



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE PALTA HASS
MEDIANTE TÉCNICAS TRADICIONALES Y AGROECOLÓGICAS. CASO
DE ESTUDIO: ENSENADA LOS TILOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

JAVIERA ALEJANDRA PATRICIA ABRIGO LÓPEZ

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DIAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANDRÉS ROBLES REBOLLEDO
MARÍA ELENA LIENQUEO CONTRERAS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Fundación Somos Agua

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA
E INGENIERA CIVIL QUÍMICA
POR: **JAVIERA ALEJANDRA PATRICIA ABRIGO LÓPEZ**
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: FELIPE DIAZ ALVARADO

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE PALTA HASS MEDIANTE TÉCNICAS TRADICIONALES Y AGROECOLÓGICAS. CASO DE ESTUDIO: ENSENADA LOS TILOS

El planeta desde los años 70's ha visto como el equilibrio climático ha cambiado debido a la intervención humana. En Chile, el cultivo de palta se ha visto aumentado, lo que provoca efectos negativos en el agua disponible y la biodiversidad local al destruir los bosques nativos. Ante esto, las técnicas agroecológicas aparecen como una alternativa a las convencionales.

Es bajo este contexto que la Fundación Somos Agua junto con el centro de investigación Ensenada Los Tilos buscan hacer cambios en cómo funciona la agricultura para poder ofrecer alternativas sustentables al cultivo de palta. El presente estudio tiene como propósito evaluar el impacto ambiental de las prácticas agrícolas (convencionales y agroecológicas) llevadas a cabo en el cultivo de palta mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) identificando las etapas de mayor impacto ambiental, tomando como caso de estudio Ensenada Los Tilos.

Los resultados obtenidos indican que el manejo agroecológico presenta un menor impacto que el manejo convencional en las categorías de potencial de calentamiento global, uso de agua y eutrofización acuática. El manejo agroecológico presenta una diferencia del 83 % con respecto la convencional bajo la categoría de impacto a especies acuáticas.

Se realizaron dos análisis de sensibilidad. En el primero se sensibilizaron técnicas agrícolas resultando en que el cambio a fertilizantes agroecológicos es la técnica que produce mayores cambios reduciendo el impacto en un 78,67 % en relación al caso convencional. También se sensibilizó rendimientos y densidades de plantación, concluyendo que el cultivo intensivo es el que produce un mayor impacto por la elevada densidad de plantación y que un cultivo agroecológico captura carbono cuando se mide el cambio en las existencias de carbono.

El caso de estudio demostró tener un impacto medio entre el caso convencional y el agroecológico, lo que se relaciona con las técnicas que ha incorporado en su manejo, donde posee riego por goteo, incorpora la poda como *mulch*, preserva (y restaura) el bosque nativo, y utiliza fertilizantes sintéticos, plaguicidas y herbicidas. Se detecta como potencial cambio la sustitución de fertilizantes a unos de origen agroecológico lo que permitiría disminuir el impacto en un 30 %.

A modo de proyección, se recomienda realizar un ACV con datos de predios con manejos convencionales y agroecológicos con el fin de tener un análisis más robusto. Además, se destaca tener particular preocupación del rendimiento y calibre de la palta con el fin de proponer mejoras que sean atractivas para los agricultores.

*Mucha gente pequeña, en lugares pequeños,
haciendo cosas pequeñas pueden cambiar el mundo.*

Eduardo Galeano

Agradecimientos

A mi familia, por igual, pues sin su apoyo incondicional y su amor no hubiera llegado a donde estoy. Les desseo a todos que nunca nos falte tacto, tino ni criterio.

A mis amigos, los que conservo y los que ya no, cada uno me entregó experiencias que añoro. Reconocimiento especial a los *Lós cárá éh yégúá*, por siempre estar a mi lado aunque el tiempo y la distancia nos separe. A los *Vamoh a la playa*, por el cariño, apoyo y preocupación que nos tenemos, gracias por dejarme ser parte de esta amistad tan bonita.

A mis compañeros, por siempre estar dispuestos a cooperar, a enseñar y compartir.

A mis profesores, que me enseñaron y me guiaron para estar donde estoy ahora.

A los que ya no están, los guardo en mi corazón con especial cariño a cada uno de ustedes, gracias por todo.

A mi compañero de viaje.

A la Fundación Somos Agua, por darme la oportunidad de trabajar con ustedes.

Y a mi, por no rendirme, por aprender de los errores, por creer que podía, por mi esfuerzo y por atreverme.

Bendiciones

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
2. Antecedentes	4
2.1. Palta (<i>Persea americana</i>)	4
2.2. La palta en Chile y el mundo	6
2.2.1. Producción en Chile	8
2.3. Técnicas agroecológicas	10
2.3.1. Manejo del suelo	11
2.3.2. Uso del agua	11
2.3.3. Uso de agroquímicos	12
2.3.4. Técnicas agroecológicas a nivel mundial y local	12
2.4. Organizaciones	14
2.4.1. Centro de investigación Ensenada Los Tilos	14
2.4.2. Fundación Somos Agua	15
2.5. Análisis de Ciclo de Vida	15
2.5.1. Aplicaciones del ACV en la agricultura	17
2.5.2. Aplicaciones del ACV con técnicas agroecológicas	18
2.5.3. Aplicaciones del ACV en el cultivo de palta	19
3. Objetivo y alcance del estudio	20
3.1. Objetivo del estudio	20
3.2. Alcance del estudio	20
3.2.1. Casos de estudio	20
3.2.2. Unidad funcional	22
3.2.3. Límites del sistema	23
3.2.4. Calidad de los datos	24
3.2.5. Categorías de impacto	24
4. Análisis de inventario	29
4.1. Datos del sistema	29
4.1.1. Caso convencional	30
4.1.2. Caso agroecológico	32
5. Evaluación de Potencial de Calentamiento Global	35
5.1. Factores de emisión	35
5.1.1. Fertilizantes	36
5.1.2. Agroquímicos	36

5.1.3.	Quema de residuos agrícolas	37
5.1.4.	Matriz energética	37
5.1.5.	Transporte	37
5.1.6.	Cambio en las existencias de carbono	38
5.2.	Cuantificación del impacto	38
5.3.	Cuantificación del impacto IPCC	42
6.	Evaluación del uso de agua	47
6.1.	Factores de emisión	47
6.1.1.	Huella azul y verde	47
6.1.2.	Huella gris	48
6.1.3.	Huella indirecta	48
6.2.	Cuantificación del impacto	50
7.	Evaluación de la eutrofización acuática	56
7.1.	Factores de emisión	56
7.1.1.	Fertilizantes	57
7.2.	Cuantificación del impacto	57
8.	Normalización	62
9.	Análisis de sensibilidad	66
9.1.	Técnicas agrícolas	66
9.1.1.	Evaluación del Potencial de Calentamiento Global	67
9.1.2.	Evaluación del uso de agua	72
9.1.3.	Evaluación de la eutrofización acuática	76
9.1.4.	Normalización	78
9.2.	Rendimientos y densidades de plantación	80
9.2.1.	Evaluación del Potencial de Calentamiento Global	81
9.2.2.	Evaluación del uso de agua	84
9.2.3.	Evaluación de la eutrofización acuática	87
9.2.4.	Normalización	89
10.	Caso de estudio: Ensenada Los Tilos	92
10.1.	Evaluación de Potencial de Calentamiento Global	93
10.2.	Evaluación del uso de Agua	97
10.3.	Evaluación de la eutrofización acuática	99
10.4.	Normalización	101
11.	Discusiones generales	103
12.	Conclusiones y proyecciones	107
	Anexos	121
	Anexo A. Entrevistas	121
	Anexo B. Supuestos y consideraciones generales	123
B.1.	Proporción de riego	123

B.2. Pesticida y herbicida	124
B.2.1. Pesticida	124
B.2.2. Herbicida	124
B.3. Preparación microorganismos de montaña (MM) [157]	125
B.3.1. Recolección de MM	125
B.3.2. MM sólido (MMS)	125
B.3.3. MM líquido (MML)	126
Anexo C. Potencial de calentamiento global	127
C.1. Uso agrícola	127
C.2. Transporte	128
C.3. Producción de insumos	131
C.4. Emisiones de N ₂ O directas	132
C.5. Emisiones de N ₂ O indirectas	133
C.5.1. Volatilización	134
C.5.2. Lixiviación/Escurrimiento	134
C.6. Cambio en las existencias de carbono	135
C.6.1. Tierras convertidas a tierras de cultivo	135
C.6.1.1. Biomasa	135
C.6.1.2. Materia orgánica muerta	137
C.6.1.3. Carbono del suelo	138
C.6.2. Tierras de cultivo permanecen como tal	138
C.6.2.1. Biomasa	138
C.6.2.2. Materia orgánica muerta	140
C.6.2.3. Carbono del suelo	141
C.7. Quema de residuos agrícolas	141
C.8. Resultados	143
Anexo D. Uso de agua	144
D.1. Huella Azul y Huella Verde	144
D.2. Huella Hídrica Gris	150
D.3. Huella Hídrica Indirecta	151
Anexo E. Eutrofización Acuática	153
Anexo F. Normalización	155
Anexo G. Análisis de sensibilidad: Técnicas agrícolas	158
G.1. M1: Fertilizantes	159
G.2. M2: Gestión de residuos	160
G.3. M3: Riego	161
G.4. M4: Bosque nativo	162
G.5. Normalización	163
Anexo H. Análisis de sensibilidad: Rendimientos y densidades de plantación	164
H.1. E1: R1D1	164
H.2. E2: R2D2	165

Índice de Tablas

3.1.	Caracterización caso convencional y agroecológico.	23
3.2.	Factor de potencial de calentamiento global [78].	26
3.3.	Factor de caracterización para eutrofización acuática [85].	28
4.1.	Insumos utilizados en el caso convencional.	30
4.2.	Datos caso convencional etapa plantación.	30
4.3.	Datos caso convencional etapa crecimiento.	31
4.4.	Datos caso convencional etapa mantenimiento.	31
4.5.	Datos caso convencional etapa cosecha.	31
4.6.	Datos caso convencional etapa distribución.	32
4.7.	Datos caso agroecológico etapa plantación.	32
4.8.	Datos caso agroecológico etapa crecimiento.	33
4.9.	Datos caso agroecológico etapa mantenimiento.	33
4.10.	Datos caso agroecológico etapa cosecha.	34
4.11.	Datos caso agroecológico etapa distribución.	34
5.1.	Factores de emisión por fertilizantes.	36
5.2.	Factores de emisión por agroquímicos.	36
5.3.	Factores de emisión por quema de residuos agrícolas.	37
5.4.	Factores de emisión por matriz energética.	37
5.5.	Factores de emisión por transporte.	37
5.6.	Factores de emisión y datos para el cambio en las existencias de C.	38
5.7.	Impacto ambiental total bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global.	39
5.8.	Impacto ambiental total de la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global bajo las directrices del IPCC.	43
6.1.	Datos para cálculo HH azul y verde.	48
6.2.	Datos para cálculo HH gris.	49
6.3.	Datos para cálculo HH indirecta.	49
6.4.	Impacto ambiental total bajo la categoría de impacto de uso de agua.	50
7.1.	Factores de emisión por fertilizante.	57
7.2.	Impacto ambiental total bajo la categoría de impacto de eutrofización acuática.	57
8.1.	Factores de normalización para el ecosistemas de agua fresca según ReCiPe 2016 v1.1.	62
8.2.	Impacto ambiental total normalizada.	63
9.1.	Impacto ambiental total de las medidas bajo la categoría de Potencial de Calentamiento Global.	67
9.2.	Impacto ambiental total de medidas bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global bajo las directrices del IPCC.	69
9.3.	Impacto ambiental total de medidas bajo la categoría de impacto de uso de agua.	72

9.4.	Impacto ambiental total de medidas bajo la categoría de impacto de eutrofización acuática.	76
9.5.	Impacto ambiental total de medidas normalizada.	78
9.6.	Impacto ambiental total de escenarios bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global.	81
9.7.	Impacto ambiental total de escenarios bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global bajo las directrices del IPCC.	83
9.8.	Impacto ambiental total de escenarios bajo la categoría de impacto de uso de agua.	84
9.9.	Impacto ambiental total de escenarios bajo la categoría de impacto de eutrofización acuática.	87
9.10.	Impacto ambiental total de escenarios normalizada.	89
10.1.	Caracterización caso de estudio.	93
10.2.	Impacto ambiental total del caso de estudio bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global.	93
10.3.	Impacto ambiental total del caso de estudio bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global bajo las directrices del IPCC.	95
10.4.	Impacto ambiental total del caso de estudio bajo la categoría de impacto de uso de agua.	97
10.5.	Impacto ambiental total del caso de estudio bajo la categoría de impacto de eutrofización acuática.	100
10.6.	Impacto ambiental total del caso de estudio normalizada.	101
B.1.	Porcentaje de cobertura según fase del cultivo de palta.	123
B.2.	Años establecidos para cada etapa y porcentaje de riego correspondiente.	123
B.3.	Datos Winspray®.	124
B.4.	Datos Roundup®.	124
B.5.	Insumos para la elaboración de MMS	126
B.6.	Insumos para la elaboración de MML	126
C.1.	Caracterización del tipo de transporte.	129
C.2.	Caracterización del tipo de combustible.	129
C.3.	Transporte de insumos y distribución caso Convencional.	130
C.4.	Transporte de insumos y distribución caso Agroecológico.	131
C.5.	Resultados del potencial de calentamiento global por etapas para el caso convencional. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	143
C.6.	Resultados del potencial de calentamiento global por etapas para el caso agroecológico. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	143
D.1.	Fase del cultivo y coeficiente del cultivo del palto (K_c).	145
D.2.	Valores de ET_0 y P_p utilizados en el estudio.	145
D.3.	Valores de ET_c y P_{pef} para la etapa de crecimiento del caso convencional.	146
D.4.	Valores de ET_c y P_{pef} para la etapa de mantención del caso convencional.	146
D.5.	Valores de ET_c y P_{pef} para la etapa de crecimiento del caso agroecológico.	147
D.6.	Valores de ET_c y P_{pef} para la etapa de mantención del caso agroecológico.	147
D.7.	Valores de Huella Hídrica Verde y Azul para la etapa de crecimiento del caso convencional.	148

D.8.	Valores de Huella Hídrica Verde y Azul para la etapa de mantención del caso convencional.	149
D.9.	Valores de Huella Hídrica Verde y Azul para la etapa de crecimiento del caso agroecológico por hectárea al año.	149
D.10.	Valores de Huella Hídrica Verde y Azul para la etapa de mantención del caso agroecológico por hectárea al año.	149
D.11.	Valores de Huella Hídrica Gris para el caso convencional. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	150
D.12.	Valores de Huella Hídrica Gris para el caso agroecológico. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	151
D.13.	Valores de Huella Hídrica Indirecta para el caso convencional. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	152
D.14.	Valores de Huella Hídrica Indirecta para el caso agroecológico. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	152
E.1.	Valores de Eutrofización acuática del caso convencional. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	153
E.2.	Valores de Eutrofización acuática del caso agroecológico. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	154
F.1.	Factores de normalización para el ecosistemas de agua fresca según ReCiPe 2016 v1.1 [143].	155
F.2.	Valores de Eutrofización acuática del caso convencional y agroecológico.	156
G.1.	Datos caso convencional etapa crecimiento.	159
G.2.	Datos caso convencional etapa mantenimiento.	159
G.3.	Resultados por categoría de impacto y etapa para la medida 1 de cambio de fertilizantes.	160
G.4.	Datos caso convencional etapa mantenimiento.	160
G.5.	Resultados por categoría de impacto y etapa para la medida 2 de cambio de gestión de residuos.	161
G.6.	Datos caso convencional etapa crecimiento.	161
G.7.	Datos caso convencional etapa mantenimiento.	162
G.8.	Resultados por categoría de impacto y etapa para la medida 3 de cambio de sistema de riego.	162
G.9.	Resultados por categoría de impacto y etapa para la medida 4 de preservación de bosque nativo.	163
G.10.	Resultados normalizados para las medidas sensibilizados.	163
H.1.	Resultados por categoría de impacto y etapa para el escenario 1 de cambio de rendimiento y densidad del caso convencional.	165
H.2.	Resultados por categoría de impacto y etapa para el escenario 2 de cambio de rendimiento y densidad del caso agroecológico.	165
I.1.	Datos caso de estudio etapa plantación.	166
I.2.	Datos caso de estudio etapa crecimiento.	166
I.3.	Datos caso de estudio etapa mantenimiento.	167
I.4.	Datos caso estudio etapa cosecha.	167
I.5.	Datos caso estudio etapa distribución.	167
I.6.	Transporte de insumos y distribución caso de estudio.	168
I.7.	Resultados por categoría de impacto y etapa para el caso de estudio: Ensenada Los Tilos.	168

Índice de Ilustraciones

1.1.	Comparación de técnicas de cultivo convencionales (izquierda) y agroecológicas (derecha). Fuente: Elaboración propia.	2
2.1.	Unidades mínimas de nutrientes requeridas para la nutrición del huerto en distintos niveles de rendimiento total. Fuente: Zolezzi y Abarca (2017).	5
2.2.	Evolución de la producción y superficie mundial de palta (1968-2016). Fuente: Elaborado por Odepa a partir de datos de FAOSTAT, Julio 2018. Rescatado de Muñoz (2018).	6
2.3.	Chile: evolución de la superficie de palto por región durante el período 2011-2017 (hectáreas). Fuente: Elaborado por Odepa a partir de los datos del Catastro frutícola Odepa-Ciren. Rescatado de Muñoz (2018).	7
2.4.	Chile: distribución de la superficie de Palto por provincia, 2017. Fuente: Elaborado por Odepa a partir de los datos del Catastro fruticola Odepa-Ciren. Rescatado de Muñoz (2018).	7
2.5.	Efecto del agua aplicada sobre el rendimiento del palto (a) y calibre de la fruta variedad Hass (b). Fuente: Datos proyecto Fontagro y Faber et al. (1995). Rescatado de Fontagro (2017).	9
2.6.	Relación entre la evapotranspiración aplicada en los 126 huertos encuestados durante tres temporadas y el agua aplicada. Fuente: Datos proyecto Fontagro. Rescatado de FONTAGRO (2017).	10
2.7.	Evolución de superficie orgánica y % del total de tierras agrícolas período 1999-2017. Fuente: Eguillor (2020).	13
2.8.	Superficie agrícola cultivada orgánica de las especies de frutales mayores de la temporada 2019, en hectáreas. Fuente: Servicio Agrícola Ganadero (SAG) (2019).	13
2.9.	Límites del sistema usualmente utilizados en un Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: Elaboración propia, basado en Gerarden et. al. (2015) y Strezov et. al. (2021).	16
2.10.	Descripción general de las categorías de impacto y su relación con las áreas de protección. Fuente: Modificado de Strezov et. al. (2021).	17
3.1.	Etapas del proceso. Fuente: Elaboración propia.	21
3.2.	Límites del sistema. Fuente: Elaboración propia.	23
3.3.	Principales fuentes de emisión/absorciones de GEI y procesos en sistemas gestionados. Fuente: IPCC (2006).	25
3.4.	Huella Hídrica del sector agrícola. Fuente: Fundación Chile (2016).	27
5.1.	Diagrama emisiones gaseosas para el cálculo del Potencial de Calentamiento Global. Fuente: Elaboración propia.	35
5.2.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas del caso convencional y el caso agroecológico.	39
5.3.	Diagrama de bloques de las emisiones emitidas por etapas para la categoría de Potencial de Calentamiento Global.	40

