 a 80 m³ de madera comercial por hectárea, a los 20 años de edad, dependiendo de la densidad de plantación y el manejo silvicultural. Datos superiores han sido encontrados por Somarriba (1990), donde se pueden encontrar entre 120 y 290 árboles de laurel en cafetales, los cuales podrían significar una producción sustentable de 6-15 m³ha⁻¹/año. Por otro lado, Webb et al. (2000) reporta que una plantación de cedro en Surinam podría rendir de 11 a 22 m³ha⁻¹/año, manejada sosteniblemente.

Flujo de caja y ABC del establecimiento de sistemas agroforestales con maderables para el gradiente de Adaptación Sistémica

En este escenario se mide el impacto de sistemas agroforestales con tres especies maderables en la zona de adaptación sistémica, en este escenario se pretende también renovar las plantaciones con variedades tolerantes a roya, variedades de sarchimores y catimores con una tasa de calidad intermedia. Los árboles se sembrarán a una densidad de 233 individuos/mz, y se realizarán raleos de los individuos cuando la sombra en la plantación alcance 50%.

Los supuestos de este análisis económico de rentabilidad son:

Como en los casos anteriores los precios de mano de obra y precios de recolección se mantienen fijos, en este escenario también se promoverá una densidad de café de 2800 plantas/mz (2.5m de distancia entre cada línea y 1m de distancia entre las plantas). Así mismo, suponemos que un manejo adecuado de nutrientes y uso de fertilizaciones foliares con micronutrientes se cumple. El horizonte de tiempo del análisis es de 20 años, ya que los maderables podrán completar su ciclo. En el caso del café consideramos que los mayores rendimientos del cultivo se presentarán en los primeros 8 años, y que después de esta edad se puede estabilizar la producción con podas adecuadas hasta completar 20 años. La incorporación de maderables supone ingresos adicionales a la hora de los raleos que son específicos para cada uno de los sistemas

dependiendo de la especie usada. Los modelos de crecimiento usados muestran diferencias en crecimiento de los árboles y arquitectura (forma de copas y relación diámetro-altura). El principal supuesto de este sistema se relaciona a que los productores podrán tener permisos al aprovechamiento de los árboles una vez se cumpla su ciclo y puedan obtener un ingreso adicional. Para esto es necesario, que los técnicos que acompañan el establecimiento de estos sistemas, puedan apoyar a los productores con los trámites legales de inscripción de sus plantaciones maderables. Otro supuesto es que la venta de madera proveniente de los árboles será en el patio productor (o finca del productor), por lo cual hemos usado precios intermedios (caoba US\$295/m³, cedro US\$ 220/m³, laurel US\$ 127/m³).

Tabla 21. Indicadores de rentabilidad a nivel de parcela de la medida de adaptación de renovación de café en Sistemas Agroforestales con árboles maderables en la zona adaptación sistémica, con el supuesto de manejo adecuado de fertilizantes y manejo integrado de plagas.

	Escenario sin renovación	Renovación con Sistemas Agroforestales con Maderables en la zona de Adaptación Sistémica (Especie Cedro)	Renovación con Sistemas Agroforestales con Maderables en la zona de Adaptación Sistémica (Especie Laurel)	Renovación con Sistemas Agroforestales con Maderables en la zona de Adaptación Sistémica (Especie Caoba)
TIR (5%)		19%	18%	18%
VPN (5%)	1.189,88	7.077,79	6.909,49	6.028,14
Relación B/C (5%)	1,10	1,30	1,29	1,26
VPN (10 %)	812,87	2.776,69	2.687,04	2.390,39
Relación B/C (10 %)	1,10	1,17	1,16	1,15

En la zona de adaptación sistémica, la renovación de café bajo sistemas agroforestales con árboles maderables tendrá un TIR entre 18 a 19%, dependiendo de la especie maderable. Este será por debajo del TIR en la zona de adaptación incremental (de 26%), sin embargo, el VPN en estos sistemas será igual o mayor dependiendo de la especie. En este escenario una mayor rentabilidad se obtiene los ingresos obtenidos por venta de madera durante los raleos y un ingreso fuerte al final del ciclo. El indicador de Valor Presente Neto (VPN) es positivo en todos los sistemas (tabla 18), sin embargo, es mayor para la especie cedro (*Cedrela odorata*) debido a un crecimiento alto y un precio de madera intermedio. Por otro lado, laurel (*Cordia alliodora*) presenta un crecimiento mayor a cedro, pero su rentabilidad es menor debido a un menor precio de la madera. Caoba por otro, tiene un mejor precio de madera pero su crecimiento es reducido en comparación de las otras especies, además a pesar que el valor de la madera en pie es alto (lo que contribuye al VPN), a los 20 años esta especie aún mantiene DAP de 25 cm, lo que significa que aún no será comercial para algunos aserraderos. Comparando este resultado, con los datos del escenario de sistemas agroforestales en la zona de adaptación incremental (zona que continuara siendo apta), vemos que la producción de madera podría jugar un papel importante en la rentabilidad de los sistemas. Esta medida de adaptación, no solo implica solamente un mejor microclima para el café, sino que una fuente importante de ingresos que podría compensar menor rendimiento en comparación con la zona de mayor aptitud para café. El flujo de ingresos derivado por madera es diferente en cada especie (figuras 22, 23 y 24), así el cedro por ser una especie de rápido crecimiento y tener un diámetro de copas mayor, debe ser raleado de forma más temprana (año 10), donde alcanza un nivel de sombra de 50%. Mientras, laurel presenta su primer raleo a los 12 años (con subsecuentes raleos a los 14, 17 y 19 años), finalmente caoba alcanza su primer raleo a los 14 años (nivel de sombra de 50%).

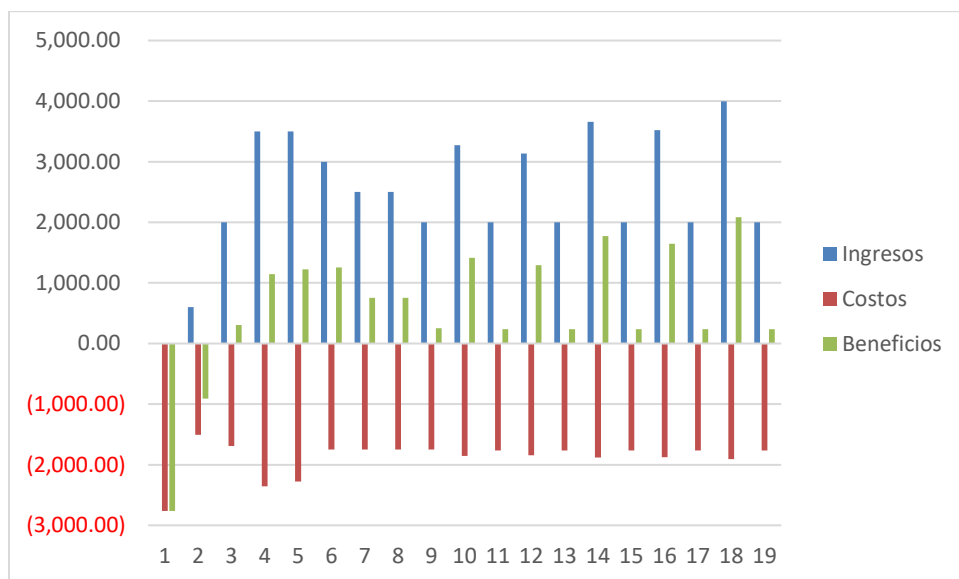


Figura 26. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra a base de maderables (cedro *Cedrela odorata* con un DAP promedio de 40 cm a los 20 años) en las zonas intermedias (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).

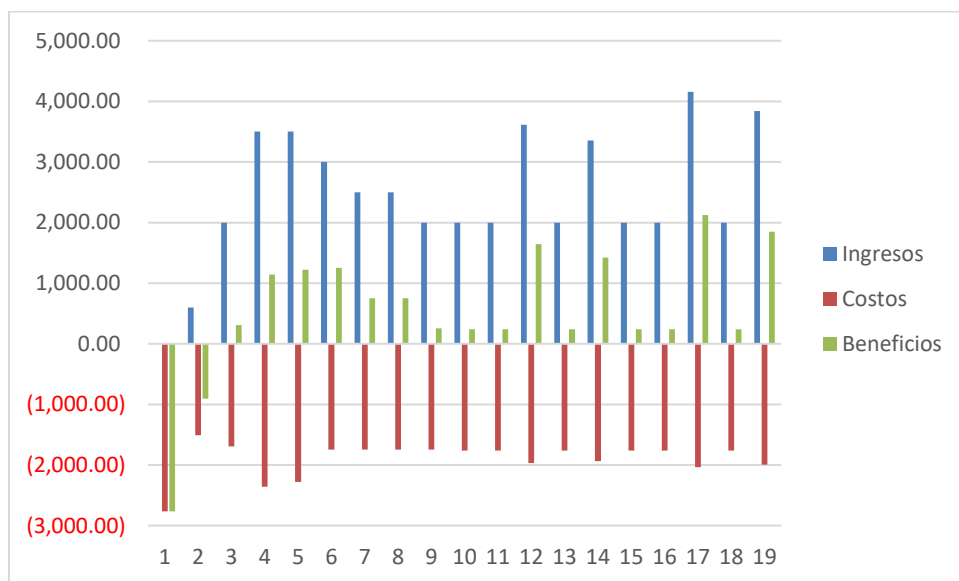


Figura 27. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra a base de maderables (Laurel *Cordia alliodora* con un DAP promedio de 40 cm a los 20 años) en las zonas intermedias (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).

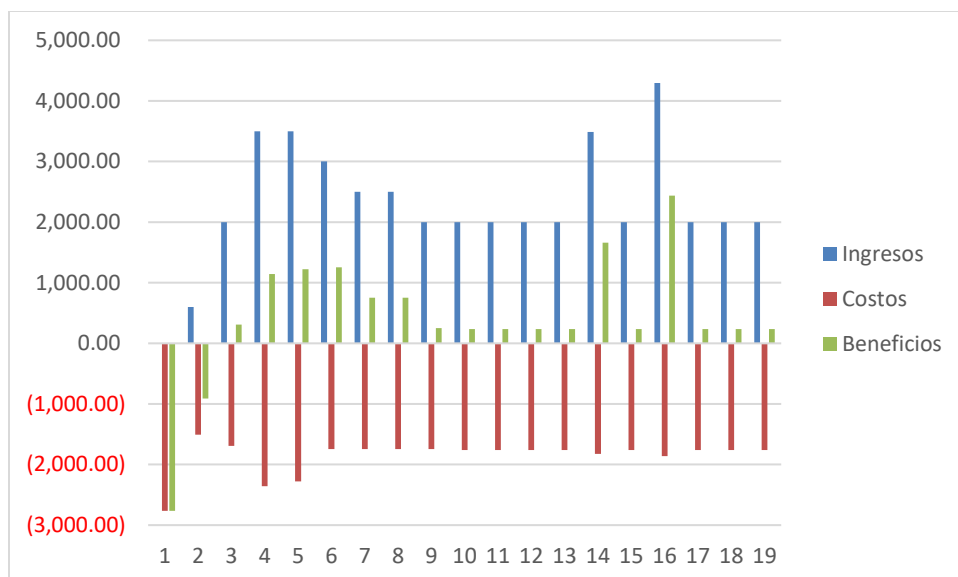


Figura 28. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra a base de maderables (caoba *Swietenia humilis* con un DAP promedio de 25 cm a los 20 años) en las zonas intermedias (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).

El costo de establecimiento de sistemas con maderables en el primer año es US\$ 2750 (aproximadamente US\$ 130 mayor que sistemas con Inga sp). La diferencia principal en este sistema es el costo de los árboles. El resto de los costos de establecimiento de café se mantienen iguales (los costos restantes de los años 2 y 3 se presentan en archivo en Excel). Consideramos que la diferencia costos de establecimiento no difiere entre las diferentes especies maderables y que las principales diferencias en TIR y VPN, son debido a tasas de crecimiento de los maderables y el precio de la madera. Como se mencionó antes el crecimiento de *Cordia alliodora* es mayor que las otras especies, mientras *Cedrela odorata* tiene un crecimiento menor pero un mayor precio.

Tabla 22. Costos desglosados de renovación de un sistema agroforestal con maderables que mantenga un rendimiento de 20 qq de café oro/mz.

Mano de obra	Jorn	Costo	Costo/mz
Limpia de terreno para siembra	5	8.12	40.6
1er control malezas en forma manual	8	8.12	64.96
2 do. Control de maleza (manual)	6	8.12	48.72
Control de maleza (químico)	3	8.12	24.36
Fertilización orgánica al suelo	4	8.12	32.48
Obras de conservación de suelos	2	8.12	16.24
Control de plagas y enfermedades	3	8.12	24.36
Siembra de plantas de cafetos	17	8.12	138.04
Ahoyado en cafetal	25	8.12	203
Fertilización en siembra de plantas	3	8.12	24.36
1 era. Fertilización foliar - prefloración	3	8.12	24.36
2 da. Fertilización foliar - postfloración	3	8.12	24.36
Deliniado y estaquillado	2	8.12	16.24

Aplicación de enmiendas (encalado)		3	8.12	24.36
Mantto. De calles y cercos		3	8.12	24.36
Caporal de cultivo		8	8.12	64.96
Costo total de mano de obra				795.76
Insumos	Cantidad	Unidad	Precio	Costo/mz
Bocashi	38	Dólares /qq	3	114
Formula 12-05-18	3	Dólares / sacos de 220 lbs.	35	105
Urea (sacos)	2	Dólares/saco 150 lb	28	56
Altos 10-sl	0.25	Dólares / litro	45	11.25
Metalosato multimineral	1	Dólares / litro	12	12
Metalosato de zinc	1	Dólares / litro	12	12
Metalosato de boro	1	Dólares / litro	12	12
Difusores brocap	24	Unidades	0.18	4.32
Planta de café (vivero de finca	2800	Dólares / planta	0.231	646.8
Transporte de insumos	8	Saco	1	8
Transporte de plantas	2800	Plantas	0.15	420
Cal agricola qq	7.5	Dólares/quintal	2	15
Flete de insumos		Total		18.7
Costo total de insumos				1435.08
Costo siembra de sombra	Cantidad	Unidad	Precio	Costo/mz
Planta de árbol (vivero de finca)	233	Dólares / planta	0.4	93.2
Transporte planta de árbol (vivero de finca)	233	Dólares / planta	0.15	34.95
Siembra de plantas de arboles	233	Dólares / planta	0.5	116.5
Otros gastos de establecimiento	3	Jornales	8.12	24.36
Costo total establecimiento de maderables				269.01
Costo total de operaciones				2499.85
Imprevistos 10%				250.0
Costo total				2750

Sistemas agroforestales diversificados para los gradientes de Transformación y Resiliencia Sistémica

En esta propuesta se pretende que los sistemas agroforestales incorporen especies arbóreas de alto valor para la generación de ingresos, por ejemplo, maderables y además frutales (Musáceas). En este sentido los sistemas agroforestales de café a base de maderables y banano, además de tener potencial para la conservación de la diversidad arbórea y secuestro de carbono (y otros servicios eco sistémicos), generan ingresos adicionales para los productores. Para mantener un balance entre los efectos positivos y negativos del uso de sombra, se propone no exceder 50% de sombra en las plantaciones de café. La cantidad de luz que penetra el dosel de sombra generalmente está ligada a la densidad de árboles en el cafetal y la cobertura de sus copas. En Costa Rica se ha recomendado 100 árboles adultos de laurel (*Cordia alliodora*) por

hectárea en asocio con café, ya que mantiene los niveles de producción café e incrementa el volumen de madera producido.. En este sistema, se mantiene el poro (*Erythrina poeppigiana*) como especie de servicio. También, en cafetales de Costa Rica con *Eucalyptus deglupta*, se recomiendan distancias de siembra de ocho metros, basado en crecimiento radicular de la especie (Schaller et al. 2003).



Figura 29. Sistemas agroforestales con café, muestran ser resilientes en el tiempo. Foto de la izquierda muestra sistemas con café, banano bajo árboles en 1910, foto a la derecha en Nicaragua en el año 2010.

Por otro lado, las musáceas (Bananos *Musa* AAA cv Gross Michel llamado seda en El Salvador) son sembradas comúnmente en otros países (Perú, Costa Rica, Nicaragua, Honduras) por pequeños productores de café. A menudo, los técnicos de café se especializan en la modernización de café y recomiendan la eliminación de musáceas de sus campos, a pesar de ser un sistema resiliente y desarrollado por productores para reducir los riesgos de mercado. Las musáceas como componente de sombra en cafetales absorbe entre 15 a 40 días de trabajo/ ha al año (aproximadamente 12% del total de mano de obra/ha). Esta mano de obra es usada principalmente para deshoje y deshije de plantas (52-66%). Mientras, el ingreso bruto por musáceas varía entre \$USD 200 a 450 por ha por año. El ingreso que se obtiene de la venta de bananos es mensual, tomando más relevancia para los productores, tres a cuatro meses después de la cosecha de café (Staver et al, 2013).

Flujo de caja y ABC de la práctica de Sistemas Agroforestales diversificados en el gradiente de transformación y Resiliencia Sistémica

En este escenario se mide el impacto sistemas agroforestales diversificados con musáceas y maderables (se evaluaron las mismas tres especies maderables), en este escenario se pretende también renovar las plantaciones con variedades tolerantes a roya, variedades de sarchimores y catimores con una tasa de calidad intermedia. Los árboles se sembrarán a una densidad de 140 individuos/mz, mientras las musáceas se sembrarán a una densidad de 175 plantas/mz. Las musáceas se eliminarán al octavo año y en el caso de los maderables, se realizarán raleos de los individuos cuando la sombra en la plantación alcance 50%.