5.4.	Resultados del Potencial de Calentamiento Global por actividad para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	41
5.5.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas del caso convencional y el caso agroecológico siguiendo las directrices del IPCC.	44
5.6.	Diagrama de bloques de las emisiones emitidas por etapas para la categoría de Potencial de Calentamiento Global, siguiendo las directrices del IPCC.	44
5.7.	Resultados del Potencial de Calentamiento Global según las directrices del IPCC por actividad para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	45
6.1.	Diagrama de flujo de agua para el cálculo del uso de agua. Fuente: Elaboración propia.	47
6.2.	Comparación del uso de agua por etapas del caso convencional y el caso agroecológico.	51
6.3.	Diagrama de bloques de las emisiones emitidas por etapas para la categoría de uso de agua.	51
6.4.	Resultados del uso de agua por actividad para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, total (.1) y específico para emisiones menores a 1 m ³ (.2), para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	52
6.5.	Resultados del uso de agua por tipo de huella para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	53
7.1.	Diagrama emisiones gaseosas para el cálculo del Eutrofización acuática. Fuente: Elaboración propia.	56
7.2.	Comparación de la eutrofización acuática por etapas del caso convencional y el caso agroecológico.	58
7.3.	Diagrama de bloques de las emisiones emitidas por etapas para la categoría de eutrofización acuática.	59
7.4.	Resultados de la eutrofización acuática por aplicación de nutrientes para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.	59
8.1.	Desglose del impacto normalizado por categoría estudiada para el caso convencional y agroecológico.	63
8.2.	Resultados normalizados donde se comparan los casos convencional y agroecológico.	64
9.1.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas de las medidas analizadas. Base de comparación caso convencional.	67
9.2.	Resultado del Potencial de Calentamiento Global por actividad de las medidas analizadas. (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.	68
9.3.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas de las medidas analizadas siguiendo las directrices del IPCC.	70
9.4.	Resultados del Potencial de Calentamiento Global por actividad de las medidas analizadas siguiendo las directrices del IPCC. (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.	71

9.5.	Comparación del uso de agua por etapas de las medidas analizadas.	73
9.6.	Resultados del uso de agua por etapas de las medidas analizadas, por tipo de huella. (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.	74
9.7.	Resultados del uso de agua por actividad por etapas de las medidas analizadas, total (.1) y específico para emisiones menores a 1 m ³ (.2). (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.	75
9.8.	Comparación de la eutrofización acuática por etapas de las medidas analizadas.	77
9.9.	Resultados de la eutrofización acuática por etapas de las medidas analizadas por aplicación. (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.	78
9.10.	Resultados normalizados donde se comparan las medidas analizadas.	79
9.11.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas de los escenarios sensibilizados.	81
9.12.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por actividad de los escenarios sensibilizados.	82
9.13.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas de los escenarios sensibilizados siguiendo las directrices del IPCC.	83
9.14.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por actividad de los escenarios sensibilizados siguiendo las directrices del IPCC.	84
9.15.	Comparación del uso de agua por etapas de los escenarios sensibilizados. . . .	85
9.16.	Comparación del uso de agua por actividad de los escenarios sensibilizados, total (a) y específico para emisiones menores a 3 m ³ (b).	86
9.17.	Comparación del uso de agua por tipo de huella de los escenarios sensibilizados, todas las huellas (a) y sin huella gris (b).	87
9.18.	Comparación de la eutrofización acuática por etapas de los escenarios sensibilizados.	88
9.19.	Comparación de la eutrofización acuática por actividad de los escenarios sensibilizados.	88
9.20.	Resultados normalizados por etapas donde se comparan los escenarios sensibilizados.	89
10.1.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas del caso de estudio con el caso convencional y agroecológico.	94
10.2.	Resultados del Potencial de Calentamiento Global por actividad del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.	95
10.3.	Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico siguiendo las directrices del IPCC.	96
10.4.	Resultados del Potencial de Calentamiento Global por actividad del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico, siguiendo las directrices del IPCC.	96
10.5.	Comparación del uso de agua por etapas del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.	97
10.6.	Resultados del uso de agua por tipo de huella del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.	98
10.7.	Comparación del uso de agua por actividad del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.	99

10.8.	Comparación de la eutrofización acuática por etapas del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.	100
10.9.	Resultados de la eutrofización acuática por aplicación del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.	101
10.10.	Resultados normalizados donde se compara el caso de estudio con el convencional y agroecológico.	102
F.1.	Desglose del impacto normalizado por categoría de impacto y actividad para el caso convencional.	156
F.2.	Desglose del impacto normalizado por categoría de impacto y actividad para el caso agroecológico.	157

Capítulo 1

Introducción

Desde los años 70's el planeta ha estado sufriendo cambios en su equilibrio climático debido a la intervención humana [1]. La sobre emanación de gases de efecto invernadero (GEI) ha hecho que el sistema biológico necesario para capturarlo no de abasto, llevando al planeta a lo que se a denominado como *cambio climático*. La convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) lo ha definido en su artículo 1 como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” [2].

Ahora, según el articulo 48 de la CMNUCC, Chile se considera como un país “altamente” vulnerable frente al cambio climático debido a su geografía al contar con áreas de borde costero de baja altura, áreas áridas, semiáridas y de bosques, áreas propensas a sequía y desertificación, por nombrar algunas [3]. Es justamente en el último punto donde se ve golpeada la agricultura, esta ve disminuida la disponibilidad del recurso hídrico, lo que lleva a la disminución de los terrenos de cultivos, especialmente en el centro del país, lo cual se refleja en una baja en la productividad y en una reducción de la calidad de los productos, afectando no sólo el consumo local sino también las exportaciones [4].

Sin ir más lejos, en la zona central del país, se ha declarado emergencia agrícola por el déficit de un 70 % en las precipitaciones en 2019 [5][6]. En el 2020, el déficit hídrico se mantuvo a pesar del aumento en las precipitaciones en comparación al año 2019, reflejando que este fenómeno tiene otras causas a parte de la baja en las precipitaciones y es la sobreexplotación de los terrenos agrícolas [7].

Es precisamente en la zona centro del país donde se concentra cerca del 70 % del cultivo de palta a nivel nacional [8], fruto que se ha caracterizado por el alto consumo de agua, alrededor de 50 % más que otros frutales como el manzano y duraznero [9]. Esto a llevado a que las grandes empresas agrícolas construyan pozos de extracción de agua a más de 100 metros de profundidad para llegar a napas subterráneas, dejando sin agua a la comunidad y a los pequeños agricultores [6]. Además, al buscar expandir la zona de cultivo por el incremento en la demanda mundial del fruto, se comenzó a plantar en las laderas de los cerros. Si bien esta práctica protege al cultivo de las heladas, se debe invertir en maquinaria para subir el agua de regadío y destruye el bosque nativo de la zona [6]. Es bajo este escenario que instituciones como la Fundación Somos Agua y el centro de investigación Ensenada Los Tilos buscan ha-

cer cambios en las prácticas agrícolas para ofrecer alternativas sustentables al cultivo de palta.

La Fundación Somos Agua tiene como propósito “promover el desarrollo sostenible y regenerativo del recurso hídrico” [10]. La fundación tiene su centro de investigación en Ensenada Los Tilos, ubicado en la comuna de Hijuelas en la región de Valparaíso, que está principalmente dedicado al cultivo de paltas [11]. El centro de investigación junto a la fundación se han propuesto aplicar técnicas agroecológicas para disminuir el impacto ambiental del cultivo de paltas. Entre ellas, destaca la búsqueda de un uso más eficiente del recurso hídrico, la disminución del uso de agroquímicos, y la regeneración y protección del bosque nativo.

Las técnicas convencionales y agroecológicas se diferencian en los recursos que se utilizan para fertilizar y tratar plagas, donde el proceso convencional se basa en el uso de fertilizantes sintéticos y agroquímicos, lo que genera diversos problemas a la tierra, agua y a la salud de las personas; mientras que en el manejo agroecológico, los recursos utilizados para fertilizar y tratar plagas son de origen orgánico, como compost que se hace con los restos orgánicos del predio y el uso de insectos para controlar las plagas. Estas semejanzas se aprecian en la Figura 1.1, que presenta las diferencias entre las técnicas convencionales y las agroecológicas del cultivo de palta.

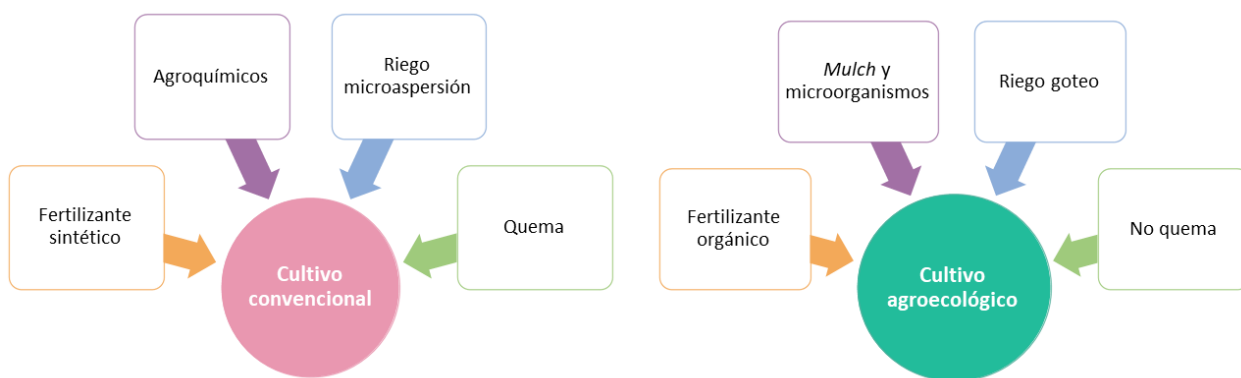


Figura 1.1: Comparación de técnicas de cultivo convencionales (izquierda) y agroecológicas (derecha). Fuente: Elaboración propia.

A priori, las medidas agroecológicas se presentan como una alternativa a las convencionales donde el efecto negativo sobre el suelo, agua y atmósfera se ve disminuido, sin embargo, no hay estudios que demuestren dicho efecto sobre el cultivo de palta Hass en Chile.

El presente estudio tiene como propósito evaluar el impacto ambiental de las prácticas agrícolas llevadas a cabo en el cultivo de palta (convencionales y agroecológicas) mediante un Análisis de Ciclo de Vida tomando como caso de estudio el centro de investigación Ensenada Los Tilos ubicado en la comuna de Hijuelas, en la región de Valparaíso. Se busca responder: 1) ¿Cuáles son las categorías de impacto¹ ambiental más importantes a estudiar en el cultivo de palta Hass?, 2) ¿Cuál de los cultivos y técnicas en estudio presenta un menor impacto

¹ Categorías de impacto: clase que representa asuntos ambientales de interés a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida (ISO 14046:2014, subcláusula 3.3.11) [12].

ambiental en las categorías de impacto seleccionadas?, 3) ¿Cuál es el impacto ambiental de Ensenada Los Tilos?

1.1. Objetivos

El objetivo general y los objetivos específicos del trabajo, se presentan a continuación.

Objetivo General

Evaluar los procesos de producción convencional, agroecológica y en transición agroecológica de Ensenada Los Tilos de palta Hass por medio de un Análisis de Ciclo de Vida.

Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar las diferentes prácticas agrícolas del cultivo de palta Hass.
- Realizar un análisis de inventario del cultivo tradicional y agroecológico, y del cultivo en transición agroecológica en Ensenada Los Tilos, identificando datos de operación y factores de emisión.
- Cuantificar el impacto ambiental de la producción convencional y agroecológica, y del cultivo en transición agroecológica de palta Hass en Ensenada Los Tilos mediante un Análisis de Ciclo de Vida.
- Analizar la sensibilidad de los resultados a las diversas prácticas agroecológicas de la producción de paltas para jerarquizar su impacto ambiental identificando aquellas más significativas en términos de impacto ambiental.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Palta (*Persea americana*)

La palta (*Persea americana*) es un fruto originario de México y Centroamérica [13]. Existen tres razas de palta: Mexicana, Guatemalteca y Antillana, siendo Hass, procedente de la raza Guatemalteca, la variedad más cotizada en los mercados internacionales [8]. Esta viene de California y se caracteriza por su piel morada negruzca, su forma ovalada y su pulpa verde pálida [14]. Esta posee hidratos de carbono, vitaminas, fibra, agua, minerales y grasa mayoritariamente monoinsaturada (grasa saludable) [14].

Para ser cultivada apropiadamente, la palta debe estar a temperaturas entre los 17 y 24°C, en lugares con regímenes de lluvia entre 1.000 a 2.000 mm, protegidos del viento y de heladas [15].

Para propagar el frutal, se utiliza la semilla del fruto, la cual se planta directamente en recipientes para su crecimiento y posterior traslado al suelo. Debido a su alta heterocigosis¹, las plantas de semilla son altamente variables por lo que, para conservar la uniformidad de la plantación, el plantín se debe injertar con la variedad seleccionada [17]. Cuando ya el injerto presenta brotes y el plantín alcanza 60 cm de altura, esta es plantada en el suelo [17]. Se recomienda que sea en primavera para evitar el peligro de las heladas [17].

La plantación suele realizarse en distancias (en metros) de 6x4 y 6x6, obteniendo una densidad de 417 y 319 árboles/ha, respectivamente [17]. Desde este punto en adelante, el árbol comienza a crecer (etapa de crecimiento) hasta alcanzar la altura y follaje de un árbol adulto en aproximadamente 5 años, donde pasa a la etapa de mantenimiento que puede llegar a 50 años [17]. Dentro de esta última etapa, se presentan prácticas como la poda, que regula la altura del árbol y elimina ramas secas y enfermas; y el anillado, que evita la alternancia productiva, acelerando la floración y aumentando la fructificación [17].

En relación al riego, el palto necesita tener el terreno constantemente húmedo, al tener la gran parte de la masa radicular en los primeros 60 cm del suelo, se debe hacer un riego más bien superficial [17]. La cantidad de agua que requiere el árbol va aumentando con el desarrollo de este, hasta estabilizarse en la etapa adulta [13].

¹ Heterocigosis: formación de híbridos por unión de cigotos desiguales [16].

La fertilización del palto es fundamental para tener un árbol sano y una buena producción. Los macronutrientes como nitrógeno (N), potasio (K) y fósforo (P) son fundamentales para el crecimiento de brotes, flores y frutos [13]. Las unidades mínimas de nutrientes requeridas para distintos niveles de producción se presentan en la Figura 2.1. En general, se considera que el palto es una especie que requiere una baja cantidad de nutrientes cuando se contrasta con el cultivo de otros frutales como manzano, cítrico y bananero [18].

kg/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
5.000	41	12	65
6.000	49	15	79
7.000	57	17	92
8.000	65	20	105
9.000	74	22	118
10.000	82	25	131
11.000	90	27	144
12.000	98	29	157
13.000	106	32	170
14.000	115	34	183
15.000	123	37	196
20.000	164	49	262
25.000	205	61	327

Figura 2.1: Unidades mínimas de nutrientes requeridas para la nutrición del huerto en distintos niveles de rendimiento total. Fuente: Zolezzi y Abarca (2017).

Las plagas y enfermedades que puede afectar al palto se dan por la presencia de: un agente fitopatógeno, un hospedero susceptible, un medio ambiente propicio y una práctica inadecuada [13]. Las plagas que más afectan al palto son: trips del palto (*Heliothrips haemorrhoidalis*), chanchitos blancos (*Pseudococcus calceolariae*), conchuela negra del olivo (*Saissetia oleae*) y arañita roja del palto (*Oligonychus yothersi*) [19]. Estas provocan principalmente daño en la apariencia del fruto que puede llegar a ser causa de rechazo de partidas para la exportación [18]. Las plagas son controladas por medio de la aplicación de plaguicidas [13] cuya aplicación depende del volumen del follaje [19]. La enfermedad más importante que afecta a los paltos es la Tristeza del Palto producida por el hongo *Phytophthora cinnamomi* [13]. Este hongo afecta a la raíces del árbol provocando la muerte de este, pues afecta a la absorción de agua y nutrientes [13]. Su control se basa principalmente en el uso de fungicidas [13].

2.2. La palta en Chile y el mundo

En el mundo el interés por la palta ha estado creciendo en los últimos años, pasando en un decenio de un consumo promedio anual de 0,56 kg por habitante a 0,74 kg por habitante al año, según el estudio realizado por Muñoz (2018). Algunos de los países que han visto aumentada su demanda son Estados Unidos, Países Bajos, Francia y Reino Unido [8].

Por lo que, de manera natural con el aumento del consumo, aumentó la producción y exportación de este fruto. De acuerdo con el estudio realizado por Muñoz (2018), el principal productor y exportador de paltas es México, quien abastece al 44 % del mercado mundial. El principal importador es Estados Unidos, que compra el 42 % de las paltas en el comercio internacional [8]. Se ha notado un crecimiento sostenido de una tasa media anual de 3,7 % en la producción desde 1966 hasta 2016, lo que se refleja en la cantidad de tierra de cultivo que se utiliza, pasando de 93.189 hectáreas a 563.913 hectáreas en 50 años [8], tal como lo muestra la Figura 2.2.

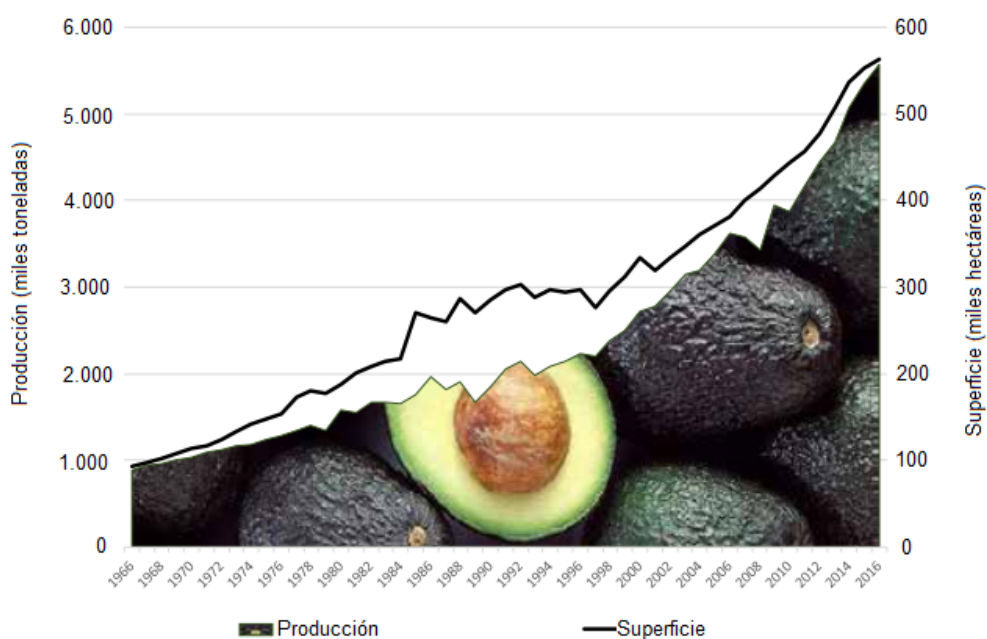


Figura 2.2: Evolución de la producción y superficie mundial de palta (1968-2016). Fuente: Elaborado por Odepa a partir de datos de FAOSTAT, Julio 2018. Rescatado de Muñoz (2018).