Los supuestos de este análisis económico de rentabilidad son:

Como en los casos anteriores los precios de mano de obra y precios de recolección se mantienen fijos, en este escenario también se promoverá una densidad de café de 2.800 plantas/mz (2,5m de distancia entre cada línea y 1m de distancia entre las plantas). Así mismo, se supone un

manejo adecuado de nutrientes y uso de fertilizaciones foliares con micronutrientes. El horizonte de tiempo del análisis es de 20 años, ya que los maderables podrán completar su ciclo. En el caso del café, se consideró que los mayores rendimientos del cultivo se presentan en los primeros 8 años, y que después de esta edad se puede estabilizar la producción con podas adecuadas hasta completar 20 años. Además de la incorporación de los maderables, las musáceas también generan ingreso, incluso en un menor tiempo. La tasa de retorno de las musáceas será de 1,4 por planta (tasa de retorno se refiere a los racimos producidos por mata al año). Se usará el supuesto que el precio de racimos pagado al productor será de US\$1.5. Los precios de madera se fijarán como en el sistema anterior (caoba US\$295/m³, cedro US\$ 220/m³, laurel US\$ 127/m³).

Tabla 23. Indicadores de rentabilidad a nivel de parcela de la medida de adaptación de renovación de café en Sistemas Agroforestales diversificados con árboles maderables y musáceas en la zona de resiliencia sistémica y transformación, con el supuesto de manejo adecuado de fertilizantes y manejo integrado de plagas.

	Escenario sin renovación	Renovación con Sistemas Agroforestales diversos en la zona de Resiliencia Sistémica (Especie Maderable Cedro y Musáceas)	Renovación con Sistemas Agroforestales diversos en la zona de Resiliencia Sistémica (Especie Maderable Laurel y Musáceas)	Renovación con Sistemas Agroforestales diversos en la zona de Resiliencia Sistémica (Especie Maderable Caoba y Musáceas)
TIR (5%)		29%	29%	28%
VPN (5%)	1.189,88	9.830,75	8.864,69	7.542,32
Relación B/C (5%)	1,10	1,41	1,36	1,32
VPN (10 %)	812,87	4.846,51	4.422,57	3.803,44
Relación B/C (10 %)	1,10	1,29	1,26	1,23

En las zonas de resiliencia sistémica y transformación, la renovación de café bajo sistemas agroforestales diversificados tendrá un TIR entre 28 a 29%, dependiendo de la especie maderable. El VPN en estos sistemas será similar al encontrado para los sistemas agroforestales con maderables, con una tasa de 5%. Sin embargo, con tasas de 10% el VPN es mayor en los sistemas diversificados, debido a que los ingresos se empiezan a un corto plazo (Tabla 16). A pesar que las musáceas solo representan US\$ 390 de ingreso bruto al año, este puede ser usado en cubrir parte de los costos de manejo que se necesitan. El indicador VPN es mayor para la especie cedro (*Cedrela odorata*), sin embargo, la diferencia entre las especies maderables es menor ya que los ingresos generados por musáceas sobre todo en los primeros años tienden a reducir la diferencia. Igual que en caso de los sistemas agroforestales con maderables, la Caoba presenta un DAP de 25 cm a los 20 años, por lo que aún debería necesitar más tiempo para lograr su aprovechamiento. El flujo de ingresos derivados del cultivo de musáceas se puede obtener desde los primeros años (sobre todo en sitios con mayor temperatura), mientras la madera comienza a generar ingresos (por raleos) a partir del año 15 para cedro, 16 para laurel y 19 para caoba (figuras 30, 31 y 32).

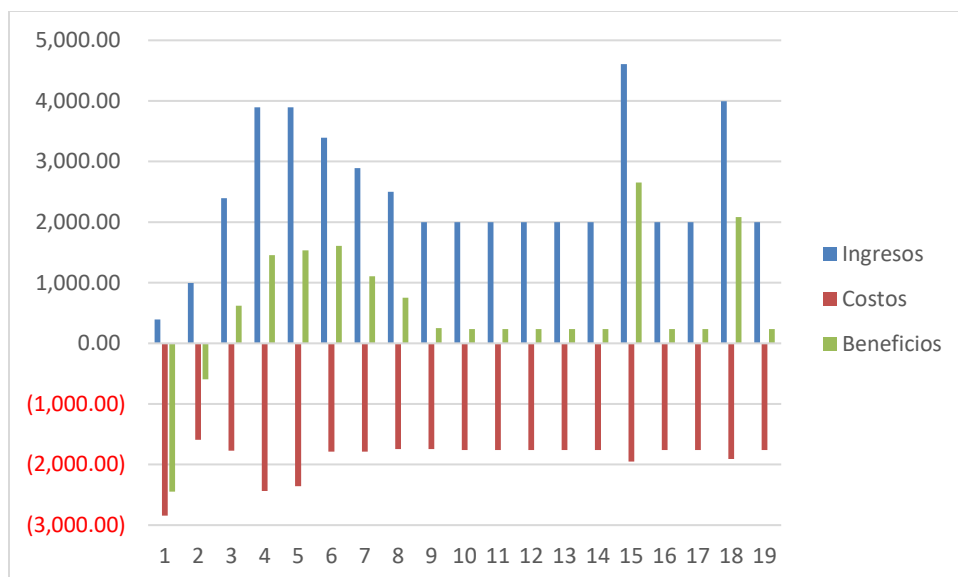


Figura 30. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra diversa de Musáceas y maderables (cedro *Cedrela odorata* con un DAP promedio de 40 cm a los 20 años) en las zonas bajas (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).

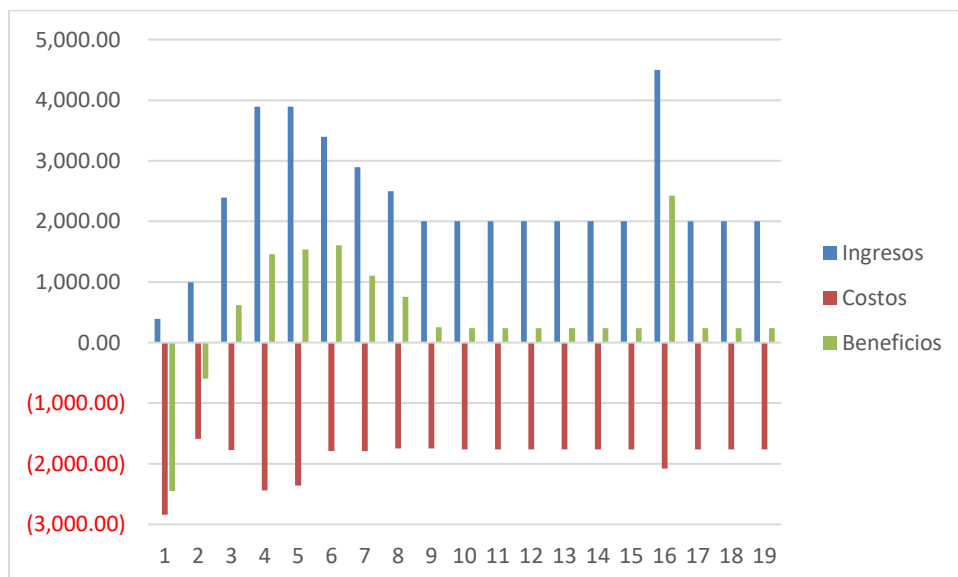


Figura 31. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra diversa de Musáceas y maderables (Laurel *Cordia alliodora* con un DAP promedio de 40 cm a los 20 años) en las zonas bajas (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).

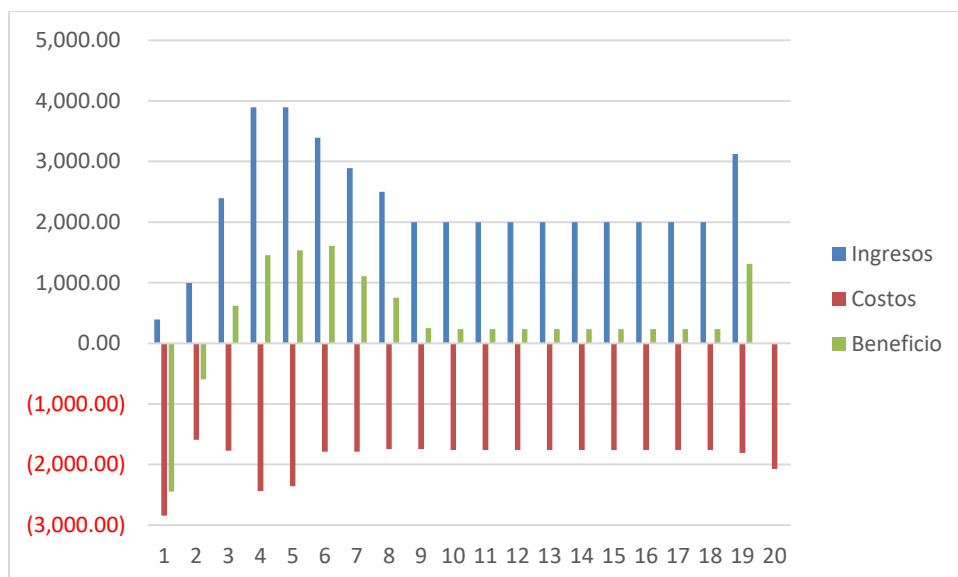


Figura 32. Flujo de ingresos y costos de sistemas con café renovados con sombra diversa de Musáceas y maderables (caoba Swietenia humilis con un DAP promedio de 25 cm a los 20 años) en las zonas bajas (máximo de rendimiento de 35 qq oro/mz en el 4to y 5to año).

Los costos de establecimiento del sistema agroforestal diverso con maderables y musáceas (banano) es US\$ 2 886 (tabla 21). El costo del establecimiento de la sombra en este sistema representa 14% de los costos totales de establecimiento del sistema. El costo del establecimiento de café sigue siendo el mayor, sin embargo, dependiendo de la disponibilidad de las especies forestales y de buen material de siembra de las musáceas la sombra puede ser un costo importante. Hemos considerado un costo de US \$0.4/planta forestal, mientras el costo del material de siembra de musáceas (cormos) lo hemos asumido en US\$ 0.15. Este costo de material de siembra de musácea es relativamente alto, pero en este momento consideramos que puede ser escaso en la zona de café por lo que podría tener un costo mayor. Una vez se establezcan sistemas de con musáceas en la zona de café este costo será menor.

Tabla 24. Costos desglosados de renovación de un sistema agroforestal diversificado con maderables y banano que mantenga un rendimiento de 20 qq de café oro/mz.

Mano de obra	Jorn	Costo	Costo/mz
Limpia de terreno para siembra	5	8.12	40.6
1er control malezas en forma manual	8	8.12	64.96
2 do. Control de maleza (manual)	6	8.12	48.72
Control de maleza (químico)	3	8.12	24.36
Fertilización orgánica al suelo	4	8.12	32.48
Obras de conservación de suelos	2	8.12	16.24
Control de plagas y enfermedades	3	8.12	24.36
Siembra de plantas de cafetos	17	8.12	138.04
Ahoyado en cafetal	25	8.12	203
Fertilización en siembra de plantas	3	8.12	24.36
1 era. Fertilización foliar - prefloración	3	8.12	24.36

2 da. Fertilización foliar - postfloración		3	8.12	24.36
Deliniado y estaquillado		2	8.12	16.24
Aplicación de enmiendas (encalado)		3	8.12	24.36
Manto. De calles y cercos		3	8.12	24.36
Caporal de cultivo		8	8.12	64.96
				795.76
Insumos	Cantida d	Unidad	Preci o	Costo/mz
Bocashi	38	Dólares /qq	3	114
Formula 12-05-18	3	Dólares / sacos de 220 lbs.	35	105
Urea (sacos)	2	Dólares/saco 150 lb	28	56
Altos 10-sl	0.25	Dólares / litro	45	11.25
Metalosato multimineral	1	Dólares / litro	12	12
Metalosato de zinc	1	Dólares / litro	12	12
Metalosato de boro	1	Dólares / litro	12	12
Difusores brocap	24	Unidades	0.18	4.32
Planta de café (vivero de finca	2800	Dólares / planta	0.231	646.8
Transporte de insumos	8	Saco	1	8
Transporte de plantas	2800	Plantas	0.15	420
Cal agricola qq	7.5	Dólares/quintal	2	15
Transporte de insumos/otros insumos		Costo total		18.71
				1435.076364
Costo siembra de sombra	Cantida d	Unidad	Preci o	Costo/mz
Planta de árbol maderable (vivero de finca)	140	Dólares / planta	0.4	56
Transporte planta de árbol (vivero de finca)	140	Dólares / planta	0.15	21
Siembra de plantas de arboles	140	Dólares / planta	0.5	70
Planta de banano (vivero de finca)	175	Dólares / planta	0.15	26.25
Transporte planta banano (vivero de finca)	175	Dólares / planta	0.15	26.25
Siembra de plantas banano	175	Dólares / planta	0.5	87.5
Otros gastos de establecimiento maderable	3	Jornales	8.12	24.36
Otros gastos de establecimiento banano	10	Jornales	8.12	81.2
Costo total establecimiento de maderables y banano				392.56
Costo total de operaciones				2623.40
Imprevistos 10%				262.3
Costo total				2886

Otros beneficios de los sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales propuestos en cada una de las zonas del gradiente de adaptación

que se relacionan con la renovación de cafetales, además de ser opciones financieramente viables , proveen una serie de beneficios ambientales y sociales (*Tabla 25*). En mitigación de cambio climático, los sistemas presentados tienen el potencial de aumentar el stock de carbono en la biomasa aérea. Aunque también hay mucho potencial de secuestro de carbono en los suelos, este compartimento cambia más lentamente y el aumento de carbono en el suelo se observa a largo plazo. Adicionalmente, aunque los sistemas agroforestales con maderables serán aprovechados a los 20 años (y esto implica eliminación de la cobertura para volver a plantar), si la madera es usada para muebles o construcción, esto supone que el almacenamiento de carbono aún continúa. Caso contrario ocurre cuando la biomasa o madera es usada como leña, donde el carbono almacenado es nuevamente liberado al ambiente.

En términos de adaptación, la sombra mejora el microclima del café y esta es la ventaja más clara que presentan los sistemas agroforestales como medida de adaptación al cambio climático (Siles et al 2010, Siles et al 2002). Otras ventajas y beneficios, han sido mencionados con respecto a protección hídrica y mayor disponibilidad de agua para el café, sin embargo, los datos de balance hídrico a nivel de parcela muestran pocas diferencias en humedad de suelos en sistemas agroforestales comparado con sistemas de monocultivo, y la diferencia más importante es una reducción de la escorrentía superficial en sistemas agroforestales (Siles et al 2010, Cannavo et al 2011). En términos de medios de vida, la diversificación de los sistemas de café que puedan proveer otros ingresos adicionales a las familias productoras. Especialmente, sistemas más diversos que generen ingresos en los primeros años pueden ser adaptados con mayor facilidad por productores. Se propone la implementación de sistemas más diversos en la zona de gradiente de resiliencia sistémica y transformación, como la medida más importante de adaptación en estas zonas donde el café se verá más afectado por cambio climático.

Tabla 25. Impactos de los diferentes sistemas agroforestales en Mitigación, Adaptación y Medios de vida de los productores.

Transformación y resiliencia sistémica	Adaptación sistémica	Adaptación Incremental
<p>Mitigación Se supone que hay mayor incorporación de materia orgánica al suelo por el efecto de las hojas que caen de los árboles. Sin embargo, pocas diferencias existen en carbono almacenado en suelos entre sistemas con árboles y sin árboles</p> <p>El promedio de stock de Carbono aéreo es 30 Mg C/ ha (rango de 10 a 58 Mg C/ha). (Kichline, 2017, van Rikxoort et al, 2014).</p> <p>El mayor componente de carbono está representado por árboles, seguido del café, la hojarasca y musáceas.</p>	<p>Mitigación Se supone que hay mayor incorporación de materia orgánica al suelo por el efecto de las hojas que caen de los árboles. Sin embargo, pocas diferencias existen en carbono almacenado en suelos entre sistemas con árboles y sin árboles</p> <p>El promedio de stock de Carbono aéreo es 42.5 Mg C/ ha (rango de 22 a 79 Mg C/ha). (van Rikxoort et al, 2014).</p>	<p>Mitigación Se supone que hay mayor incorporación de materia orgánica al suelo por el efecto de las hojas que caen de los árboles. Sin embargo, pocas diferencias existen en carbono almacenado en suelos entre sistemas con árboles y sin árboles</p> <p>El promedio de stock de Carbono aéreo es 14.3 Mg C/ ha (rango de 5.6 a 34.6 Mg C/ha). (van Rikxoort et al, 2014). Siles et al 2010, muestra un stock de C de 19.5 Mg C/ha en sistemas con <i>Inga densiflora</i> comparado con 8.1 Mg/ha en plantaciones a pleno sol en 7 años de crecimiento (Siles et al 2010, Hergoualc'h 2012).</p> <p>Por la capacidad de fijar nitrógeno, se pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas por las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados.</p>