En el caso de Chile, al ser la palta una especie introducida, se han tenido que adaptar las condiciones del riego y terreno para poder cultivarla. Es por ello que el cultivo de este fruto, principalmente de la variedad Hass, se ubica entre las regiones de Coquimbo y O'Higgins, siendo la región de Valparaíso donde se concentra su producción [8][14] (ver Figura 2.3). La región de Valparaíso se caracteriza por una temperatura media anual de 15°C y precipitaciones que alcanzan los 450 mm al año [20].

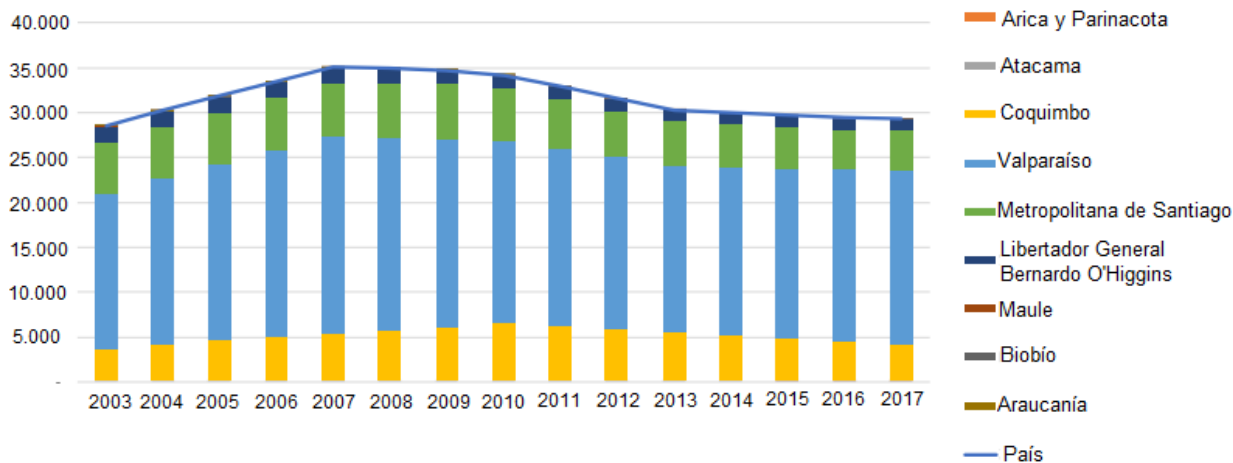


Figura 2.3: Chile: evolución de la superficie de palto por región durante el período 2011-2017 (hectáreas). Fuente: Elaborado por Odepa a partir de los datos del Catastro frutícola Odepa-Ciren. Rescatado de Muñoz (2018).

La principal provincia productora es la de Quillota, concentrando un 26% de la superficie nacional, seguida por Petorca con un 16% y San Felipe con un 15%, tal como se observa en la Figura 2.4, todas provincias de la Región de Valparaíso.

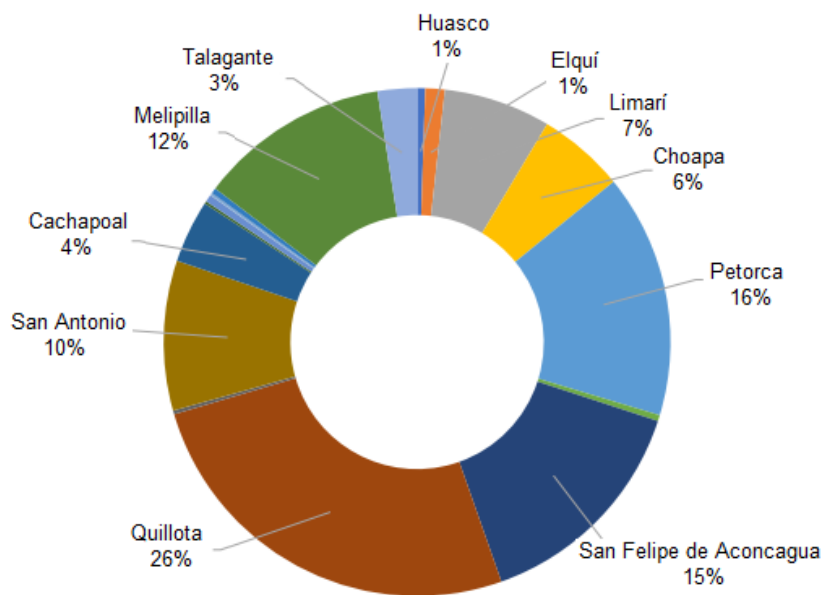


Figura 2.4: Chile: distribución de la superficie de Palto por provincia, 2017. Fuente: Elaborado por Odepa a partir de los datos del Catastro frutícola Odepa-Ciren. Rescatado de Muñoz (2018).

La provincia de Quillota la conforman las comunas de Quillota (capital provincial), La Cruz, La Calera, Nogales e Hijuelas [21]. Tiene una superficie de 1.113 km² [21] y posee una población de 203.277 habitantes [22]. Esta se caracteriza por tener veranos cálidos y secos, e inviernos fríos con un temperatura anual que va desde los 6°C a los 26°C [23].

Cerca del 20 % de los habitantes tiene un empleo ligado a la agricultura, ganadería, caza y silvicultura; siendo la mayor actividad económica de la zona seguida por el comercio al por mayor y por menor [22]. Esto se debe principalmente a que estos sectores son ocupados por mano de obra no calificada, donde en el sector agrícola el promedio de escolaridad es casi del 11 % según la encuesta Casen 2017 [22].

Quillota se abastece del río Aconcagua que tiene un caudal promedio de 25 m³ por segundo, además cuenta con agua de pozo en donde se estima una oferta de 15,1 m³ por segundo. Sin embargo, debido a la sequía esta no da abasto para el uso intensivo de agua de la agricultura y sectores como la minería, lo que ha llevado a adoptar políticas como el decreto de zona de escasez hídrica establecido por la Dirección General de Aguas en el 2018 que, entre otras cosas, le permitía “autorizar la extracción de aguas subterráneas desde cualquier punto, sin necesidad de contar con un permiso mayor de por medio” [22]. Es por ello que Cataldo et. al. (2019) propone soluciones como la incorporación de sistemas de acumulación de agua y mejorar la eficiencia de conducción, con tal de dar “sostenibilidad hídrica” a la agricultura actual y futura en la zona.

2.2.1. Producción en Chile

En la temporada 2019-2020 se produjeron alrededor de 168.000 toneladas de palta Hass en Chile, donde el 72 % de esta fue exportada a Europa, Estados Unidos, China y Argentina, principalmente; teniendo una producción estimada para la temporada 2020-2021 de 140.000 toneladas [24]. Esta gran producción se ha visto afectada por la sequía de la región, bajando su producción en un 30 % con respecto a la temporada 2016-2017 [24].

En Chile, la plantación promedio de paltos según ODEPA y CIREN (2020) consiste en un densidad aproximadamente de 700 plantas/ha con una producción promedio de 10 ton/ha. El cultivo en ladera se hace principalmente en camellones en sentido de la pendiente, como medida para mejorar la macroporosidad del suelo y así evitar problemas de asfixia radicular [18], sin embargo esta práctica lleva a un aumento en la erosión al perder la materia orgánica presente en el suelo [26]. Además, al ser el palto sensible a las bajas temperaturas, especialmente la variedad Hass cuya temperatura crítica es de -1,1°C (en comparación a la variedad Fuerte o Bacon que tienen una temperatura crítica de -2,7 y -4,4°C, respectivamente), este debe estar protegido de las heladas, lo que ha llevado a que la plantación en laderas sea una alternativa atractiva [18]. Esta práctica presenta ventajas solamente en lo que respecta el ámbito económico pues afecta a la fauna, flora y agua de manera negativa, por la eliminación del ambiente natural del lugar y por el uso excesivo de agua generando escasez en zonas aledañas [27].

Los requerimientos hídricos, en la temporada de plena producción, varían entre 8.000 a 10.000 m³ por hectárea [18]. Se ha reportado que los cultivos que se encuentran más al norte o a la cordillera los requerimientos hídricos pueden llegar a 18.000 m³ por hectárea al año. Un aspecto importante que destaca Lemus et al. (2010) es que hay que conocer el terreno donde se ha de plantar, las fuentes y el volumen disponible de agua, ya que de eso dependerá la frecuencia de riego pues, como se puede observar en la Figura 2.5, un mayor o menor riego afecta tanto el rendimiento del árbol como el calibre del fruto, produciendo menos y con menor calibre cuando se riega de más.

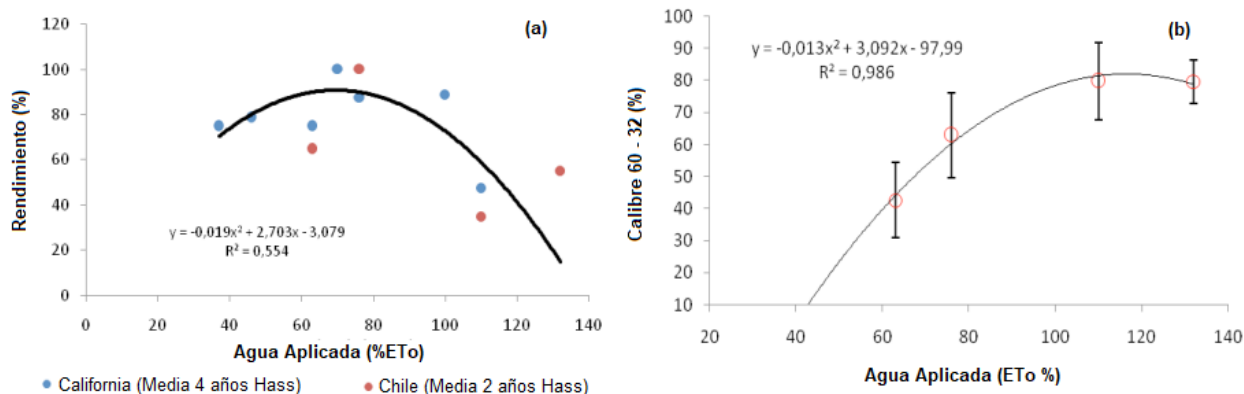


Figura 2.5: Efecto del agua aplicada sobre el rendimiento del palto (a) y calibre de la fruta variedad Hass (b). Fuente: Datos proyecto Fontagro y Faber et al. (1995). Rescatado de Fontagro (2017).

Además, se destaca que independientemente del tipo de riego (goteo o microaspersión), lo más común es encontrar el riego tecnificado con fertirrigación, que permite el aporte de fertilizantes como urea (fuente de nitrógeno) y ácido fosfórico (fuente de fósforo) por medio del riego a diferencia del riego tradicional donde los fertilizantes deben aplicarse antes del riego [18].

En Chile la principal enfermedad del palto es la Tristeza del Palto que llega a provocar la muerte del árbol [18]. Con respecto a las plagas, las principales observadas son el chanchito blanco, el trips y la arañita del palto [18]. El control de las plagas se hace mediante técnicas de monitoreo y registro, y el uso de pesticidas [18].

Con estos antecedentes se puede concluir que en Chile el cultivo de palta utiliza principalmente técnicas convencionales donde se destaca el uso de fertilizantes sintéticos y plaguicidas para controlar las enfermedades y plagas; el riego no controlado, como se observa en la Figura 2.6 donde de los 126 huertos encuestados, aproximadamente un 40 % presenta un riego excesivo y cerca de un 20 % un riego deficiente; y la plantación en ladera utilizando camellones que afecta la flora y fauna, y fomenta la erosión de la zona.

Se han realizado estudios con respecto al impacto de la producción de paltas, es así como según el Estudio de Huella de Carbono en Productos de Exportación Agropecuarios de Chile del 2010 realizado por el INIA, el cultivo de paltos en laderas capturan más CO_2 que el que genera su producción y consumo, es decir, el cultivo de este fruto en Chile es carbono positivo [29]. Sin embargo, tal como dice González (2011), este resultado hay que tomarlo con cautela pues puede ser un elemento negativo desde el punto vista de una huella ecológica [30], ya que si bien en términos de gases de efecto invernadero es favorable hay otros impactos como el volumen de agua necesaria por el frutal para crecer (que es mayor a la de otros frutales presentes en el país) y el uso de agroquímicos que afecta al ecosistema al incorporar toxinas a este. Si bien este último punto es común a la industria agrícola, estas prácticas que afectan al entorno del cultivo deben ser estudiadas.

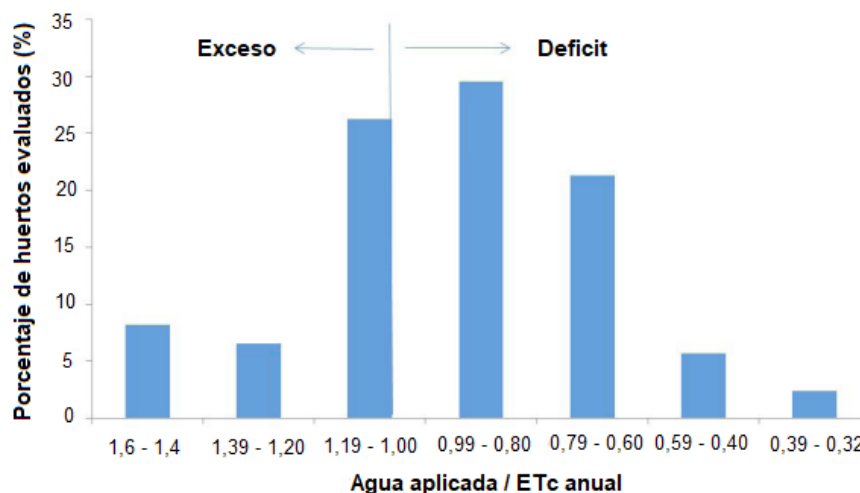


Figura 2.6: Relación entre la evapotranspiración aplicada en los 126 huertos encuestados durante tres temporadas y el agua aplicada. Fuente: Datos proyecto Fontagro. Rescatado de FONTAGRO (2017).

2.3. Técnicas agroecológicas

Los sistemas convencionales de producción agrícola han dañado la biodiversidad de lugares donde estas se han instaurado por años debido al uso excesivo de agua, plantar en monocultivos y el uso de químicos para tratar plagas y fertilizar [31]. Es por ello que como respuesta se han implementado algunas prácticas como la reducción de uso de agroquímicos, la rotación de cultivos, uso de plantas florales que atraen polinizadores, entre otras [31]. Estas técnicas pueden categorizarse en la *agroecología* que, según las palabras de Stephen R. Gliessman “es la aplicación de conceptos y principios ecológicos para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles”. Esta plantea que un agroecosistema se entiende como un espacio dinámico que responde a factores ecológicos, sociales y culturales [31].

Su origen se remonta a técnicas utilizadas por campesinos e indígenas en sus cultivos. En Chile este concepto surgió a inicios de los años 80’s donde las ONG fueron las protagonistas en impulsar esta nueva perspectiva a las tradicionales, si bien se han hecho cambios, la agricultura chilena sigue estando marcada por sistemas y prácticas convencionales [32].

Algunos de los principios agroecológicos [33] más relevantes para este trabajo se presentan en la siguiente lista:

1. Adaptar los sistemas agrícolas a los ambientes locales.
2. Minimizar y eliminar el uso de agrotóxicos.
3. Conservar los recursos (suelo, agua, semillas, cultura, etc.).
4. Mejorar y mantener el contenido de la materia orgánica, los minerales y la actividad biológica del suelo.

Estos sistemas, que muchas veces caen dentro de las prácticas orgánicas, presentan ciertas ventajas a los sistemas convencionales en relación a poder elevar el potencial productivo del

suelo, disminuir su erosión y generar condiciones para una mayor actividad biológica [34]. Generan un equilibrio ecológico que permite la disminución de enfermedades y el ataque de plagas [34].

La agroecología se ha de diferenciar de la agricultura denominada como orgánica que requiere de certificados y posee un enfoque ligado al cultivo buscando el no uso de insumos sintéticos y la mejora del agroecosistema [35]. La agroecología tiene un enfoque más integral, considerando aspectos medioambientales y socio-economicos además del técnico relacionado al cultivo propiamente tal.

2.3.1. Manejo del suelo

En la agricultura convencional, cerca del 40 % de los suelos agrícolas presentan algún grado de erosión y/o reducción de la fertilidad; estos cambios provocan modificaciones en los ciclos naturales del carbono, nitrógeno y fósforo [34].

Los cultivos agroecológicos utilizan diversas técnicas que permiten incorporar nutrientes al suelo sin desgastarlo y donde le aportan materia orgánica, como es el uso de compost, *mulch* o cubiertas vegetales², fertilizantes naturales (en lugar de los convencionales), entre otros [34]. Además, incorporan técnicas de sembrado que permite disminuir la escorrentía que erosiona los suelos [34].

Por otro lado, existe preocupación por la conservación de la biodiversidad nativa, por lo que se busca encontrar un equilibrio que permita el desarrollo de la agricultura sin afectar en demasía la fauna y flora presente en la zona. Es por ello que algunas técnicas ligadas a la agroecología buscan coexistir con estas especies encontrando beneficios en lo que es la polinización, control de plagas y, al no remover estas especies, conservación de la materia orgánica presente en el suelo [37].

Finalmente, se destaca el “Manejo Holístico” desarrollado por Alan Savory que es un sistema de planificación que se basa en los procesos ecosistemicos para permitir la regeneración de tierras [38], pues su manejo reduce la erosión y lixiviación de minerales [39]. Este manejo lleva a una mayor producción de hierba y carne (por el control de pastoreo), además de captar CO₂ al favorecer la conservación de la materia orgánica y el cuidado de la vegetación; y aumenta la capacidad de retención de agua [39].

2.3.2. Uso del agua

El uso del agua en sistemas convencionales ha llevado a generar ciertos problemas de anegamiento y salinidad a nivel mundial por el uso intensivo del riego [34]. En particular, la agricultura a afectado en el recurso hídrico al alterar la composición y calidad del agua por el uso de agroquímicos [34].

² *Mulch* o cubiertas vegetales: capa de materia orgánica suelta como paja, hierba cortada, ramas trituradas, hojas y otros materiales similares, que se utilizan para cubrir el suelo que rodea las hierbas, hortalizas o plantas de huerta [36].

Las técnicas agroecológicas, al no usar productos sintéticos, disminuyen los efectos negativos sobre el agua que provoca la agricultura; además las técnicas de riego (por goteo en general), el aprovechamiento de agua de lluvia [40] y el uso de *mulch*, por nombrar algunos, aprovechan mejor el agua lo que disminuye el recurso hídrico necesario para el crecimiento de los cultivos, pues se mantiene la humedad del suelo provocando que haya más agua disponible [41].

2.3.3. Uso de agroquímicos

El excesivo uso de fertilizantes sintéticos a base de nitrógeno a llevado a que a nivel mundial su eficiencia disminuya de un 80 % a un 30 % [34]. Esto se debe ante todo a que solo un 40 % del nitrógeno es utilizado por los cultivos, mientras que el resto se pierde por efecto de la lluvia, ya sea porque percola o porque se volatiliza [34].

Por otro lado, el uso de plaguicidas a traído consigo el aumento de plagas y enfermedades principalmente porque su mal uso a llevado a que las plagas generen resistencia [34].

Cabe destacar, que la exposición a agroquímicos puede generar cáncer y otras enfermedades severas [34][42]. Dicha exposición puede ser por medio del alimento consumido, el suelo, agua o aire; producidas sobre todo por la aplicación inadecuada de estos [42].

En contraste, las técnicas agroecológicas buscan, según el Servicio Agrícola Ganadero (SAG) (2013) “disminuir el control externo y crear las condiciones para que sea reemplazado por el control realizado por los diversos seres vivos que existen en el campo”. Algunas de las medidas que se pueden tomar para el control de plagas y enfermedades son la diversidad de cultivo, la buena fertilización de cultivos (plantas sanas son más resistentes), control biológico (incorporando depredadores naturales de las plagas), el reemplazo de productos convencionales por otros de origen natural, por nombrar algunos [34].

2.3.4. Técnicas agroecológicas a nivel mundial y local

A nivel mundial, la agricultura orgánica, que implementa técnicas agroecológicas como fue mencionado anteriormente, a presentado un aumento en la superficie de cultivos que ha incorporado estas técnicas, como se puede observar en la Figura 2.7, donde se presenta la evolución de la superficie orgánica a nivel mundial en el periodo 1999-2017 [43].

Este aumento, se ha reflejado también en las ventas de alimentos orgánicos que al 2010 este se triplicaba con respecto al 2000 [34].

A nivel Latinoamericano, este tipo de sistemas de cultivos representa 8,4 millones de hectáreas, donde Argentina, Brasil y Uruguay son los países que tienen una mayor superficie certificada [34].

En particular, en Chile la superficie certificada como orgánica es de 20.897 hectáreas al 2019, donde la mayor superficie la abarcan los frutales mayores como el manzano, nogal, cerezo y palto, con un 37 % [44]. La distribución de las superficies de frutales mayores se presenta en la Figura 2.8, donde el palto posee 136,9 hectáreas.

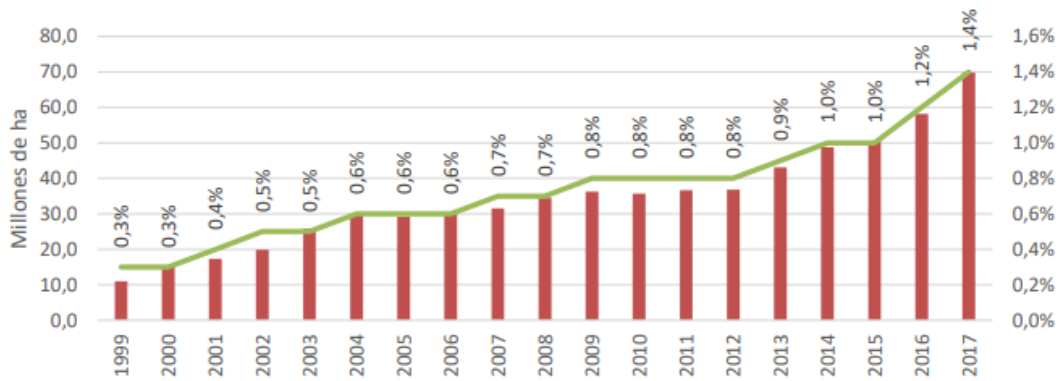


Figura 2.7: Evolución de superficie orgánica y % del total de tierras agrícolas período 1999-2017. Fuente: Eguillor (2020).

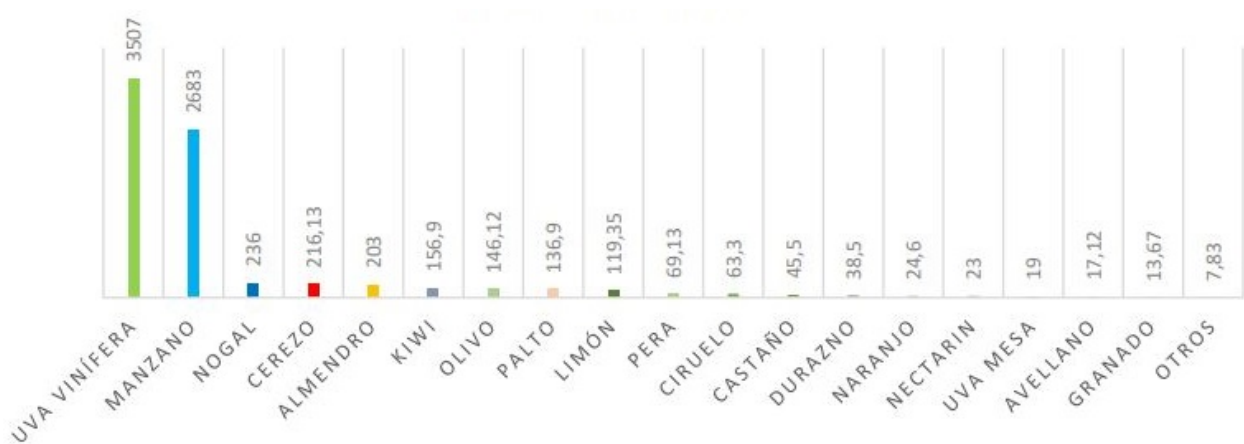


Figura 2.8: Superficie agrícola cultivada orgánica de las especies de frutales mayores de la temporada 2019, en hectáreas. Fuente: Servicio Agrícola Ganadero (SAG) (2019).

Algunas de las técnicas agroecológicas que se han implementado en Chile están enfocadas en el aprovechamiento del agua, donde se destaca la incorporación de materia orgánica (compost, hojarasca, abonos verdes, entre otras) [31] que le otorga al suelo una mejor estructura permitiendo una mejor penetración del agua pluvial, lo que disminuye la pérdida de agua, aumentando los volúmenes de agua capturada [41]. Además, se destaca la incorporación de represas, zanjas de nivel, entre otros, para apoyar la retención de agua [31].

En relación al manejo de plagas, los sistemas agroecológicos según Leu, A. (2014) “se proponen, primero, prevenir las plagas y, segundo, controlarlas”. Ante esto, en Chile, se han implementado técnicas como es la diversidad de cultivos, donde algunas plantas actúan como repelentes o refugio para plagas dejando libres a las de cultivo [31], y el control biológico con organismos que controlen la plaga (como chinita adulta y crisopa), entre otros [31].

El uso de estas técnicas se refleja en una disminución de los costos en la producción, esto porque se puede llegar a disminuir en un 97% el uso de agroquímicos; los cultivos son más

resistentes a perturbaciones del clima como es la sequía evitando la pérdida de cosechas; por la mejor administración de los recursos productivos [41]; además, al fertilizar con productos naturales las plantas se vuelven más resistentes a plagas y enfermedades lo que evita pérdidas en la cosecha [31].

Cabe destacar, que la implementación de técnicas agroecológicas disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con las técnicas convencionales [40][45] debido principalmente a la disminución del uso de agroquímicos. Además, se fortalece el sentido de responsabilidad de los agricultores, al estar más involucrados con lo que es el uso de fertilizantes y plaguicidas al no depender de las recomendaciones de los proveedores [41][45].

Finalmente, se ha de mencionar el impacto social que tiene la incorporación de técnicas agroecológicas, estas generan conocimiento colectivo y adaptabilidad al formar redes de productores [46]. La agroecología fomenta la autonomía de los productores, al conocer como funcionan sus cultivos tienen las capacidades para tomar decisiones basados en sus conocimientos [46][34], pues la aplicación de fertilizantes y pesticidas depende de las realidades locales [45]. Por último, es importante destacar que con estas técnicas se recupera conocimiento ancestral, y como dice el Servicio Agrícola Ganadero (SAG) (2013) “rescata y genera identidad a los habitantes del mundo rural, mejora la autoestima y estimula el ingenio”.

2.4. Organizaciones

2.4.1. Centro de investigación Ensenada Los Tilos

Para mitigar el efecto de la agricultura convencional, surgen proyectos como el del centro de investigación Ensenada Los Tilos, ubicado en la comuna de Hijuelas en la región de Valparaíso [11]. Esta es una sociedad agrícola que se ha dedicado especialmente al cultivo de palta y, hace unos años, a la investigación para la protección de bosque nativo, agroforestería y agricultura regenerativa [11].

Esta posee tres áreas de trabajo principales:

- **Palta regenerativa:** Donde la palta convive con ecosistemas nativos e incita su regeneración [11]. Poseen certificaciones Europe y Global G.A.P [47]. Además, cuentan con diversas investigaciones en asociación con la Universidad de Chile, Universidad Mayor, Universidad Santa Maria, coordinados por la Fundación Somos Agua [47]. Dentro de sus investigaciones, se encuentra la incorporación de técnicas agroecológicas en el cultivo de palta.
- **Bosque nativo:** Trabajan en la restauración y conservación del bosque nativo esclerófilo [11]; y en un vivero nativo con más de 60.000 ejemplares. Junto con la Fundación Somos Agua poseen diversas líneas de investigación que buscan mejorar las técnicas de restauración [48]. Además, se incorporó el predio a la Reserva de la Biosfera La Campana-Peñuelas, protegiéndolo de la actividad minera que solía haber en la zona.
- **Energía:** Poseen proyectos de energías renovables no convencionales en el predio relacionados a la producción de energía solar [49].

2.4.2. Fundación Somos Agua

Es una fundación formada por ex alumnos de la Universidad de Chile de distintas áreas de la ingeniería, cuyo propósito es “promover el desarrollo sostenible y regenerativo del recurso hídrico, mediante la realización y articulación de proyectos colaborativos de ciencia, innovación y educación ambiental” [10].

Trabajan principalmente en tres áreas: agrícola, forestal e hídrica [10]. Cuentan con un pool de proyectos (ver entrevista realizada a Andrés Robles en Anexo A), que se agrupan en:

- **Proyectos de investigación:** Entre los principales estudios se encuentra el de las relaciones simbióticas entre especies forestales nativas y *Persea americana*; técnicas para conservación y restauración de bosque nativo; técnicas de captación de agua niebla; uso de teledetección para estimación de huella hídrica; estudio de mercado para comercialización de palta *ecofriendly*; estudio de fitorremediación para playa contaminada en comuna de Chañaral; estudio de mejora de proceso de compostaje de residuos generados por plantaciones de *Persea americana* y manejo de bosque nativo esclerófilo.
- **Educación Ambiental:** Programas de Educación STEAM para estudiantes; servicio de educación ambiental personalizado para organizaciones y empresas; cabildos y actividades participativas en torno al agua.
- **Innovación y Emprendimiento:** Entre sus principales proyectos se encuentra una tecnología patentada como modelo de utilidad para ahorro de agua de nombre “lavadero ecológico”; comercialización de ecotecnias del agua; productos elaborados a partir de madera obtenida de manejo sustentable del bosque nativo esclerófilo y sello de certificación de madera y productos obtenidos de la misma forma.

Uno de los proyectos en los que trabaja actualmente la fundación es en relación al cultivo de palta en Ensenada Los Tilos, donde se comercializan las paltas obtenidas mediante la marca Palta Buena, la primera palta *ecofriendly* del país, en donde se diferencia del resto de la oferta por sus prácticas sustentables, investigativas y restauración ecológica. En apoyo a este proyecto es que se propone hacer un Análisis de Ciclo de Vida para comparar técnicas convencionales y técnicas agroecológicas de la producción de paltas.

2.5. Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o LCA del inglés *Life Cycle Assessment* es una metodología para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad desde las materias primas que lo conforman hasta la disposición final.

La norma ISO 14040 lo define como “una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio” [50].

Esta se compone de principalmente cuatro etapas que se describen a continuación:

- **Definición de objetivo y alcance:** En este punto se define el objetivo y el uso previsto del estudio, el alcance de acuerdo con los límites del sistema (ver Figura 2.9), la unidad funcional³ (que debe ser coherente con el objetivo y el alcance del estudio), los flujos dentro del ciclo de vida y las categorías de impacto a estudiar (ver Figura 2.10) [51] que son definidas por la norma ISO 14046 como “clase que representa asuntos ambientales de interés a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida” [12]. Dentro de los límites, se define lo que corresponderá al *foreground* (sistema principal de interés [52]) y al *background* (sistema que proporciona la energía y materiales al *foreground* donde no se identifican las plantas y operaciones individuales [52]).

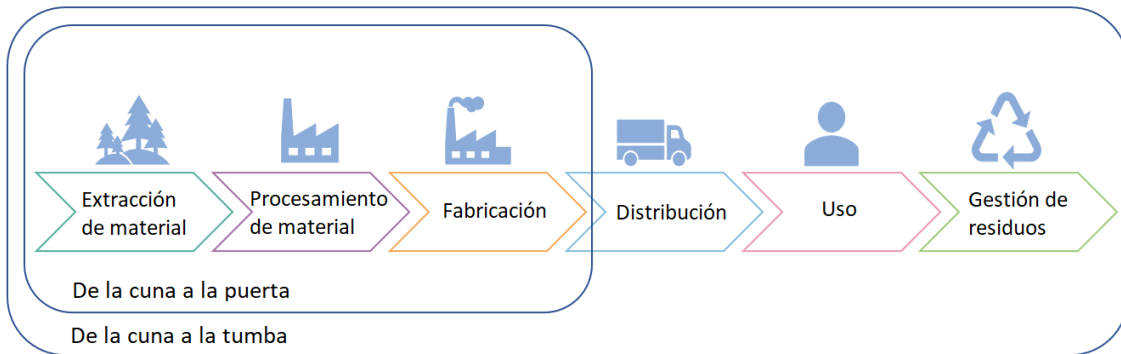


Figura 2.9: Límites del sistema usualmente utilizados en un Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: Elaboración propia, basado en Gerarden et. al. (2015) y Strezov et. al. (2021).

- **Inventario de ciclo de vida:** Se identifica y cuantifica el uso de energía, agua y materiales y emisiones al medio ambiente (por ejemplo, emisiones al aire, eliminación de desechos sólidos, descargas de aguas residuales), por medio de balances de materia y energía de los diferentes componentes del ciclo de vida [50].
- **Evaluación de impactos:** En esta etapa se evalúan los posibles efectos humanos y ecológicos de la energía, el agua, y el uso de materiales y las emisiones ambientales identificadas en el análisis de inventario [52].
- **Interpretación:** Finalmente, se evalúan los resultados del análisis de inventario y la evaluación de impacto para seleccionar el producto, proceso o servicio que permitan reducir los impactos [52].

Adicionalmente, se puede agregar la etapa de **Normalización** con tal de raquear y comparar el impacto medido por diferentes categorías de impacto [55]. Se utilizan factores de caracterización dependiendo de la categoría de impacto estudiada y del área de protección escogida [55] como se observa en la Figura 2.10, donde se muestran las categorías de impacto final o áreas de protección. Se destaca que dentro del área de protección de *Entorno natural* es posible desprender al menos tres categorías de impacto final: ecosistemas terrestres, de agua fresca y marinos. Este paso es opcional pero permite complementar la interpretación de los resultados obtenidos durante el análisis [55].

³ Unidad funcional: base de cálculo sobre la cual se efectuarán los balances de materias y energía [50].

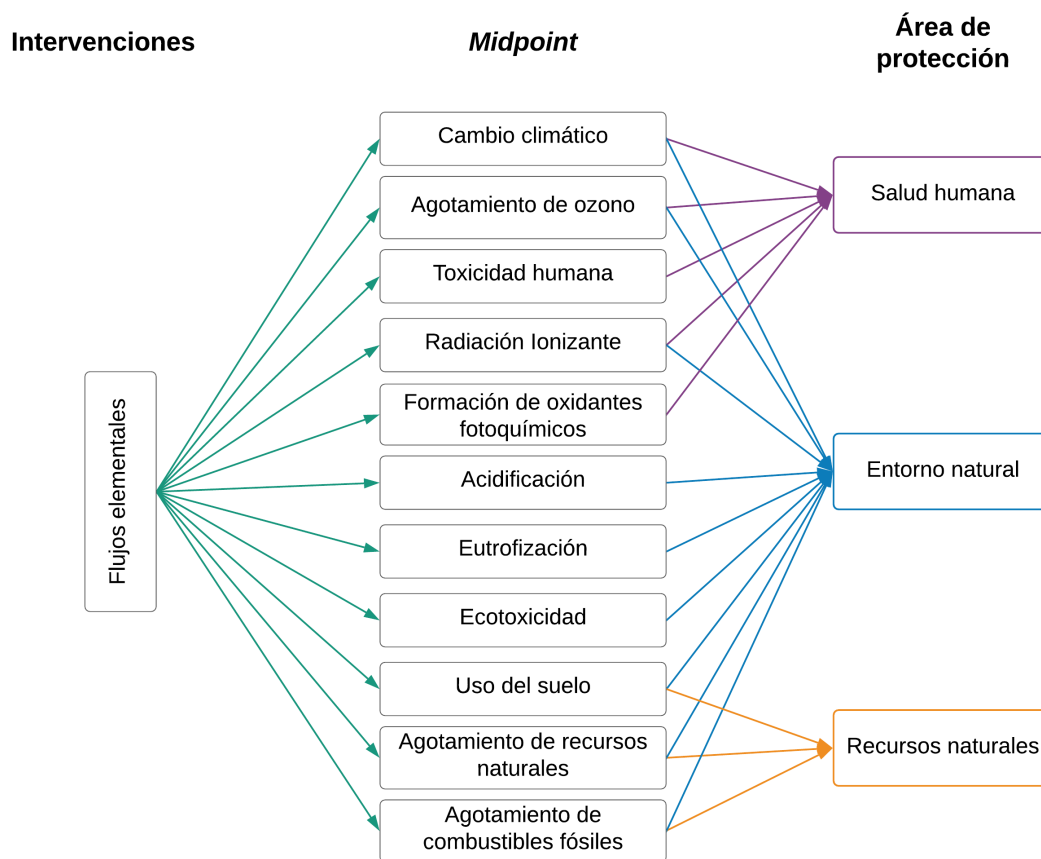


Figura 2.10: Descripción general de las categorías de impacto y su relación con las áreas de protección. Fuente: Modificado de Strezov et. al. (2021).