Transformación y resiliencia sistémica	Adaptación sistémica	Adaptación Incremental
<p>Adaptación</p> <p>Los sistemas agroforestales tendrán un impacto en directo e indirecto</p> <p>La sombra de 50% tendrá un efecto importante en la reducción de la temperatura a la que estará expuesto el café.</p> <p>Se reduce el impacto de las gotas de lluvia y se disminuye la de la escorrentía.</p>	<p>Adaptación</p> <p>Los sistemas agroforestales tendrán un impacto en directo e indirecto</p> <p>La sombra de 50% tendrá un efecto importante en la reducción de la temperatura a la que estará expuesto el café.</p> <p>Se reduce el impacto de las gotas de lluvia y se disminuye la de la escorrentía.</p>	<p>Adaptación</p> <p>Los sistemas agroforestales tendrán un impacto en directo e indirecto</p> <p>La sombra de 50% tendrá un efecto importante en la reducción de la temperatura a la que estará expuesto el café.</p> <p>Se reduce el impacto de las gotas de lluvia y se disminuye la de la escorrentía.</p> <p>Puede haber mayor retención de humedad en el suelo, pero solo en suelos profundos.</p> <p>Existe menor pérdida de nitrógeno en el suelo, al ser más lenta la descomposición del humus y menor escorrentía.</p>
<p>Productividad y medios de vida</p> <p>Diversifica el ingreso a los productores. Especialmente, ingresos a corto plazo. Las musáceas representan un componente de rápido establecimiento y de continua producción a lo largo del año. Los maderables por otro lado representarán un ingreso fuerte a largo plazo.</p>	<p>Productividad y medios de vida</p> <p>Este sistema aporta en la generación de ingresos adicionales, por medio de madera. Sin embargo, es un ingreso menos diversificado que comienza a ser importante después del año 10.</p>	<p>Productividad y medios de vida</p> <p>La mayor ventaja es sobre un mejor ambiente para el crecimiento de café, sobre todo en mejorar las condiciones de suelo. En términos de diversificación hay producción de leña que continúa siendo importante para los productores.</p>

Prácticas de manejo de suelo

El manejo de suelos y una fertilización más balanceada representa una de las practicas que se han priorizado. Además, para aquellas parcelas donde ya han hecho una renovación en los últimos años, el factor más limitante es la fertilización. A pesar que una gran proporción de las plantaciones tienen una edad mayor a 20 años, la fertilización juega un papel importante en explicar los rendimientos actuales en El Salvador. Así, para las cinco variedades más comunes en El Salvador se muestra un incremento en el rendimiento a medida que aumenta el número de fertilizaciones (Figura 33). Este efecto es más evidente en las variedades como Bourbon y Pacas, donde se observa que entre dos a tres fertilizaciones al año se presenta el mayor rendimiento. En el anexo 15 se muestra el rendimiento de café promedio con base a la fertilización y la edad de la plantación; en este análisis se muestra que la fertilización tiene un efecto mayor sobre el rendimiento que la edad de la plantación. Por lo que una renovación sin un plan adecuado de fertilización no tendrá un impacto en mantener la rentabilidad de la actividad cafetalera.

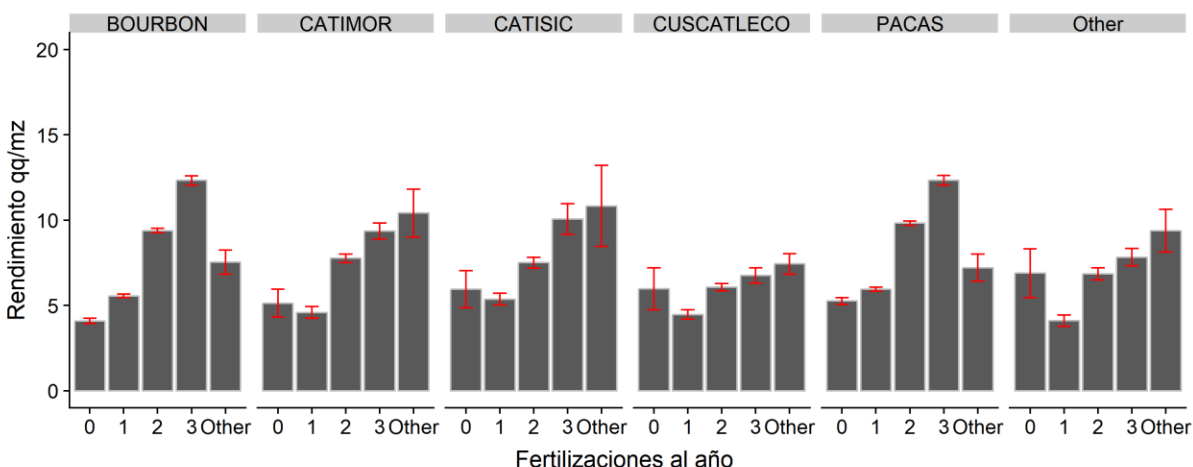


Figura 33. Rendimiento promedio de café en plantaciones con diferentes variedades y tasas de fertilización en el año (Las fertilizaciones representan el número de fertilizaciones hechas por productores).

El cálculo de fertilizantes está enfocado a cubrir las necesidades nutricionales de las plantas. Así, la cantidad de nutrientes requeridos por las plantas varía dependiendo de las características propias del suelo y el nivel de rendimiento al que queremos apuntar. El cultivo de café en producción extrae principalmente N y K del suelo. Sin embargo, los análisis de suelo muestran que nutrientes como P y otros nutrientes menores son limitantes (Zn, B, Mg). En este sentido, cuando la renovación ya fue realizada se propone apoyar solamente la fertilización de plantaciones jóvenes con tres fertilizaciones al año y tres fertilizaciones con micronutrientes. Esta práctica duplica el rendimiento, comparado con plantaciones de la misma edad sin fertilización independiente de las plantaciones.

En plantaciones con una edad menor a cinco años (en su pico de rendimiento), una de las estrategias para levantar la producción y la resiliencia del rubro de café es una adecuada fertilización. El costo total de mantenimiento de cafetales con un rendimiento de 20 qq/mz es aproximadamente US\$ 1750, de los cuales 37% son el costo de la cosecha, mientras el costo relacionado con fertilización (insumos y mano de obra) representa el 21% del costo total.

Tabla 26. Costos desglosados de mantenimiento de sistemas agroforestales con de café joven (<4 años) que mantenga un rendimiento de 20 qq de café oro/mz.

Mano de obra	Jorn	Costo	Costo/mz
Manejo de sombra permanente	6	8.12	48.72
1 era. Fertilización al suelo (tradicional)	3	8.12	24.36
1er control malezas en forma manual	8	8.12	64.96
2 do. Control de maleza (manual)	6	8.12	48.72
Control malezas en forma manual	8	8.12	64.96
1 era. Fertilización foliar - prefloración	3	8.12	24.36
2 da. Fertilización foliar - postfloración	3	8.12	24.36
Control de broca del fruto con 3b	3	8.12	24.36
Control con hongo 3b	3	8.12	24.36
2 da. Fertilización al suelo (tradicional)	3	8.12	24.36

Control de plagas y enfermedades		3	8.12	24.36
Caporal de cultivo		8	8.12	64.96
Manejo de maderables		6	8.12	48.72
Manejo de banano		8	8.12	64.96
Costo total de mano de obra				576.52
Insumos	Cantidad	Unidad	Precio	Costo/mz
Formula 20-0-20 (sacos)	2	Dólares/saco 220 lbs	49	98
Sulfato de amonio	2	Dólares/saco 220 lb	26	52
Biomín	1	Dólares / litro	12	12
Metalosato de zinc	0.6	Dólares / litro	12	7.2
Beauveria bassiana	1	Dólares/lb	5	5
Beauveria bassiana	1	Dólares/lb	5	5
Altos 10-sl	0.25	Dólares / litro	45	11.25
Transporte de insumos	7	Saco	1	7
Furadan sacos 50 lbs	1	Dólares/saco 50 lbs	40	40
Metalosato de boro	0.6	Dólares / litro	12	7.2
Formula 12-05-18	3	Dólares / sacos de 220 lbs.	35	105
Transporte de insumos/otros insumos		Costo total		15.96
Costo total de insumos				365.61
Costo siembra de recolección	Cantidad	Unidad	Precio	Costo/mz
Recolección	20	Dólares/qq oro	32.4	648
Costo de mano de obra fertilización				97.44
Costo total de fertilizantes				281.4
Costo total de la fertilización				378.84
Costo total de operaciones total				1590.13
Imprevistos 10%				159.0
Costo total				1749

6. CONCLUSIONES

Los resultados indican que el cambio climático tendrá un gran impacto en las zonas productoras de café. En principio se espera que grandes extensiones de áreas aptas para la producción de café disminuyan su aptitud, principalmente por efecto de aumento de la temperatura. Las áreas más afectadas son las que se ubican en zonas de baja y media aptitud. Esto conlleva a un riesgo alto para el país en términos económicos y sociales, ya que este cultivo representa un renglón importante en el sector rural para El Salvador.