2.5.1. Aplicaciones del ACV en la agricultura

En la agricultura se han reportado Análisis de Ciclo de Vida para evaluar los impactos ambientales de diferentes escenarios de producción y de la implementación de distintas prácticas agrícolas, comparándolas con las convencionales [56]. Estos análisis se han dado en sistemas de producción agrícola para la caña de azúcar, la piña, el trigo, el cacao, el tomate y el mango, según el estudio realizado por Arango et al. (2014). En aquellos estudios se utilizan cerca de 10 categorías de impacto, donde las que prevalecen son el Potencial de Calentamiento Global (GWP por su siglas en inglés de *Global-warming potential*) y la huella hídrica. Además, la mayoría de ellas, tiene como factor en común que el análisis es de la “cuna a la finca”, de la “cuna al mercado” y de la “cuna a la mesa”, y no de la forma tradicional industrial “de la cuna a la tumba”. Esto responde a que en el sector agrícola no se consumen recursos en un sentido lineal, como en otros procesos industriales [58]. Además, el sector agrícola no se hace cargo de lo que ocurre después del consumo.

Otro punto interesante a rescatar es que uno de los principales desafíos al realizar un ACV en la agricultura es la falta de información sobre datos de referencia, encontrándose con bases de datos con información sobre cultivos en Europa y Norteamérica, lo que dificulta el análisis local (en Latinoamérica) [57]. Además, autores han reportado que la falta de datos

al momento de hacer el inventario lleva a la realización de un análisis menos robusto [59]. Estos puntos reflejan uno de los problemas más importantes en esta industria, que es la falta de cuantificación y de formalización de la información.

Relacionado con la realización del análisis, es habitual que este se centre en comparar prácticas por lo que quedan fuera del estudio los impactos asociados a la infraestructura y a la fabricación de los insumos, como los agroquímicos [60], lo que invisibiliza el impacto ambiental de estos.

De acuerdo con el estudio realizado por Arango et al. (2014), para lograr un ACV robusto, se hace necesario crear bases de datos locales, donde se reporte información relacionada con los procesos de producción, la obtención de insumos, los gastos de energía, el uso del agua, el uso de agroquímicos, entre otros. En el trabajo, concluyen que el Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta nueva en su aplicación en el sector agrícola y que se necesita de información dada por los campesinos e integrantes de los gremios agrícolas para tener un análisis completo y que pueda servir para generar recomendaciones acerca de prácticas sostenibles en el contexto local. Por último, hacen hincapié en la importancia de la unidad funcional donde se expresan dos enfoques, uno ligado al área cultivada y a la producción, y otro ligado a la producción con requerimientos de calidad y área [57].

2.5.2. Aplicaciones del ACV con técnicas agroecológicas

En la literatura se encuentran estudios que comparan técnicas convencionales con otras orgánicas, donde entran diversas técnicas de índole agroecológico y el no uso de organismos genéticamente modificados. Es posible tomar como referencia estos estudios que analizan las técnicas utilizadas en estos dos tipos de procesos productivos agrícolas, resguardando las diferencias presentadas en la sección 2.3.

En el estudio realizado por Mondelaers et al. (2009) se comparan diversos aspectos de la agricultura, uno de ellos es en relación a la categoría de Potencial de Calentamiento Global, donde se destaca el estudio realizado a la plantación de trigo en Estados Unidos. En dicho estudio, se obtiene que la plantación bajo técnicas agroecológicas produce 30 kg de CO₂eq menos que con técnicas convencionales por kg de producto [61]. Además, se destaca el incremento en un 30 % en promedio de la biodiversidad en los sistemas que implementan técnicas ligadas a la agroecología en comparación con las convencionales, donde se destacan prácticas como la prohibición/reducción del uso de pesticidas químicos y fertilizantes inorgánicos, y la preservación de la agricultura mixta [61].

Con respecto al uso de fertilizantes, según el estudio realizado por Eltun (1995) y por Hass et al. (2002), la escorrentía de nitrato en los cultivos convencionales es más del doble que en aquellos cultivos con índole ecológica, por lo que cambiar a un cultivo orgánico reduce la lixiviación de nitrógeno en más de un 50 %. Además se recalca que en el cultivo de forraje, la pérdida de nitrato en el sistema ecológico se redujo en un 36 % en comparación a los sistemas convencionales [62]. De esta manera, se reducen los efectos negativos de los fertilizantes sobre

el agua, suelo y aire, que involucran eutrofización ⁴, acidificación ⁵ de suelos y agua dulce, y toxicidad directa.

En diversos estudios analizados por Matthias et al. (2012) se concluye que los cultivos de índole orgánica presentan un beneficio medioambiental cuando el estudio se centra en las prácticas agrícolas, sin embargo, cuando se usa el ACV para calcular el impacto por unidad de producto, este es mayor debido principalmente por los bajos rendimientos que tienen estas prácticas en comparación a las convencionales.

En relación a lo expuesto, resulta interesante hacer un estudio donde los límites del sistemas sean más amplios considerando, por ejemplo, la producción de los insumos necesarios por el cultivo, así se podría responder a si son efectivamente mejores las prácticas agroecológicas que las convencionales en términos de impacto ambiental cuantificable y, de ser así, cuanto mejores.

2.5.3. Aplicaciones del ACV en el cultivo de palta

En el cultivo de palta el Análisis de Ciclo de Vida se presenta como un estudio que cuantifica los impactos en relación al Potencial de Calentamiento Global (huella de carbono) y al agotamiento del agua, principalmente.

En el estudio realizado por Hadjian et al. (2019) comparan el cultivo de palta (México) con el de piña (Costa Rica) y banana (Ecuador), usan como unidad funcional el kilogramo de fruta y el programa *openLCA* para realizar en estudio en cuatro categorías de impacto: ocupación agrícola de la tierra, transformación natural de la tierra, agotamiento del agua y Potencial de Calentamiento Global, evaluando desde “la cuna a la tumba”. En cada categoría el impacto de la palta fue el más alto (en comparación con las otras frutas en estudio), siendo la mayor diferencia en las categorías de ocupación agrícola de la tierra con 1,1 m²a por kg de palta versus 0,2 m²a por kg de banana y 0,3 m²a por kg de piña; y en el agotamiento del agua con 0,75 m³ por kg de palta versus 0,1 m³ por kg de banana y 0,3 m³ por kg de piña [65].

A nivel más local, el estudio realizado por Huiza (2014) realiza un Análisis de Ciclo de Vida de la palta cultivada en la comuna de Quillota, región de Valparaíso, donde compara el cultivo realizado en planicie con el tradicional en laderas, estudiando el sistema desde “la cuna a la puerta”. La unidad funcional que utiliza es el kilogramo de palta y se centra en estudiar la categoría de Potencial de Calentamiento Global (huella de carbono) [66]. Los resultados obtenidos indican una leve diferencia (alrededor del 2%) entre ambos sistemas, por un lado el cultivo en planicie presentó 0,437 kg CO₂eq por kg de palta, mientras que en ladera, 0,430 kg CO₂eq por kg de palta [66]. Esta diferencia se explica en que la producción en ladera tiene un mayor rendimiento que la plantación en planicie [66].

De los documentos disponibles, no se encontraron comparaciones entre técnicas agroecológicas y convencionales en el cultivo de palta Hass en Chile.

⁴ Eutrofización: ocurre cuando existe una sobredisponibilidad de nutrientes en comparación a los niveles naturales [42].

⁵ Acidificación: se produce por la captación y asimilación del amonio por las raíces de las plantas, en el proceso de nitrificación y lixiviación del nitrato [42].

Capítulo 3

Objetivo y alcance del estudio

En este capítulo se aborda el objetivo y el alcance del estudio siguiendo las etapas de la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida. El objetivo dará las pautas del estudio y el alcance abordará los casos de estudio, la unidad funcional, los límites del sistema y las categorías de impacto a evaluar.

3.1. Objetivo del estudio

El centro de investigación Ensenada Los Tilos, ubicado en la comuna de Hijuelas en la región de Valparaíso, es un predio que busca innovar utilizando técnicas agroecológicas para el cultivo de palta Hass junto con la Fundación Somos Agua.

Dentro de las técnicas agroecológicas que está implementando el predio se encuentra el cambio en el sistema de riego, que permite disminuir la cantidad de agua utilizada en el cultivo de palta; la investigación de pesticidas y herbicidas de origen biológico para disminuir o eliminar el uso de pesticidas y herbicidas; y la conservación del bosque nativo.

Es bajo este contexto la Fundación Somos Agua busca hacer una comparación de impacto ambiental entre el cultivo de palta Hass implementando técnicas agroecológicas versus las técnicas convencionales, con tal de conocer el real impacto que tienen estas técnicas y poder identificar cuales son más significativas en términos de impacto ambiental.

3.2. Alcance del estudio

3.2.1. Casos de estudio

Los casos de estudio son dos: el primero es el presente en la mayoría de los predios de cultivo de palta Hass, donde se utilizan comúnmente fertilizantes, pesticidas y herbicidas de origen químico, sistemas de riego por microaspersión y donde cuyas plantaciones se hacen principalmente en laderas. El segundo caso corresponde a un predio gestionado solo con técnicas agroecológicas donde se hace uso de técnicas como el uso de compost, *mulch*, riego por goteo, entre otras.

Las etapas que conforman el *foreground* para cada caso son la plantación, crecimiento,

mantenimiento y cosecha (ver Figura 3.1). El *background* está conformado por las etapas de producción de fertilizantes y agroquímicos; la obtención de combustible y electricidad; y el transporte de los insumos. Las características de cada caso y como se determinaron las etapas, se describen a continuación.



Figura 3.1: Etapas del proceso. Fuente: Elaboración propia.

Caso convencional

El proceso con técnicas convencionales se denominará **caso convencional**. Este fue determinado por medio de una búsqueda bibliográfica de las principales técnicas utilizadas en la industria agrícola de la palta Hass. De esta búsqueda se determinaron las características para el caso de estudio, que se proceden a describir:

- **Ubicación**

Para que el estudio sea comparable, se tomó como supuesto que el cultivo se encuentra en la comuna de Quillota perteneciente a la provincia de Quillota, al igual que la comuna de Hijuelas. La provincia de Quillota presenta una media de temperatura máxima anual de 22,1°C, donde el mes más cálido (enero) presenta una media de 26,7°C [67]. La media de temperatura mínima anual es de 7,6°C, donde el mes más frío (julio) presenta una media de 4,2°C [67]. En relación a las precipitaciones, la provincia presenta una precipitación anual de 331,6 mm, donde el mes más lluvioso (junio) presenta una precipitación promedio de 83,1 mm [67].

- **Tipo de cultivo**

El cultivo de palta Hass en Chile se realiza principalmente a través de monocultivos en las laderas de los cerros utilizando camellones a favor de la pendiente [68].

- **Extensión**

Se supuso una extensión de 28 hectáreas, similar a la de Ensenada Los Tilos, para que el estudio sea comparable.

- **Riego**

Se encontró que cerca del 50 % de los huertos de paltos en Chile presentan un sistema de riego por microaspersión [68], por lo que se tomará este sistema como característico del proceso convencional, donde los volúmenes de riego son cercanos a los 9.600 m³/ha al año [27].

- **Rendimiento del cultivo**

El rendimiento anual para este tipo de configuración es cercano al de 11,00 ton/ha [69], por lo que se tomará como válido para el caso de estudio considerando una densidad de plantación de 278 árboles/ha (plantación no intensiva), lo que se traduce en un rendimiento de 39 kg por árbol en promedio.

- **Insumos**

Los insumos para el cultivo que se consideraron para este caso corresponden a: Urea (fertilizante), Fosfimax®40-20 (fertilizante), Winspray®(pesticida) y Roundup®(herbicida) en base al estudio realizado por Allende (1995) y las prácticas llevadas a cabo en Ensenada Los Tilos antes de la implementación de las técnicas agroecológicas. Estos representan más del 80 % de los utilizados como fertilizantes, pesticidas y herbicidas.

Caso agroecológico

El proceso con técnicas agroecológicas será denominado **caso agroecológico**. Este se basó en lo declarado en Alvear (2021) y en entrevistas realizadas a personal del centro de investigación Ensenada Los Tilos.

- **Ubicación**

Para este caso se tomará la ubicación del centro de investigación Ensenada Los Tilos, que se ubica en la comuna de Hijuelas en la provincia de Quillota, por lo que las condiciones meteorológicas son homologables a las descritas para el caso convencional.

- **Tipo de cultivo**

En este caso, el cultivo de palta Hass es en plano utilizando camellones [71].

- **Extensión**

Se utiliza la extensión del predio Ensenada Los Tilos, que según los registros tiene una extensión de 28 hectáreas.

- **Riego**

El sistema de riego determinado es por goteo con sensores, utilizando un volumen de riego igual a 7.964 m³/ha al año según los registros de Ensenada Los Tilos.

- **Rendimiento del cultivo**

El rendimiento para un predio gestionado con técnicas agroecológica es de 15,00 ton/ha al año [72] considerando una densidad de plantación de 480 árboles/ha, lo que se traduce en un rendimiento de 32 kg por árbol en promedio.

- **Insumos**

Los insumos utilizados para el cultivo son compost y fertilizantes orgánicos a base de nitrógeno y fósforo como fertilizantes; microorganismos de montaña como pesticidas; y cubierta vegetal (*mulch*) como herbicida [70].

A modo de resumen, se presentan en la Tabla 3.1 las principales características de los casos de estudio.

3.2.2. Unidad funcional

La unidad funcional corresponde a 1 kg de palta cosechada (lista para el transporte, no consumo) para el sistema descrito, que está determinado en relación al rendimiento anual de cada caso. Para el proceso convencional corresponde a 11,00 ton/ha y para el agroecológico a 15,00 ton/ha. La transformación del resultado a términos de la unidad funcional se realizará

Tabla 3.1: Caracterización caso convencional y agroecológico.

Dato	Unidad	Convencional	Agroecológico
Ubicación	Lugar	Quillota	Hijuelas
Plantación	Tipo	Ladera	Plano
Extensión	ha	28	28
Densidad plantación	árbol/ha	278	480
Sistema riego	Tipo	Microaspersión	Goteo
Rendimiento anual	ton/ha	11,00	15,00

según se presenta a continuación, donde u representa la unidad de la categoría de impacto estudiada:

$$\text{Impacto} \left[\frac{u}{kg \text{ palta}} \right] = \frac{\text{Categoría} \left[\frac{u}{ha \cdot \text{año}} \right]}{\text{Rendimiento} \left[\frac{kg \text{ palta}}{ha \cdot \text{año}} \right]}$$

3.2.3. Límites del sistema

Los límites del sistema son definidos como de “la cuna a la puerta”, pues dentro del análisis se considera desde la plantación hasta el transporte del fruto al centro de distribución. Además, se considera el tiempo que tarda el árbol en llegar a la adultez y producir de manera constante para hacer el seguimientos del impacto.

Se deja fuera del análisis el transporte marítimo de la palta, y el análisis del consumo y disposición final del producto, debido a que ha sido ampliamente estudiado [29][73]-[76]. En la Figura 3.2 se ilustran los límites del sistema de estudio.

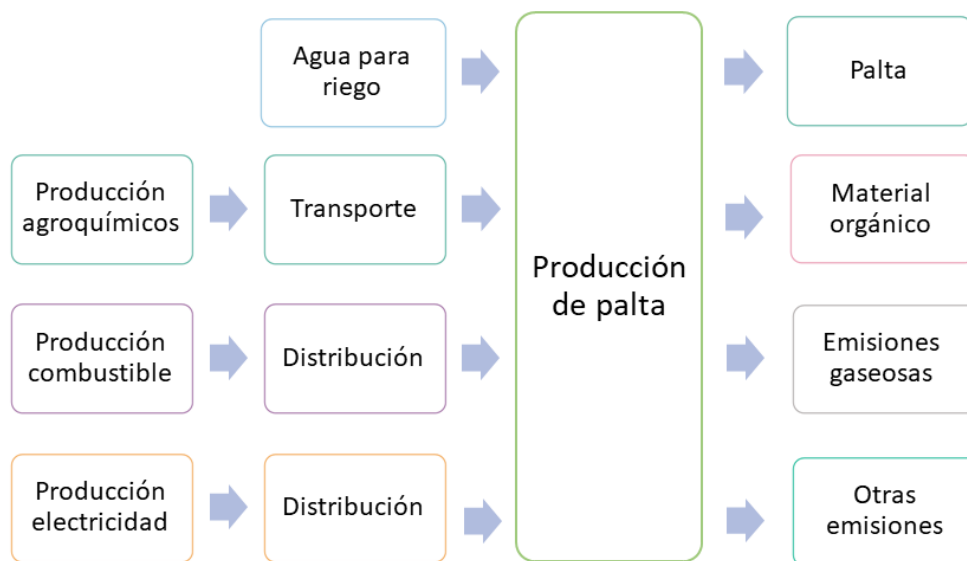


Figura 3.2: Límites del sistema. Fuente: Elaboración propia.

En este punto es importante destacar los **procesos multifuncionales** que se encuentran presentes en el estudio. Estos son todos aquellos en donde se cumple más de una función que la de brindar el producto o flujo de interés y que concierne el estudio realizado [77]. En el estudio, es posible identificar la presencia de estos procesos en el transporte de insumos, el transporte del producto final a la importadora, la generación de energía eléctrica y la generación de combustible.

3.2.4. Calidad de los datos

Los datos para caracterizar el caso convencional fueron obtenidos por bibliografía y actualizados a los registros de Ensenada Los Tilos. Datos como uso de tractor, electricidad y riego fueron obtenidos por bibliografía, mientras que datos como el uso de insumos agrícolas fueron reajustados a prácticas actuales con los registros al 2021 de Ensenada Los Tilos a partir de lo reportado por Allende (1995).

Por otro lado, los datos para el caso de estudio agroecológico fueron obtenidos de diversas fuentes. Los insumos fueron reportados por la investigación realizada por Alvear (2021) para la Fundación Somos Agua. El uso de agua y electricidad fueron adquiridos de registros hasta el 2021 de Ensenada Los Tilos al ser representativos de una práctica agroecológica. Datos adicionales como frecuencia de poda, uso de tractor y excavadora, fueron conseguidos a través de entrevistas a los encargados del predio.

Los factores de emisión necesarios se obtienen de la base de datos del IPCC, de bases de datos libres de *openLCA* y *Ecoinvent* revisados por medio del software *openLCA*, de bases de datos de registros de agua de *ETHzürich*, y de registros del Gobierno de Chile [78]. Aquellos factores que no se pueden obtener de bases de datos, se estiman por bibliografía o se obtienen directamente de ellos.

En el caso de la matriz energética actual, el factor de emisión es obtenido desde la Comisión Nacional de Energía [79].

Del Informe INGEI 1990-2018 se obtienen los factores de caracterización para la categoría de impacto potencial de calentamiento global [78].