1. La producción de café en El Salvador es altamente vulnerable al cambio climático. Según los resultados de los modelos usados, para el 2030 el 20% de las fincas actualmente productoras de café ya no serán aptas para producir café arábica bajo los sistemas productivos actuales, principalmente por el aumento de las temperaturas. Para el 2050 la cifra aumenta al 30%.
2. Las alternativas propuestas para disminuir el impacto del cambio climático en el rubro del café arábica, están orientadas al manejo del cultivo para disminuir las temperaturas, aumentar la captación de agua y disminuir la incidencia de plagas y enfermedades. Para el caso de los sistemas agroforestales, se hacen 3 propuestas diferenciadas por gradientes de adaptación: con árboles de servicio (café con sombra de leguminosas), maderables (café con sombra de maderables de alto valor) y diversificados (café con sombra de maderables de alto valor más musáceas).
3. La renovación de cafetales es una alternativa importante para obtener mayor tolerancia a temperaturas altas y al ataque de plagas y enfermedades, obviamente esta práctica es más viable en aquellas plantaciones de mayor edad, que además de la necesidad de renovar por aspectos climáticos, ya deben de ser renovadas para obtener mayor productividad. Convenientemente, la zona de transformación que necesita más urgentemente la renovación de cafetales con variedades tolerantes a temperaturas altas, también coincide con ser una de las zonas que tiene mayor proporción de plantaciones mayores de 20 años.
4. El uso de árboles maderables como sombra en el cultivo del café parece ser una alternativa rentable en El Salvador, sin embargo, se debe hacer hincapié en: mantenimiento para disminuir la competencia café-maderables y los aspectos legales para el aprovechamiento de la madera. Esto último debido a que la legislación ambiental vigente sobre el aprovechamiento de árboles suele representar un desincentivo para la diversificación y siembra de árboles maderables en sistemas agroforestales de café. Es necesario capacitar y difundir cuáles son los procesos a cumplir para el registro de maderables para su aprovechamiento.
5. El uso de árboles maderables puede ser beneficioso para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Al plantar árboles maderables, durante su crecimiento se producirá captura de carbono, al cabo de 20 años, luego que se efectúe el aprovechamiento de estos árboles, si son utilizados para la construcción o para la fabricación de muebles, entonces este carbono seguirá siendo almacenado y nuevo carbono será fijado al crecer nuevamente los árboles en los sitios donde se dio el aprovechamiento.
6. Es necesario fortalecer la investigación de los sistemas agroforestales (multiestrato diversificado) a través de CENTA Café y sus técnicos, pero también es necesario facilitar el acceso a los resultados de investigación tanto del sector público como privado, esto incluye a bancos, organizaciones de productores, ONGs y universidades.

7. BIBLIOGRAFÍA

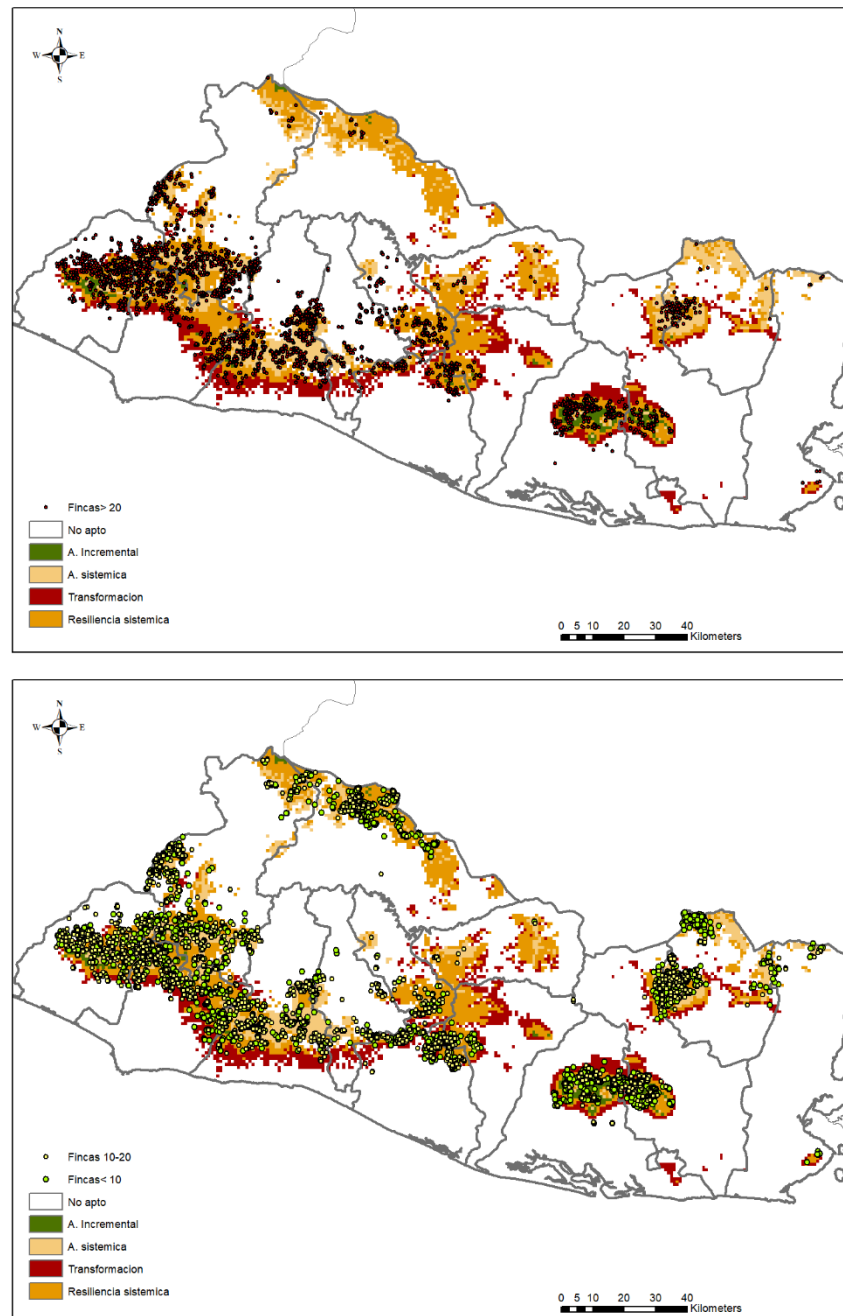
- Arévalo, M. y Méndez, D. 2011. Análisis multitemporal de las zonas cafetaleras de El Salvador y su impacto en el desarrollo socioeconómico. Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas. Disponible en línea en: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/994/1/13101243.pdf>
- Barradas, V. and Fanjul, L. 1986. Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agric for Meteorol* 38: 101 – 112
- Beer, J., 1987. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cocoa and tea. *Agroforestry Systems* 5, 3-13.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., Somarriba, E., 1997. Shade Management in Coffee and Cacao Plantations. *Agroforestry Systems* 38, 139-164.
- Boulesteix, Anne-Laure, Silke Janitza, Jochen Kruppa, y Inke R. König. 2012. "Overview of Random Forest Methodology and Practical Guidance with Emphasis on Computational Biology and Bioinformatics." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery* 2 (6): 493–507.
- Breiman, Leo. 2001. "Random Forests." *Machine Learning* 45 (1): 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Bretz F., Hothorn T., Westfall, F. 2010. Multiple comparison using R. CRC Press.
- Bunn, Christian, Fabio Castro, y Mark Lundy. 2017. "The Impact of Climate Change on Coffee Production in Central America." In . San Pedro Sula, Honduras.
- Bunn, Christian, Peter Läderach, Juan Guillermo Pérez Jimenez, Christophe Montagnon, y Timothy Schilling. 2015. "Multiclass Classification of Agro-Ecological Zones for Arabica Coffee: An Improved Understanding of the Impacts of Climate Change." Edited by Juan A. Añel. *PLOS ONE* 10 (10): e0140490. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140490>.
- Campanha, M., Santos, R., de Freitas, G., Martinez, H., Garcia, S. and Finger, F. 2005. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *Agrofor Syst* 63: 75–82
- Consejo Salvadoreño del Café (CSC). 2019. Estadísticas cafetaleras al 31 de enero de 2019. Informe oficial. Disponible en línea en: <http://www.csc.gob.sv/estadisticas/>
- Consejo Salvadoreño del Café (CSC). 2018. Variedades cultivadas en El Salvador. Disponible en línea en: <http://www.csc.gob.sv/variedades/>
- Cuadras, S. y López, K. 2012- Orígenes del café. *Revista Forum Cafe*. Volumen 50, paginas 5-9.
- DaMatta, F.M., 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research* 86, 99-114.
- Fischer, Günther, Mahendra M. Shah, y H. T. Van Velthuizen. 2002. "Climate Change and Agricultural Vulnerability.
- Fundación Nacional para el Desarrollo (FUNDES). 2003. El impacto de la crisis del café en El Salvador.
- Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café (PROCAFE). 2010. Boletín estadístico de la caficultura Salvadoreña año 2010. Disponible en línea en: <https://docplayer.es/18939513-Boletin-estadistico-de-la-caficultura-salvadorena-ano-2010.html>
- Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café (PROCAFE). 2011. Costos de producción de café en fincas cafetaleras de El Salvador 2010-2011. La Libertad, El Salvador.
- Hand, David J., y Robert J. Till. 2001. "A Simple Generalisation of the Area under the ROC Curve for Multiple Class Classification Problems." *Machine Learning* 45 (2): 171–86.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25 (15), 1965 – 1978.
- Jha, S., Bacon, C., Philpott, S., Méndez, E., Läderach, P. and Rice, R. 2014. Shade Coffee: Update on a Disappearing Refuge for Biodiversity, *BioScience*, Volume 64, Issue 5, 1, Pages 416–428, <https://doi.org/10.1093/biosci/biu038>
- Jiménez, G. 2012. Producción de madera y almacenamiento de carbon en cafetales con cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*) en Honduras. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Disponible en línea en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A9025e/A9025e.pdf>
- Läderach, P.; Haggard, J.; Lau, C.; Eitzinger, A.; Ovalle, O.; Baca, M.; Jarvis, A.; Lundy, M. 2011. Café mesoamericano: Desarrollo de una estrategia de adaptación al cambio climático. CIAT Políticas en Síntesis no. 2. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 4 p.

- Leon, J., 1998. Inga as shade for coffee, cacao and tea: historical aspects and present day utilization. The genus Inga utilization. TD Pennington & ECM Fernández (Eds). Kew (RU). Royal Botanic Gardens. pp. 101-115.
- Liaw, Andy, y Matthew Wiener. 2002. "Classification and Regression by RandomForest." R News 2 (3): 18–22
- López, K. 2012. El café de El Salvador. La Prensa Gráfica. Disponible en línea en: https://www.forumdelcafe.com/sites/default/files/biblioteca/f-50_cafe_salvador.pdf
- Martínez-Rodríguez, M.R., Viguera, B., Donatti, C.I., Harvey, C.A. y Alpízar, F. 2017. La importancia de los servicios ecosistémicos para la agricultura. Materiales de fortalecimiento de capacidades técnicas del proyecto CASCADA (Conservación Internacional-CATIE). 40 páginas.
- Mcneely, J., Schroth, G., 2006. Agroforestry and biodiversity conservation –traditional practices, present dynamics, and lessons for the future. Biodiversity and Conservation 15, 549–554.
- Melgar, K. y Nieto, M. 2017. Almacenamiento de carbono en sistemas con diferentes usos de suelos en el municipio de Comalapa, Chalatenango, El Salvador. Universidad de El Salvador. Disponible en línea en: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14877/1/13101649.pdf>
- Millennium Ecosystem Assessment, 2003. Ecosystems and Human Well-Being, A Framework For Assessment. Island Press, 212 pp
- Morales, A. 1952. El crédito cafetalero. Revista de comercio exterior año II número 11. México. Disponible en línea en: <http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/689/7/RCE7.pdf>
- Muschler, R., 2004. Shade Management and its Effect on Coffee Growth and Quality. In: Wintgens, J. (Ed.), Coffee: growing, processing, sustainable production : A guidebook for growers, processors, traders, and researchers. Wiley-VCH, Corseaux, Switzerland, pp. 391-415.
- Programa Mundial de Alimentos (PMA). 2013. Evaluación rápida sobre el efecto de la roya del café en poblaciones vulnerables dependientes del sector en El Salvador. Disponible en línea en: http://es.wfp.org/sites/default/files/es/file/estudio_de_pma_sobre_roya_del_cafe_2013.pdf
- R Core Team. 2014. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>.
- Ramirez, Julian, y Andy Jarvis. 2010. "Disaggregation of Global Circulation Model Outputs." Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT, Cali, Colombia.
- Rivera, R; Silva, M. y Santos, M. 2003. El impacto de la crisis del café en El Salvador. Fundación Nacional para el Desarrollo. Disponible en línea en: <http://www.repo.funde.org/9/1/CRI-CAFE1.PDF.pdf>
- Robin, Xavier, Natacha Turck, Alexandre Hainard, Natalia Tiberti, Frédérique Lisacek, Jean-Charles Sanchez, y Markus Müller. 2011. "PROC: An Open-Source Package for R and S+ to Analyze and Compare ROC Curves." BMC Bioinformatics 12 (1): 77.
- Schroth, G.; Läderach, P.; Dempewolf, J.; Philpott, S.; Hagggar, J.; Eakin, H.; Castillejos, T.; Moreno, J.G.; Pinto, L.S.; Hernandez, R. 2009. Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 14(7): 605-625.
- Shi, Tao, y Steve Horvath. 2006. "Unsupervised Learning With Random Forest Predictors." Journal of Computational and Graphical Statistics 15 (1): 118–38. <https://doi.org/10.1198/106186006X94072>.
- Siles, P., 2007. Hydrological processes (water use and balance) in a coffee (Coffea arabica) monoculture and a coffee agroforestry plantation shaded by Inga densiflora in Costa Rica. Ph.D. Thesis, Université de Nancy.
- Somarriba E., Harvey C.A., Samper M., Anthony F., González J., Staver C. and Rice R.A. 2004. Biodiversity conservation in neotropical coffee (Coffea arabica) plantations. In: Schroth G., Fonseca G., Gascon C., Vasconcelos H., Izac A.M. and Harvey C. (Eds). Agroforestry and Conservation of Biodiversity in Tropical Landscapes. Island Press, Washington, pp. 198-226.
- Vaast, P., R. Van Kanten, P. Siles, B. Dzib, N. Frank, J. Harmand and M. Genard 2005. Shade: A Key Factor for Coffee Sustainability and Quality. Proceedings of the 20th International Congress on Coffee Research (ASIC) Bangalore, India. p 887-896
- van Kanten, R. and Vaast, P., 2006. Transpiration of Arabica Coffee and Associated Shade Tree Species in Sub-optimal, Low-altitude Conditions of Costa Rica. Agroforestry Systems, 67(2): 187-202.
- Virginio, E y Astorga, C. 2015. Prevención y control de la roya del café. Manual de buenas prácticas para técnicos y facilitadores. CATIE. Turrialba, Costa Rica.

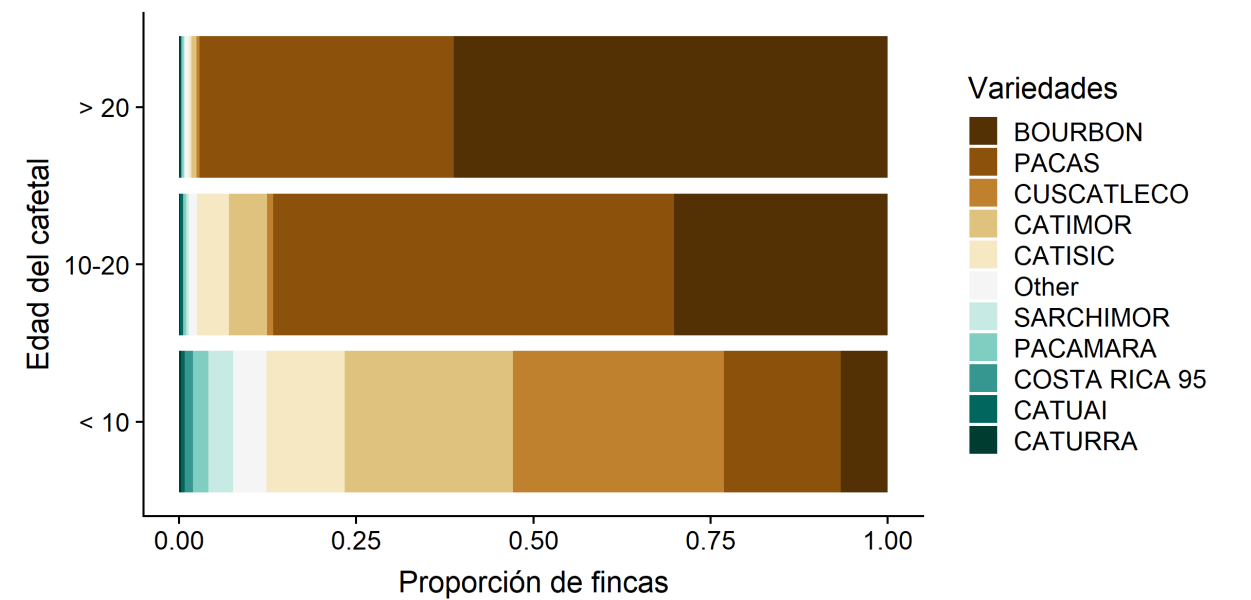
8. ANEXOS

Anexo 1. Bibliografía de tabla 4. “FINAL-Overview_Jha-Supplemental_Appendix_S1.pdf”.
Adjunto.