3.2.5. Categorías de impacto

Existe una amplia gama de categorías de impacto de punto medio o *midpoint* (ver Figura 2.10). De acuerdo con la búsqueda bibliográfica realizada se determina que las más representativas para el estudio son las descritas a continuación:

Potencial de Calentamiento Global

El Potencial de Calentamiento Global (PCG), también conocido como huella de carbono, es definido por el Ministerio para la Transición Ecológica (2018) como “la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto”. Se escogió esta categoría por ser una de las más estudiadas en los Análisis de Ciclo de Vida, en particular, cuando se aplica a la agricultura [61] donde las emisiones y

absorciones de GEI viene de diferentes fuentes como se presenta en la Figura 3.3. Además, es la categoría de impacto que se ha estudiado específicamente para el caso del cultivo de palta Hass en Chile, en el estudio de Huiza (2014).

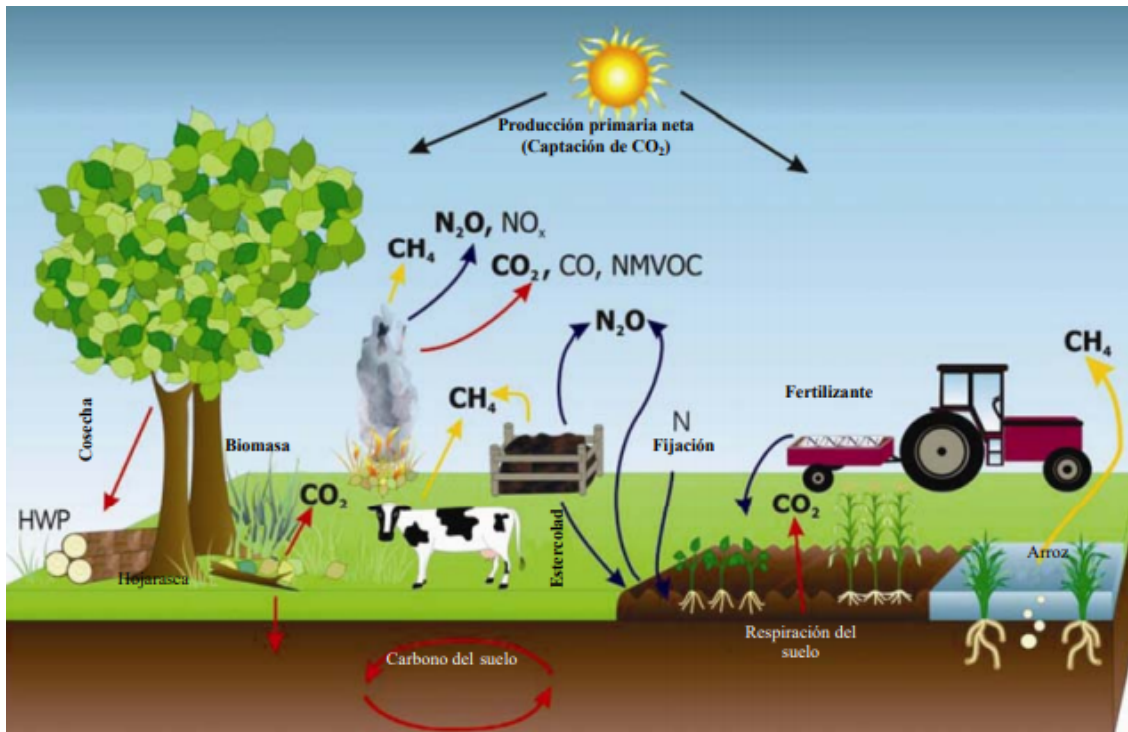


Figura 3.3: Principales fuentes de emisión/absorciones de GEI y procesos en sistemas gestionados. Fuente: IPCC (2006).

Para el cálculo se tomará como referencia la metodología del IPCC, por ser una de las más usadas en Chile [82]. La metodología define el Potencial de Calentamiento Global por medio de la expresión 3.1.

$$\text{PCG} = \text{Dato actividad} \cdot \text{Factor de emisión} \quad (3.1)$$

Donde:

- Dato actividad, hace referencia al parámetro que define la cantidad de emisiones de GEI de una actividad [80].
- Factor de emisión (FE), es la cantidad de GEI emitido por el “dato de actividad” [80].

El resultado obtenido es expresado en unidades de CO_2eq (dióxido de carbono equivalente). Esta es la unidad utilizada para medir el Potencial de Calentamiento Global para todos los gases de efecto invernadero [83], por lo que se debe normalizar la emisión utilizando los factores de potencial de calentamiento global de cada GEI para llevarlos a emisiones equivalentes de CO_2 . En el presente estudio los GEI considerados son el dióxido de carbono, metano y óxido nitroso debido a que son las principales emisiones en la agricultura [81]. Los factores para cada GEI fueron obtenidos de datos utilizados por el Ministerio de Medio Ambiente para el informe INGEI 1990-2018 y se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Factor de potencial de calentamiento global [78].

GEI	Unidad	Valor
Dióxido de carbono (CO ₂)	kg CO ₂ eq/kg CO ₂	1
Metano (CH ₄)	kg CO ₂ eq/kg CH ₄	25
Óxido nitroso (N ₂ O)	kg CO ₂ eq/kg N ₂ O	298

Uso de agua

El uso de agua, o también conocida como huella hídrica, es definida por la norma ISO 14046 como “la métrica o métricas con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua y considera todas las etapas del ciclo de vida, desde la adquisición de las materias primas hasta el fin de vida de un producto, servicio u organización” [12]. Existen tres categorías, que se describen a continuación según Fundación Chile (2016):

- **Huella Hídrica Azul (HH Azul):** Hace referencia al agua fresca que es extraída de fuentes superficiales y/o subterráneas que no retorna al ambiente de donde fue extraída. Esta viene dada por la expresión 3.2, donde se contabiliza el uso de agua por el riego del cultivo más el agua utilizada en las aplicaciones de los insumos agrícolas.

$$HH_{Azul} = \text{Riego} + \text{Aplicaciones} \quad (3.2)$$

- **Huella Hídrica Verde (HH Verde):** Se refiere al agua de lluvia que queda temporalmente disponible en el suelo o en la vegetación y que eventualmente se evapora desde el suelo o evotranspira desde la vegetación, o se incorpora a la vegetación. Su determinación viene dada por la expresión 3.3, donde ET_c es la evapotranspiración del cultivo (parámetro relacionado con el clima que denota la capacidad que tiene la atmósfera para evaporar el agua presente en el suelo [84]) y P_{pef} , es la precipitación efectiva (precipitación que es infiltrada en el suelo [84]).

$$HH_{Verde} = \text{Min}(ET_c, P_{pef}) \quad (3.3)$$

- **Huella Hídrica Gris (HH Gris):** Hace referencia al grado de contaminación del agua fresca. Corresponde al “volumen de agua fresca que se requiere para asimilar la carga de contaminantes de una descarga hasta niveles acorde a los estándares ambientales”. Esta se calcula siguiendo la expresión 3.4, donde α es la fracción de lixiviación, AR es la aplicación de productos químicos y $C_{m\acute{a}x}$ es la concentración máxima aceptable de contaminantes.

$$HH_{Gris} = \frac{\alpha \cdot AR}{C_{m\acute{a}x}} \quad (3.4)$$

Por otro lado, se ha de diferenciar entre el uso directo e indirecto del agua, es decir, entre la **Huella Hídrica Directa (HH directa)** y la **Huella Hídrica Indirecta (HH indirecta)**. La HH directa, se refiere al volumen de agua directamente extraído desde el sistema analizado y que es consumido por los diversos procesos que ocurren dentro de dicho sistema [84]. Por otro lado, la HH indirecta, hace referencia al volumen de agua virtual que se requieren dentro de los procesos del sistema para la producción del producto y/o servicios [84], su

calculo viene dado por la expresión 3.5 donde C_p es la cantidad de productos consumidos y HH_{prod} es la Huella Hídrica equivalente del producto.

$$HH_{Indirecta} = \sum(C_p \cdot HH_{prod}) \quad (3.5)$$

En particular, en el sector agrícola se han de estudiar los tres tipos de huellas directas antes descritas, tal como se observa en la Figura 3.4. Estas se expresan en dimensiones de volumen/tiempo, donde la huella asociada a la producción viene dada por la expresión 3.6 para el estudio realizado.

$$\text{Huella producción} = \frac{\sum_i HH_i + HH_{Indirecta}}{\text{Productos producidos}} \quad (3.6)$$

Donde:

- Huella producción es la huella asociada a la producción de cierto producto y se expresa en volumen/producto.
- HH_i es la huella hídrica directa, donde i corresponde a azul, verde y gris, expresado en volumen/tiempo.
- $HH_{Indirecta}$ es la huella hídrica indirecta del sistema en estudio, en volumen/tiempo.
- Productos producidos es la cantidad de productos producidos por el sistema en el período de tiempo estudiado, se expresa en producto/tiempo.

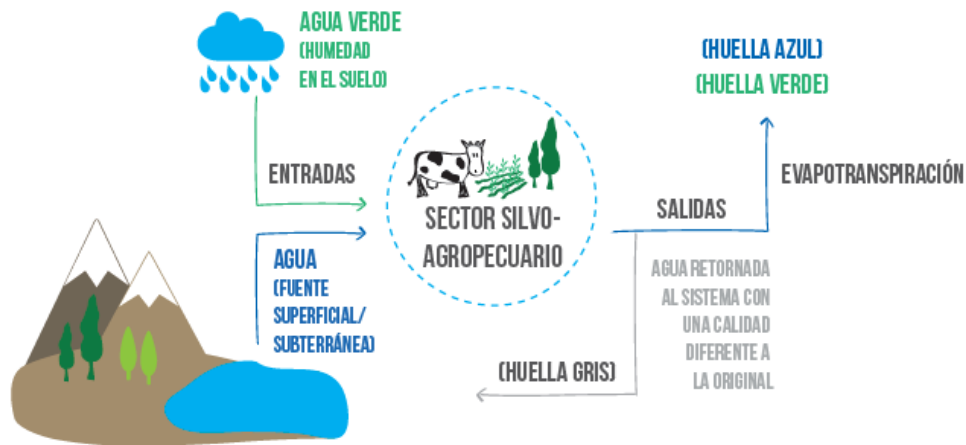


Figura 3.4: Huella Hídrica del sector agrícola. Fuente: Fundación Chile (2016).

Se escoge esta categoría para comparar el impacto que tiene sobre este recurso el cultivo de palta, el cual es más alto que el otros frutales y que ha generado múltiples controversias por verse asociado a la falta de agua en algunas zonas del país [6]. Por lo que se buscará comparar el efecto de las técnicas agroecológicas sobre el uso de este recurso frente al uso convencional.

Eutrofización acuática

La eutrofización, de acuerdo a González (2019) es “un fenómeno que ocurre cuando existe una sobredisponibilidad de nutrientes en comparación a los niveles naturales”. Este se produce principalmente por un exceso de nitrógeno y fósforo, ambos compuestos presentes en los fertilizantes. Esta puede manifestarse tanto a nivel acuático como terrestre. La **eutrofización acuática** es definida en Schmid (2008) como “el resultado del enriquecimiento excesivo de nutrientes de los ambientes acuáticos” que lleva a un desequilibrio biológico del ecosistema. Por otro lado, en el mismo estudio de Schmid (2008), se define la **eutrofización terrestre** como “los impactos negativos provocados por el exceso de nutrientes en el crecimiento de las plantas y en la composición de especies en ecosistemas terrestres naturales”.

El potencial de eutrofización acuática (EP_i) es calculado por Ortiz et. al. (2018) siguiendo la expresión 3.7.

$$EP_i = EQv_i \cdot x_i \quad (3.7)$$

Donde:

- EQv_i es el factor de caracterización. Este caracteriza el potencial de descarga de i que produce biomasa de fitoplancton con respecto a P y N contenido en las sustancias emitidas [86], en kg PO_4^{3-} /kg sustancia.
- x_i corresponde a la descarga efectiva de la sustancia i , en masa de unidad funcional por año [86].

Esta categoría adquiere especial relevancia cuando se aplica al sector agrícola, principalmente por el uso de fertilizantes que aportan nitrógeno, el compuesto que junto al fósforo, son los principales responsables de la eutrofización acuática y terrestre [85]. En particular, es en los ecosistemas acuáticos donde la eutrofización se manifiesta de manera más evidente que en el suelo, donde se observa la proliferación de algas que disminuye el oxígeno disponible y con ello aumenta la cantidad de bacterias que producen toxinas que afectan a la biodiversidad [87]. Es por ello que este estudio se enfocará en analizar la eutrofización acuática provocada por los insumos utilizados durante el cultivo de palta Hass. Los factores de caracterización para la eutrofización acuática se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Factor de caracterización para eutrofización acuática [85].

Sustancia	Unidad	Valor
Anión fosfato (PO_4^{3-})	kg PO_4^{3-} eq/kg PO_4^{3-}	1,00
Óxido de fósforo (P_2O_5)	kg PO_4^{3-} eq/kg P_2O_5	1,34 ^a
Amoniaco (NH_3)	kg PO_4^{3-} eq/kg NH_3	0,35
Óxidos de nitrógeno (NO_x)	kg PO_4^{3-} eq/kg NO_x	0,13

^a De [86]

Capítulo 4

Análisis de inventario

En este capítulo se presenta el análisis de inventario de los casos convencional y agroecológico para las etapas estudiadas junto con los principales supuestos y consideraciones tomados.

4.1. Datos del sistema

Los datos del sistema se presentan por caso a estudiar. Debido a que estos comparten ciertas características, los supuestos y consideraciones que son válidos para ambos casos se presentan a continuación:

- Se toma un horizonte de evaluación de aproximadamente 8 años de acuerdo a los estándares definidos por el agrónomo en Ensenada Los Tilos, ver Anexo A. El primer año (año 0) corresponde a la etapa de plantación; los años 1 al 4, a la de crecimiento; y del año 5 al 8, a la de mantenimiento.
- Debido a la escala temporal evaluada y al impacto estimado se considera el análisis desde la plantación, dejando fuera del análisis la etapa de crecimiento en invernadero, que tiene una duración de un año (ver Anexo A) y no contempla etapas de quema o despeje de terreno significativas para este estudio.
- Se asume que solo existe cosecha durante la etapa de mantenimiento, donde la cantidad de fruta que da el árbol es significativa, aunque el palto comienza a dar fruta desde el año 2 o 3, ver Anexo A.
- Debido a que el árbol está en crecimiento durante los primeros años, se asume que solo hay poda en la etapa de mantenimiento y que esta corresponde a 70 kg por árbol. Para más detalle, ver Anexo A.
- No se considera riego en la etapa de plantación al no ser significativo para el análisis, ver Anexo A.
- La proporción de aplicación de riego depende de la etapa del árbol, ver Anexo B.1.
- Ambos casos utilizan el mismo tipo de tractor, New Holland modelo T4.85F de 87 hp [88] lo que equivale a un rendimiento de 6,1 litros por hora [89].
- Los casos se encuentran ubicados en la provincia de Quillota, por lo que se toma como válido su análisis y comparación en el trabajo presente.

4.1.1. Caso convencional

El caso convencional se caracteriza por el uso de insumos de origen sintético. Las consideraciones y supuestos tomados para caracterizar el caso se presentan a continuación:

- Datos basados en el estudio de Allende (1995).
- Se rectifican los datos de Allende (1995) con las prácticas llevadas a cabo en Ensenada Los Tilos antes de la incorporación de técnicas agroecológicas, con el fin de actualizar el proceso.
- Para el estudio, se consideran solo los fertilizantes y agroquímicos más significativos (sobre 80 % de uso), los cuales se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Insumos utilizados en el caso convencional.

Nombre comercial	Uso	Compuesto principal
Urea	Fertilizante	46 % N
Fosfimax®40-20	Fertilizante	40 % P ₂ O ₅
Winspray®	Pesticida	Aceite parafínico
Roundup®	Herbicida	Glifosato

Los datos para la etapa de plantación del caso convencional se presentan en la Tabla 4.2, donde se contempla el uso de tractor para la preparación de la tierra, incluyendo las labores de micronivelación, aradura, restraje, corrugado del suelo y acarreo de trabajadores.

Tabla 4.2: Datos caso convencional etapa plantación.

Labor/insumo	Unidad	Valor Año 0
Uso tractor	h	29,50

Para las etapas de crecimiento y mantenimiento (Tablas 4.3 y 4.4, respectivamente), se contempla el uso de urea y fósforo como fertilizantes principales, de aceite parafínico (Winspray®) como principal pesticida y de glifosato (Roundup®) como principal herbicida.

El uso de tractor corresponde al necesario para la aplicación de agroquímicos. El riego es por microaspersión y responde a la proporción indicada en Anexo B.1, que tiene relación con la etapa de crecimiento en la que se encuentra el árbol. Además se considera el uso de agua para las aplicaciones de agroquímicos, debido a que estos deben ser diluidos para incorporarse a la planta, ver Anexo B.2. Por otro lado, se reporta el uso de electricidad para el uso de bombas y otros usos.

Finalmente, solo existe poda en la mantención, correspondiente a 70 kg por árbol adulto en el año 8. Para los años anteriores se considera una proporción similar a la del riego, relacionado a las etapas de desarrollo del árbol (ver Anexo B). Se considera que el caso convencional los restos de poda son quemados.

Tabla 4.3: Datos caso convencional etapa crecimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Urea	kg	197,38	419,78	617,16	925,74
Fosfimax®40-20	kg	30,58	66,72	97,30	147,34
Winspray®	kg	0,94	1,34	1,74	2,00
Roundup®	kg	0,00	143,44	143,44	143,44
Uso tractor	h	9,20	9,60	10,00	10,40
Riego	m ³	1.920,00	3.840,00	3.840,00	3.840,00
Agua aplicaciones	m ³	0,16	6,23	6,30	6,34
Electricidad	kWh	1.109,44	1.347,18	1.584,92	1.981,15
Poda	kg	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4.4: Datos caso convencional etapa mantenimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Urea	kg	1.345,52	1.765,30	2.207,37	2.207,32
Fosfimax®40-20	kg	211,28	278,00	347,50	347,50
Winspray®	kg	2,41	2,68	3,08	3,34
Roundup®	kg	143,44	114,75	114,75	114,75
Uso tractor	h	10,90	10,30	10,80	11,20
Riego	m ³	5.760,00	7.680,00	7.680,00	9.600,00
Agua aplicaciones	m ³	6,41	5,25	5,32	5,36
Electricidad	kWh	2.615,12	3.962,30	7.924,60	7.924,60
Poda	kg	11.676,00	15.568,00	15.568,00	19.460,00

Para la etapa de cosecha, se considera solo el uso del tractor para el acarreo de trabajadores, debido a que la cosecha se realiza de manera manual. Las horas correspondientes a esta etapa, se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Datos caso convencional etapa cosecha.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Uso tractor	h	71,35	142,71	142,71	324,33

En la etapa de distribución, se considera la distancia recorrida por un camión tráiler a diésel desde el campo al centro de distribución. Los kilómetros recorridos se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Datos caso convencional etapa distribución.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Uso camión	km	18,80	18,80	18,80	18,80

4.1.2. Caso agroecológico

Para el caso agroecológico, se tomaron los siguientes supuestos y consideraciones para caracterizar el caso:

- Técnicas agroecológicas como uso de compost, *mulch* y microorganismos de montaña son recomendadas por Alvear (2021).
- Técnicas agroecológicas como la gestión circular de residuos (no quema), conservación del bosque nativo y riego son sugeridas por la Fundación Somos Agua respaldadas por literatura [90].
- Los datos obtenidos por entrevistas y registros de Ensenada Los Tilos, corresponden a la etapa adulta del árbol, es decir, al año 8 de estudio.
- Para estimar los años anteriores, se hace una aproximación tomando en cuenta la proporción de riego que tiene relación con la etapa de desarrollo en que se encuentra el palto, ver Anexo B.