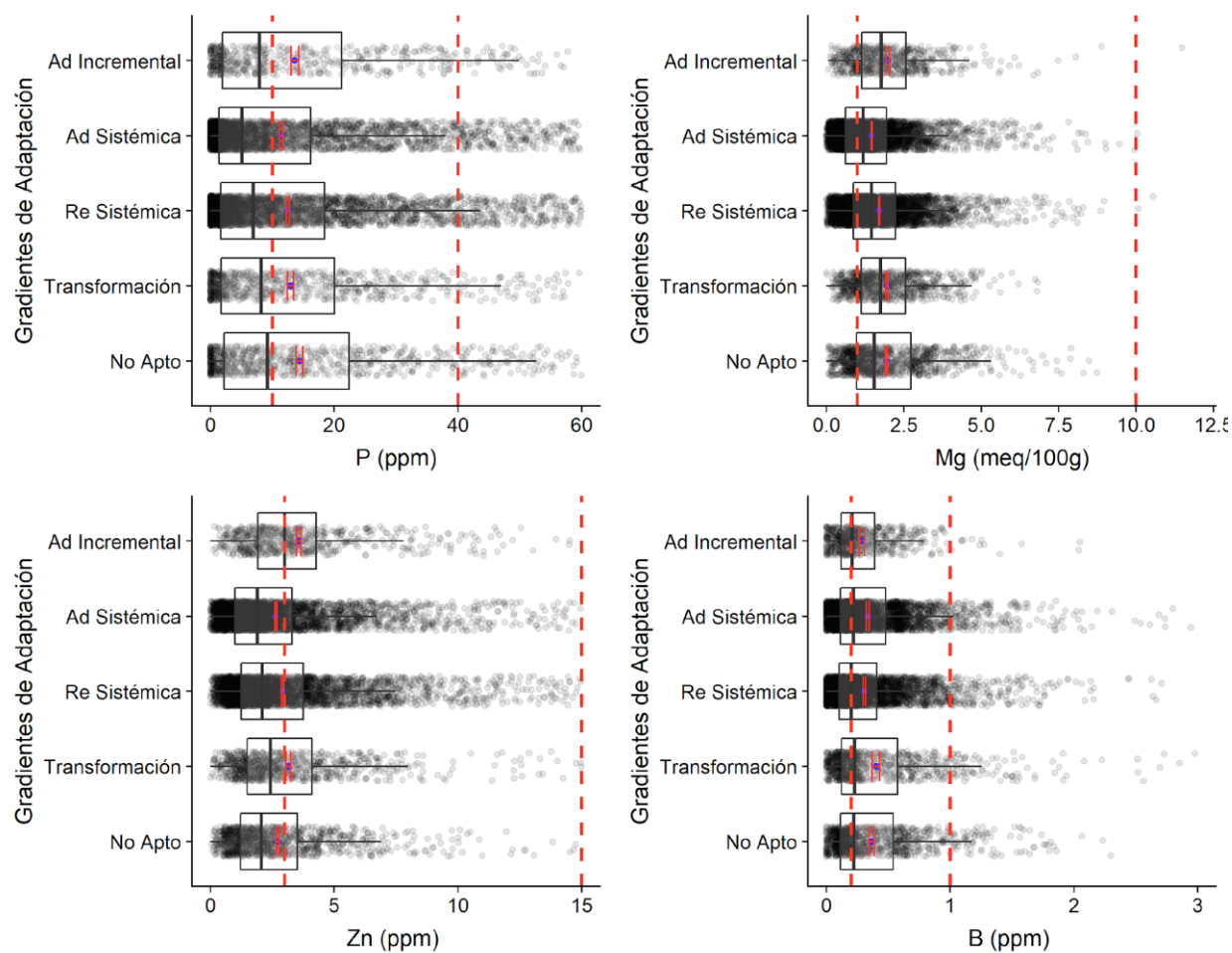
Anexo 2. Distribución de fincas con edades mayores a 20 años y fincas menores a 20 años en El Salvador, fuente base de datos de CENTA-Café.



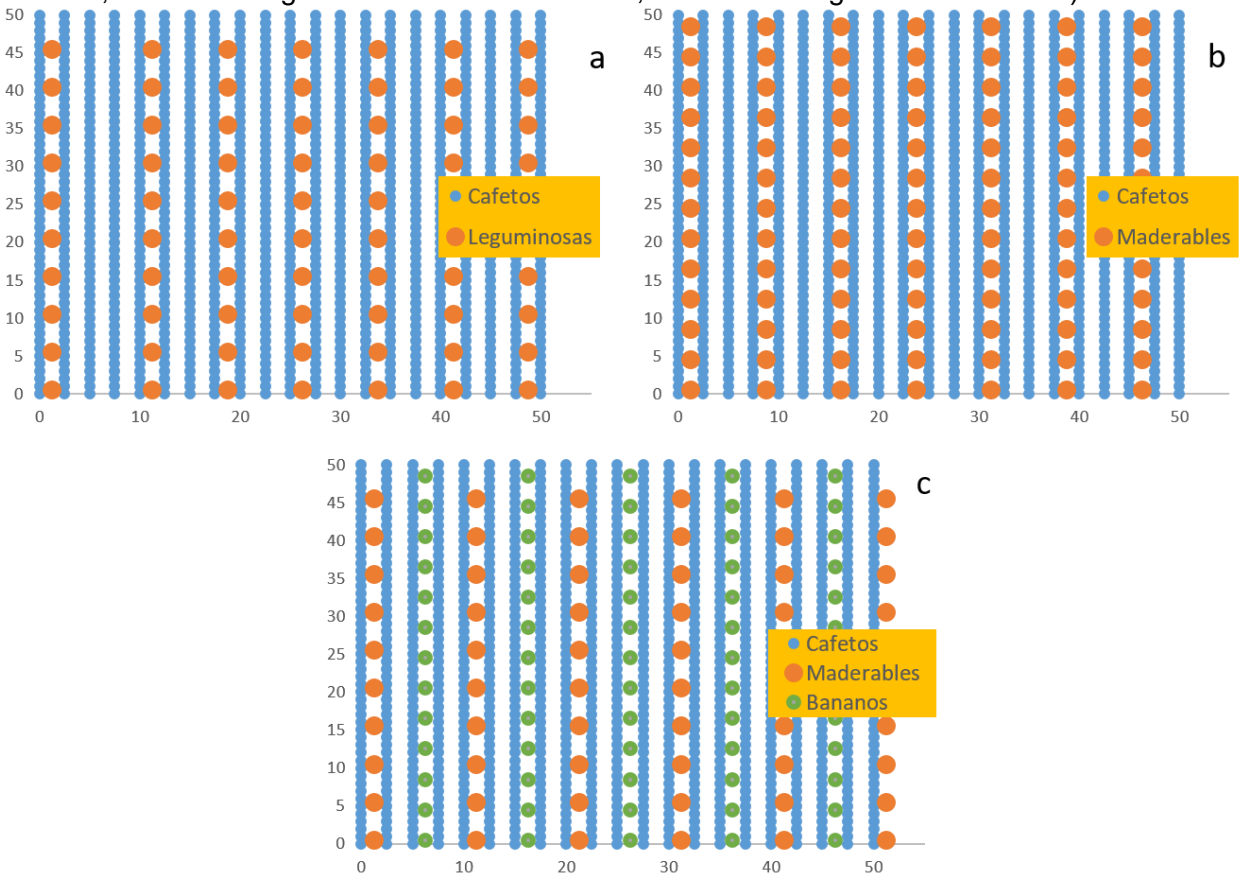
Anexo 3. Proporción de variedades de café por categorías de edad de la plantación en El Salvador, fuente base de datos de CENTA-Café.



Anexo 4. Contenidos de P, Mg, Zn y B en suelos cafetaleros en El Salvador, fuente base de datos de CENTA-Café. El P, Mg, Zn y B parecen ser los nutrientes más limitantes para la producción de café debido a su bajo contenido. Las líneas rojas delimitan los niveles críticos, puntos a la izquierda de la primera línea representan valores bajos, puntos entre las dos líneas sugiere niveles intermedios y puntos a la derecha de la segunda línea representan niveles sin limitaciones (osea que no necesitan este nutriente).



Anexo 5. Diagrama de plantación para los tres sistemas propuestos como medida de adaptación en cada zona de gradiente de adaptación (a: Sistema agroforestal con árboles de servicio, b: Sistema agroforestal con maderables, c: Sistemas agroforestal diverso).



Anexo 6. Flujo de caja de sistemas actuales sin renovación. Adjunto.

Anexo 7. Flujo de caja de sistemas renovados con *Inga sp* en zonas medias. Adjunto.

Anexo 8. Flujo de caja de sistemas renovados con *Inga sp* en zonas altas. Adjunto.

Anexo 9. Flujo de caja de sistemas agroforestales con maderables (Cedro).

Anexo 10. Flujo de caja de sistemas agroforestales con maderables (Laurel).

Anexo 11. Flujo de caja de sistemas agroforestales con maderables (Caoba).

Anexo 12. Flujo de caja de sistemas agroforestales diversos con maderables (Cedro) y musáceas.

Anexo 13. Flujo de caja de sistemas agroforestales diversos con maderables (Laurel) y musáceas.

Anexo 14. Flujo de caja de sistemas agroforestales diversos con maderables (Caoba) y musáceas.

Anexo 15. Rendimiento de café con base a fertilización del suelo y la edad de cafetal (fuente: base de datos de CENTA-Café).