Los datos presentados son en base a lo declarado por Alvear (2021) junto con datos obtenidos por los registros y entrevistas realizadas a personal esencial de Ensenada Los Tilos, además de datos encontrados por bibliografía.

La etapa de plantación contempla la remoción de tierra y la construcción de camellones. Estos trabajos se realizan con una excavadora que trabaja 9 horas diarias por 20 días para preparar una hectárea gastando 400 litros diarios, ver Anexo A. El tiempo total que toma preparar la tierra se presenta en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Datos caso agroecológico etapa plantación.

Labor/insumo	Unidad	Valor
		Año 0
Uso excavadora	h	180,00

Los datos utilizados para la etapa de crecimiento se presentan en la Tabla 4.8. Se destaca el uso de compost, que para un terreno donde no se ha aplicado antes, el primer año recibe una dosis mayor que los siguientes años [70]. El compost otorga una cantidad considerable de materia orgánica pero no todos los nutrientes necesarios para el crecimiento del árbol, por lo que estos deben ser suplidos por fertilizantes de origen orgánico (nitrógeno y fósforo). Se presentan los insumos requeridos para la producción de microorganismos de montaña (MM) correspondientes a melaza y harina de maíz, en el Anexo B.3 se presentan los detalles para

la elaboración de MM.

El riego es por goteo, de acuerdo a los datos del predio y estimados según lo presentado en Anexo B.1. El agua de aplicaciones se relaciona con el agua necesaria para la producción y reproducción de los microorganismos de montaña, pues los fertilizantes orgánicos son administrados por fertirriego. La electricidad se utiliza para el uso de bombas que impulsan el agua para riego. Y, al igual que en el caso convencional, la poda solo ocurre en la etapa de mantención, donde los residuos son triturados por una chipeadora e incorporados al suelo como cubierta vegetal. En la Tabla 4.9 se presentan los datos para la etapa de mantenimiento.

Tabla 4.8: Datos caso agroecológico etapa crecimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Compost	kg	10.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Fert. N orgánico	kg	0	259,06	751,81	1.518,38
Fert. P orgánico	kg	0,00	0,00	0,00	0,00
Melaza	kg	14,39	7,59	7,59	7,59
Harina de maíz	kg	200,00	0,00	0,00	0,00
Uso tractor	h	4,10	4,30	4,45	4,65
Riego	m ³	1.592,80	3.185,60	3.185,60	3.185,60
Agua aplicaciones	m ³	0,15	0,26	0,26	0,26
Electricidad	kWh	1.277,06	1.550,71	1.824,37	2.280,46
Poda	kg	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4.9: Datos caso agroecológico etapa mantenimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Compost	kg	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Fert. N orgánico	kg	2.558,69	3.599,00	4.694,00	4.694,00
Fert. P orgánico	kg	39,60	192,07	352,60	352,60
Melaza	kg	11,40	15,19	15,19	18,98
Harina de maíz	kg	0,00	0,00	0,00	0,00
Uso tractor	h	4,85	4,60	4,80	5,00
Riego	m ³	4.778,40	6.371,20	6.371,20	7.964,00
Agua aplicaciones	m ³	0,39	0,52	0,52	0,65
Electricidad	kWh	3.010,21	4.560,92	9.121,84	9.121,84
Poda	kg	20.160,00	26.880,00	26.880,00	33.600,00
Uso chipeadora	L	604,80	806,40	806,40	1.008,00

En la etapa de cosecha, se considera solo el acarreo de personas para el retiro del fruto del árbol, donde se consideran 8 horas de trabajo diario por 3,5 meses (promedio de duración

de la cosecha que va de 2 a 5 meses, ver Anexo A). Las horas requeridas para esta labor se presentan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Datos caso agroecológico etapa cosecha.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Uso tractor	h	123,20	246,40	246,40	560,00

La etapa de distribución se realiza por medio de un camión tráiler a diésel desde el predio hasta la distribuidora. La distancia recorrida se presenta en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Datos caso agroecológico etapa distribución.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Uso camión	km	15,40	15,40	15,40	15,40

Capítulo 5

Evaluación de Potencial de Calentamiento Global

En este capítulo se presentan los factores de emisión y los resultados correspondientes al ACV bajo la categoría de impacto ambiental de Potencial de Calentamiento Global para el caso convencional y agroecológico, donde se contrastarán los resultados obtenidos para cada caso. Se destaca que se presentan resultados considerando por un lado, las emisiones directas y por otro, bajo las directrices del IPCC que incluyen el cambio de existencias de carbono, con el fin de contrastar las visiones y obtener un análisis más completo.

5.1. Factores de emisión

Para el Potencial de Calentamiento Global se contemplan los flujos presentes en la Figura 5.1, donde se incluyen las emisiones por la producción de insumos, por la combustión del combustible, por el consumo de energía eléctrica, por la aplicación de fertilizantes, entre otros.

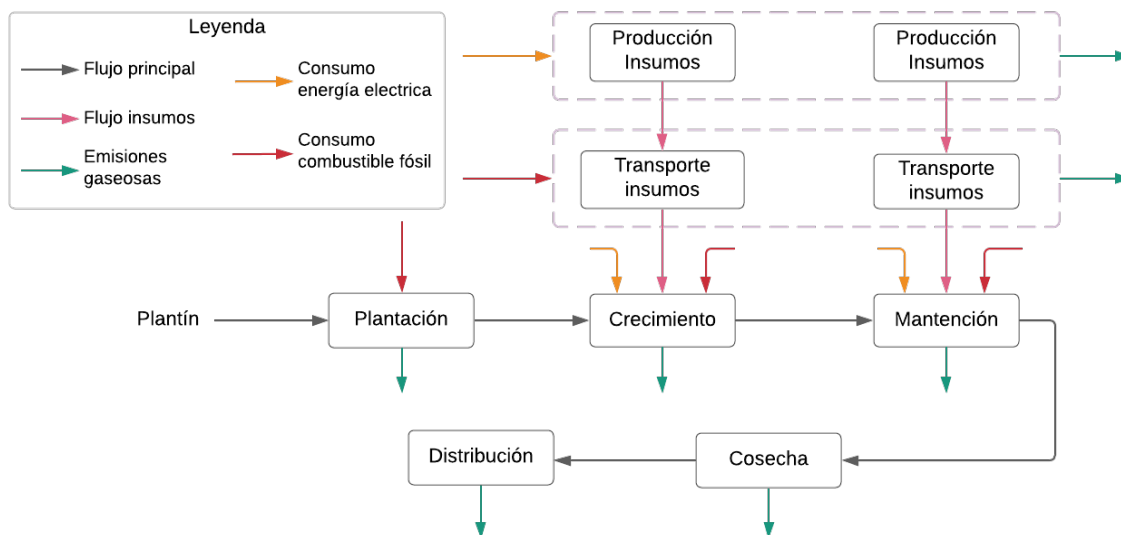


Figura 5.1: Diagrama emisiones gaseosas para el cálculo del Potencial de Calentamiento Global. Fuente: Elaboración propia.

Los factores de emisión se presentan a continuación según la categoría que representan.

5.1.1. Fertilizantes

En la Tabla 5.1 se presentan los factores de emisión de los fertilizantes por su producción y aplicación. Se considera la aplicación solo de urea y compost por estar asociados a una contribución importante al suelo, en el caso del fertilizante orgánico a base de nitrógeno su aplicación es considerada solo para las emisiones de N₂O. No se reporta en bibliografía una emisión directa por el uso de fertilizantes en base a fósforo, por lo que no se considera en este estudio.

Tabla 5.1: Factores de emisión por fertilizantes.

Ítem	Factor de emisión		Referencia
	Valor	Unidad	
Producción Urea	1,85	kg CO ₂ /kg urea	[91]
Aplicación Urea	0,73 ^a	kg CO ₂ /kg urea	[81]
Producción Fósforo ^b	0,46	kg CO ₂ /kg P ₂ O ₅	[91]
Producción Compost	4,00 · 10 ⁻³	kg CH ₄ /kg residuos	[92]
	2,40 · 10 ⁻⁴	kg N ₂ O/kg residuos	[92]
Aplicación Compost	0,02 ^c	kg N ₂ O/kg N	[81]
Producción Fert. N orgánico	2,06 · 10 ⁻⁴	kWh/kg	[93] [94]
Producción Fert. P orgánico	0,88	kg CO ₂ /kg P	[95] [96]

^a Valor de IPCC 0,2 kg C-CO₂/kg urea convertido usando el factor 44/12.

^b Producción de fertilizante base fósforo

^c Valor de IPCC 0,01 kg NO₂-N/kg N convertido usando el factor 44/28.

5.1.2. Agroquímicos

En la Tabla 5.2, se presentan los factores de emisión de los agroquímicos por su producción. Se considera que la aplicación de estos tiene su mayor emisión en el uso del tractor.

Tabla 5.2: Factores de emisión por agroquímicos.

Ítem	Factor de emisión		Referencia
	Valor	Unidad	
Producción Glifosato	33,37	kg CO ₂ /kg i.a. ^a	[97]
Producción Aceite Parafínico ^b	73.000,00	kg CO ₂ /TJ	[81]
Producción Melaza	0,27	kg CO ₂ /kg	[99]
Producción Harina de maíz	0,56	kg CO ₂ /kg	[99]

^a i.a.: Ingrediente Activo

^b Derivado del petróleo [98]

5.1.3. Quema de residuos agrícolas

Se presentan en la Tabla 5.3 los factores de emisión de la quema de residuos agrícolas y de madera en relación al grosor del tronco.

Tabla 5.3: Factores de emisión por quema de residuos agrícolas.

Ítem	Factor de emisión		Referencia
	Valor	Unidad	
Residuos agrícolas	1,52	kg CO ₂ /kg quemado	[81]
	$7,00 \cdot 10^{-5}$	kg N ₂ O/kg quemado	[81]
Madera 1-3 in	$2,04 \cdot 10^{-3}$	kg CH ₄ /kg quemado	[100]

5.1.4. Matriz energética

El factor de emisión de la matriz energética de Chile, se presenta en la Tabla 5.4. La matriz energética en Chile se compone principalmente de la energía proveniente de hidroeléctricas y de las termoeléctricas en base a carbón [101].

Tabla 5.4: Factores de emisión por matriz energética.

Ítem	Factor de emisión		Referencia
	Valor	Unidad	
Matriz energética	435,30	kg CO ₂ /MWh	[79]

5.1.5. Transporte

En la Tabla 5.5, se presentan los factores de emisión de los combustibles utilizados en este estudio por su producción y uso.

Tabla 5.5: Factores de emisión por transporte.

Ítem	Factor de emisión		Referencia
	Valor	Unidad	
Producción Diesel	73.000,00	kg CO ₂ /TJ	[81]
	77.400,00	kg CO ₂ /TJ	[81]
Uso Diesel	3,90	kg CH ₄ /TJ	[81]
	3,90	kg N ₂ O/TJ	[81]
Producción Fuelóleo	73.000,00	kg CO ₂ /TJ	[81]
	74.100,00	kg CO ₂ /TJ	[81]
Uso Fuelóleo	7,00	kg CH ₄ /TJ	[81]
	2,00	kg N ₂ O/TJ	[81]

5.1.6. Cambio en las existencias de carbono

El cambio en las existencias de carbono del sistema viene reportado por el IPCC para cuantificar el impacto dentro de sistemas agrícolas [81], este es caracterizado por el cambio de **Biomasa**, **Materia orgánica muerta** y **Carbono del suelo**. Los datos necesarios para el cambio en la **biomasa** son: existencias de biomasa antes (B_{antes}) y después de la conversión ($B_{después}$); la fracción de carbono de materia seca (CF); la tasa de crecimiento promedio de biomasa nativa (G_{total}) y del palto para el año 8 (G_{palto}); y la relación entre biomasa subterránea y área (R). Para la **materia orgánica muerta** la fracción de carbono (CF) de la materia muerta para la hojarasca y la madera. Finalmente, para el **carbono del suelo**, el factor de emisión para clima templado (EF) y para el suelo gestionado solo con palto (EF_{conv}) y con bosque nativo (EF_{agro}) al año 8. Todos estos datos y factores de emisión se presentan en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Factores de emisión y datos para el cambio en las existencias de C.

Ítem	Factor de emisión		Referencia
	Valor	Unidad	
Biomasa			
B_{antes}	120,00	ton d.m. ^a /ha	[81]
$B_{después}$ conv.	0,00	ton d.m./ha	[81]
$B_{después}$ agro.	80,74 ^b	ton d.m./ha	[81]
$CF_{defecto}$	0,47	ton C/ton d.m.	[81]
G_{total}	4,92	ton d.m./(ha · año)	[81]
G_{palto}	45,63	ton d.m./(ha · año)	[102]
R	0,23	ton d.m./ton d.m.	[81]
Materia orgánica muerta			
$CF_{hojarasca}$	0,37	ton C/ton d.m.	[81]
CF_{madera}	0,50	ton C/ton d.m.	[81]
Carbono del suelo			
EF	10,00	ton C/(ha · año)	[81]
EF _{conv}	1,8	ton C/(ha · año)	[103]
EF _{agro}	4,06	ton C/(ha · año)	[103]

^a d.m.: Materia muerta, del ingles *dead matter*.

^b Se conserva cerca del 70 % del bosque nativo presente en la zona.

5.2. Cuantificación del impacto

El Potencial de Calentamiento Global fue calculado en relación a las emisiones directas producidas en el sistema estudiado para cada caso. Los cálculos para cada etapa se encuentran detallados en la sección de Anexo C.

Los resultados totales de esta categoría para los casos convencional y agroecológico se

presentan en la Tabla 5.7 donde se observa que el caso convencional tiene un mayor impacto en términos de Potencial de Calentamiento Global que el caso agroecológico con un valor de 20,99 kg CO₂eq versus 9,70 kg CO₂eq por kg de palta, respectivamente. Siendo las emisiones del caso convencional un 53,79 % mayores al del caso agroecológico.

Tabla 5.7: Impacto ambiental total bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global.

Caso	Valor [kg CO ₂ eq/kg palta]
Convencional	20,99
Agroecológico	9,70

El impacto del caso convencional es dos veces mayor al del caso agroecológico. El impacto se distribuye, principalmente, en las etapas de plantación, crecimiento y mantenimiento, como se observa en la Figura 5.2, donde el caso convencional tiene un mayor impacto en casi todas las etapas menos en la cosecha.

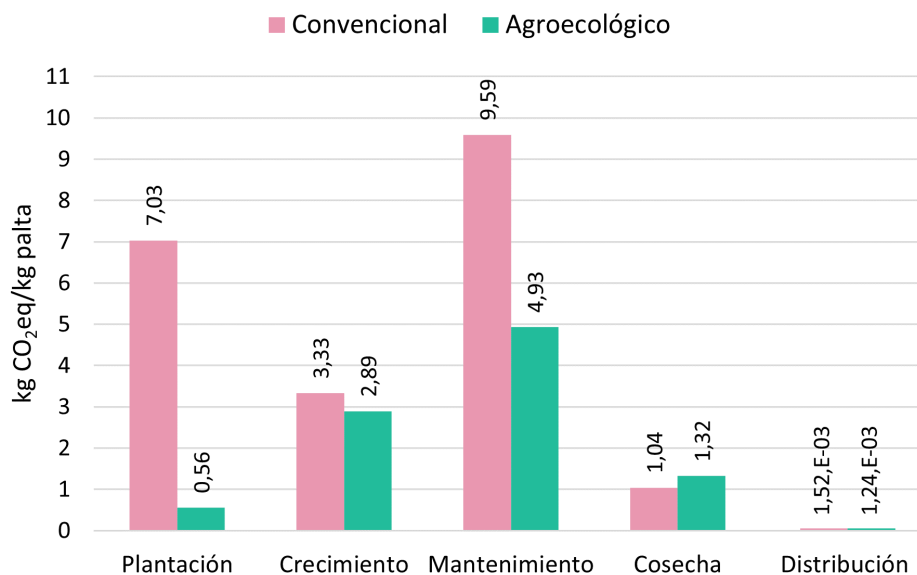


Figura 5.2: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas del caso convencional y el caso agroecológico.

La emisión del caso agroecológico es de 1,32 kg CO₂eq versus los 1,04 kg CO₂eq del caso convencional en la cosecha. Este resultado se asocia a la densidad de árboles del caso agroecológico que es cercano al doble del caso convencional, por lo que el gasto en combustible del tractor por el acarreo de los trabajadores, es mayor.

A pesar de que la emisión en la etapa de cosecha es mayor en el caso agroecológico, esta no es significativamente mayor en comparación a las otras etapas donde el caso convencional tiene un impacto de dos a siete veces mayor al agroecológico, como son las etapas de mante-

nimiento y plantación, respectivamente.

El impacto por etapa del cultivo se puede dividir en diversas actividades, como se observa en la Figura 5.3 donde se presentan las entradas por etapas y las emisiones referentes a diferentes actividades.

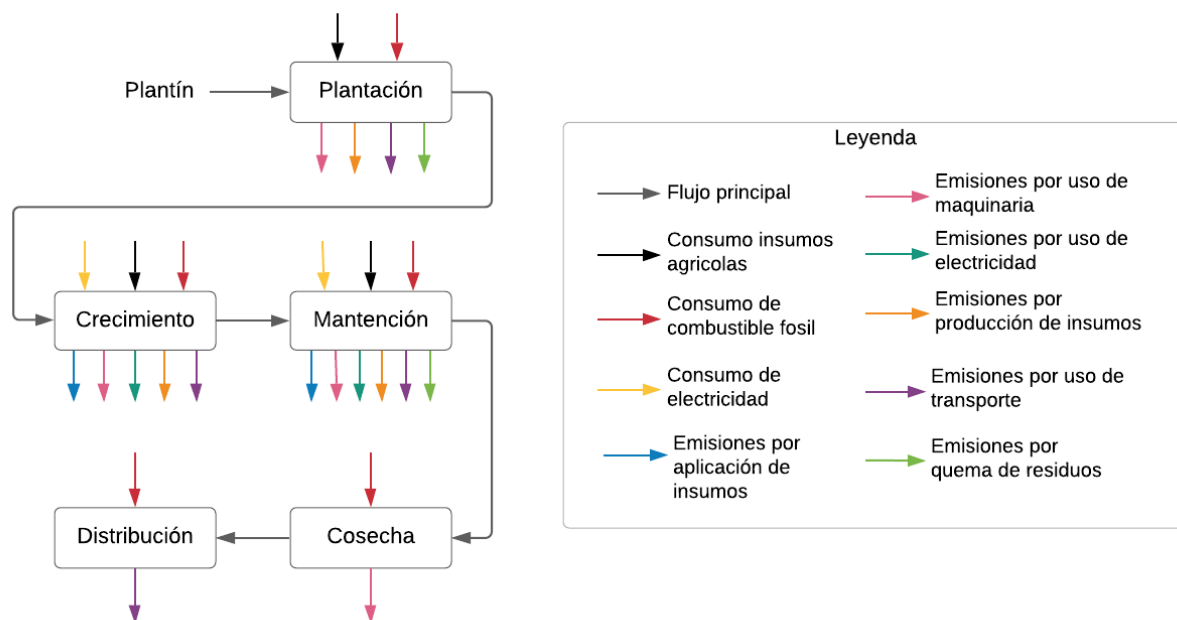


Figura 5.3: Diagrama de bloques de las emisiones emitidas por etapas para la categoría de Potencial de Calentamiento Global.

En la etapa de plantación, la diferencia del impacto entre los casos se debe mayoritariamente a la quema de residuos del caso convencional, como se observa en la Figura 5.4. Esto refleja el gran impacto que produce esta práctica, liberando GEI que se pueden reducir o eliminar con una adecuada gestión. Por otro lado, se observa que el uso de maquinaria en aquella etapa, el impacto del caso agroecológico es mayor al convencional. Esto último se debe principalmente a que por bibliografía en el caso convencional el proceso de despeje y preparación del terreno es realizado por un tractor, mientras que en caso agroecológico el trabajo es realizado por una excavadora, la cual consume más combustible y realiza más horas de trabajo en comparación.

En el caso de la mantención, la actividad que presenta mayor emisión es la aplicación de los insumos en ambos casos. Esta actividad incluye la aplicación de los insumos más las emisiones directas e indirectas de N_2O . Debido a que en el caso agroecológico se usan fertilizantes de origen orgánico, las emisiones asociadas a esta actividad son menores al convencional pues las fuentes de nitrógeno van liberando el compuesto de a poco, por lo que no está disponible en grandes cantidades en un corto periodo de tiempo, como ocurre con la urea, provocando que sea más propensa a la volatilización y lixiviación en forma de N_2O . Efecto potenciado por la concentración de nutrientes, que es mayor en los fertilizantes sintéticos que en los orgánicos, por lo que hay más nitrógeno disponible para ser liberado en forma de N_2O .

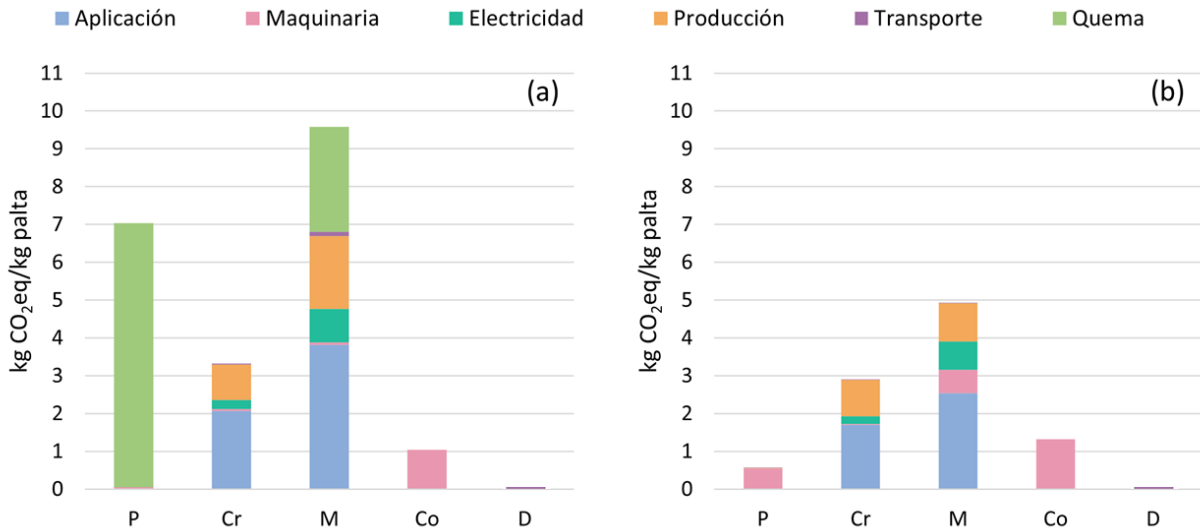


Figura 5.4: Resultados del Potencial de Calentamiento Global por actividad para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

Se observa que en el mantenimiento, el impacto por producción de insumos y combustible es mayor en el caso convencional que en el agroecológico. Esto es debido a que los insumos utilizados por el caso convencional deben fabricarse externamente al predio, no así el compost utilizado en el caso agroecológico lo que disminuye su impacto (en la producción viene contemplado todo el proceso, incluida la extracción y transporte de materia prima). Este resultado refleja que el cambio en los insumos podría disminuir a la mitad los GEI liberados producto de su fabricación.

Para cerrar con la mantención, se destaca que la quema de los residuos de poda, eleva las emisiones de GEI del sistema, aumentando el impacto de la etapa llegando a ser casi el doble que el caso agroecológico.

En el crecimiento, la diferencia entre los casos en la aplicación no es significativa, en comparación a la mantención. Esto se debe a que en el año 1 del caso agroecológico se ha de aplicar el doble de compost que en los años posteriores al ser un terreno que no se le ha aplicado antes [70], por lo tanto, el contenido de nitrógeno aportado en la etapa hace que el impacto de la aplicación no se desmarque significativamente del caso convencional.

Con respecto a la electricidad y el transporte, a pesar de que los insumos convencionales vengan del extranjero (mayor recorrido) el impacto es similar en ambos casos, lo que refleja que el impacto del transporte dentro del análisis no es significativo en comparación a las otras actividades (<1% del total). Esto se debe a que se ha de cuantificar solo las emisiones correspondientes a la cantidad que efectivamente llega al predio, es decir, la cantidad de GEI liberado asociado al transporte del insumo corresponde solo a una fracción del total de GEI liberado durante el trayecto. Dicha fracción se determina por una relación de masa entre la capacidad total del transporte y el insumo utilizado según lo señala la norma ISO [77]. En el

Anexo C se presenta en mayor detalle cómo se determina la fracción y cómo se utiliza para obtener el impacto del transporte.

Asimismo ocurre con la etapa de distribución, donde las emisiones atribuibles a cada caso estudiado corresponden a una fracción de los GEI liberados durante el transporte de las palta al centro de distribución, dando como resultado ser la etapa con las emisiones más bajas por kg de palta.

En el estudio realizado por Huiza (2014) se reporta un impacto de 0,43 kg CO₂eq por kg de palta para un cultivo en ladera en la comuna de Quillota, lo que dista significativamente con los 20,99 kg CO₂eq por kg de palta obtenidos para el caso convencional. Esta diferencia se puede atribuir al límite temporal de los análisis, en este caso se considera todo el impacto producido desde la plantación hasta la distribución que son alrededor de 8 años, mientras que en el de Huiza (2014) es solo el de un año, el de la última cosecha.

Por otro lado, los resultados obtenidos en esta sección son congruentes con lo reportado en bibliografía cuando se comparan cultivos convencionales con otros de índole agroecológico. Así es el caso de cultivos estudiados por Yandun (2018), Gavilanes (2018) y Alvarez (2019), donde se obtiene que el cultivo convencional presenta un impacto 50 % mayor al caso agroecológico, resultado similar obtenido en este caso donde se obtiene una diferencia del 53,79 %.

Los resultados obtenidos reflejan que la práctica que presenta un mayor impacto en el Potencial de Calentamiento Global es la quema de los residuos, pues liberan GEI a la atmósfera. Además, la baja emisión del caso agroecológico tiene su origen en la naturaleza de los insumos y en una buena salud del suelo que conlleva a ser menos susceptibles a plagas y enfermedades. Este fenómeno ha provocado que cultivos en transición que han adoptado prácticas como el uso de compost y cubiertas vegetales, vean disminuido o eliminado el uso de pesticidas y herbicidas, así como el de fertilizantes sintéticos, pues la incorporación de materia orgánica al suelo mejora la salud de este y las cubiertas vegetales impiden el crecimiento de maleza [107].

Finalmente, el cultivo agroecológico podría mejorar con la incorporación de técnicas que permitan aumentar su rendimiento, como el uso apropiado de fertilizantes sintéticos, que bajo un buen manejo no tendría repercusiones significativas, bajo esta categoría, en el impacto ambiental.

5.3. Cuantificación del impacto IPCC

Las directrices del IPCC incluyen, además de las cuantificaciones del impacto antes señaladas, los cambios en las existencias de carbono. Estos cambios incluyen los producidos por la biomasa (árboles), materia orgánica y suelo. A continuación se detallan las consideraciones tomadas para esta sección:

- El retiro de biomasa en la etapa de plantación producto del despeje del terreno corresponde a una liberación de carbono.
- Producto de los trabajos realizados para el retiro del bosque nativo, que provoca perturbaciones en el suelo y retiro de la materia orgánica muerta, se libera carbono.

- En la etapa de mantenimiento se produce un retiro parcial de biomasa producto de la poda lo que se traduce en liberación de carbono.
- El crecimiento de biomasa (palto y bosque nativo) en las etapas de crecimiento y mantenimiento constituye una captura carbono.
- La incorporación de hojarasca y madera triturada (*mulch*) al suelo como materia orgánica muerta, por el proceso de descomposición, libera carbono.
- El suelo, producto de los microorganismos presentes en él, captura carbono.

Los cambios en las existencias de carbono se reportan como positivas si se captura y negativas si se liberan. Para incorporar estos resultados al análisis, se transformaron los resultados a kg CO₂eq y se tomó como convención que la liberación de carbono es positiva y la captura es negativa, para ser consecuentes con el estudio. El detalle de los cálculos realizados se presentan en el Anexo C.6.

Entonces, los resultados obtenidos bajo las directrices del IPCC se presentan en la Tabla 5.8. Donde el caso convencional presenta una emisión de 37,15 kg CO₂eq y el agroecológico, de 3,32 kg CO₂eq por kg de palta, siendo el caso convencional casi 13 veces mayor al agroecológico.

Tabla 5.8: Impacto ambiental total de la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global bajo las directrices del IPCC.

Caso	Valor [kg CO ₂ eq/kg palta]
Convencional	37,15
Agroecológico	3,32

Comparado estos resultados con los presentes en la Tabla 5.7, las emisiones del caso convencional aumentan mientras que las del caso agroecológico disminuyen cuando se incorpora el cambio de existencias de carbono al análisis.

Observando la Figura 5.5 es posible observar que existen cambios, en relación a la Figura 5.2, en las etapas de plantación, crecimiento y mantenimiento. Estos cambios, como se aprecia en la Figura 5.6, tienen relación con el flujo de existencias de carbono, que anteriormente no había sido cuantificado.

En particular, se observa que en la etapa de plantación existe un aumento de las emisiones por parte de ambos casos, que son producto del cambio de las existencias de carbono, como se aprecia en mayor detalle en la Figura 5.7. Las emisiones producto del cambio en las existencias de carbono son 6 veces mayor en el caso convencional y cerca de 2 veces mayor en el agroecológico en comparación a las emisiones contabilizadas anteriormente. Esto se debe a que al retirar el bosque nativo se retiran existencias de carbono en forma de biomasa. Además, el movimiento de la tierra libera el carbono almacenado en la materia orgánica presente en el suelo. Estos cambios son mayores en el caso convencional que en el agroecológico

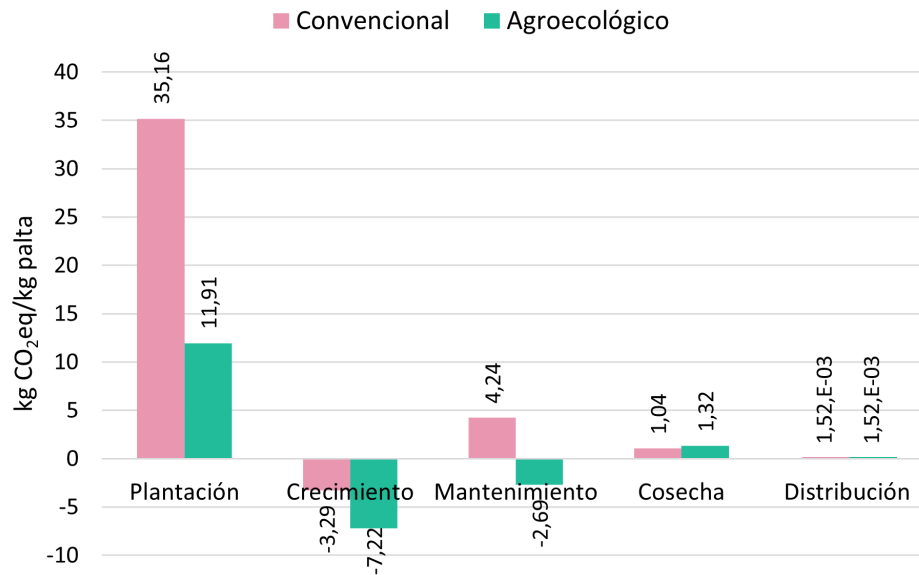


Figura 5.5: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas del caso convencional y el caso agroecológico siguiendo las directrices del IPCC.

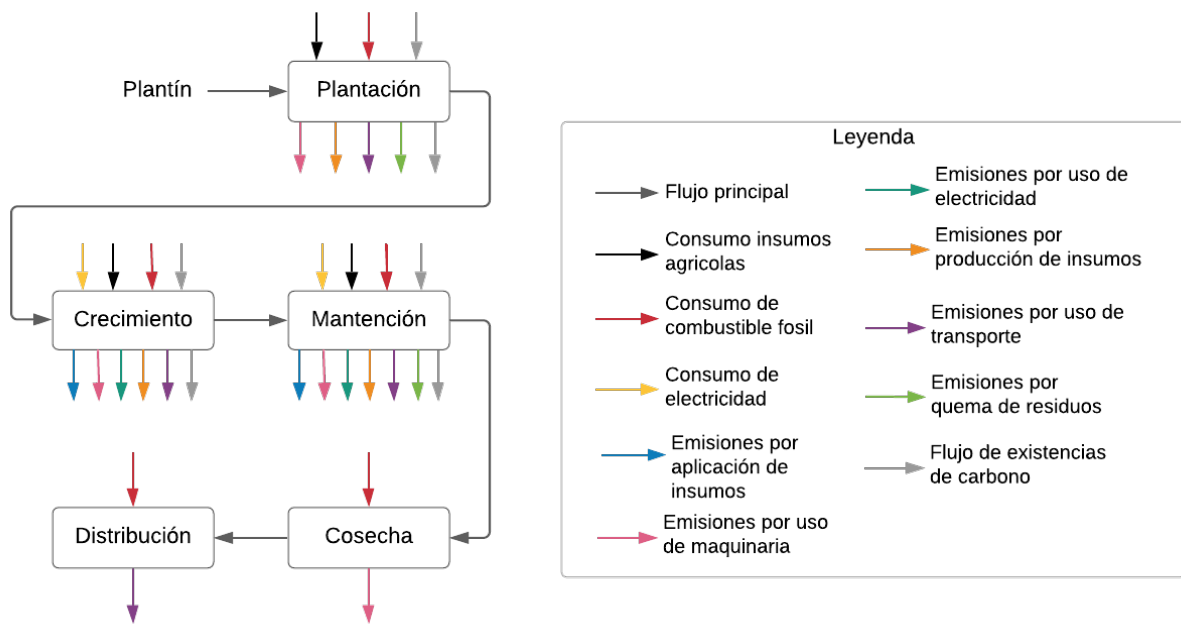


Figura 5.6: Diagrama de bloques de las emisiones emitidas por etapas para la categoría de Potencial de Calentamiento Global, siguiendo las directrices del IPCC.

pues en este último solo se retira cerca del 30% del bosque nativo. Esta diferencia hace que las emisiones del caso agroecológico sean cercanas a un tercio de lo que es el caso convencional.

Por otra parte, se observa un cambio en las emisiones en la etapa de crecimiento en ambos

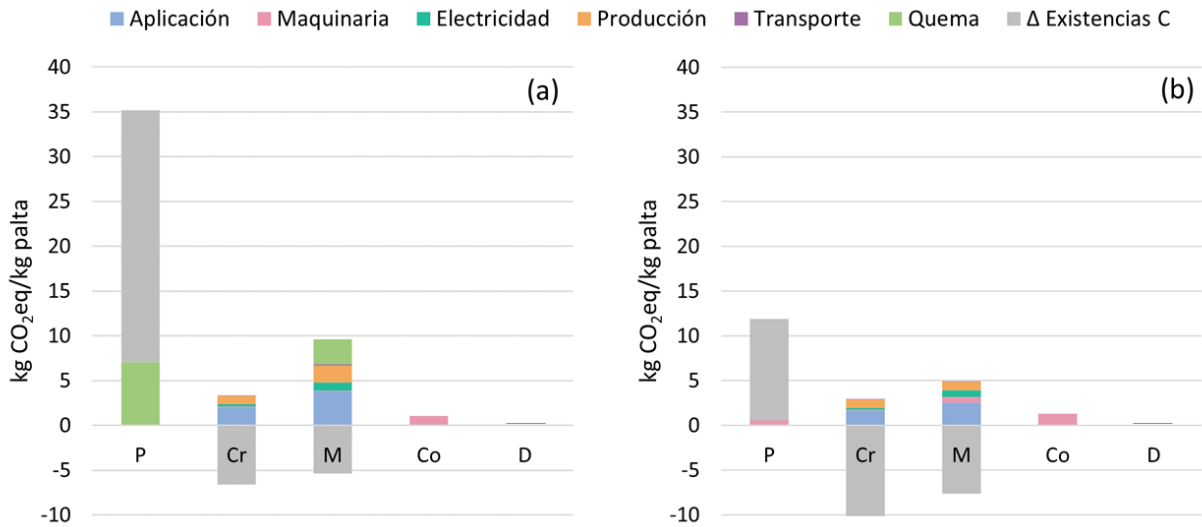


Figura 5.7: Resultados del Potencial de Calentamiento Global según las directrices del IPCC por actividad para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

casos. Ahora existen emisiones negativas lo que significa que se capta CO₂eq. Esto se debe a que existe un aumento en la biomasa del palto, lo que conlleva a una captura de carbono lo que “compensa” las emisiones directas teniendo un resultado neto negativo. En particular, en el caso agroecológico está presente el bosque nativo, lo que hace que la captura de carbono sea mayor que en comparación con el caso convencional donde solo está el palto. Además, en el caso agroecológico al tener un suelo más rico en materia orgánica, la captura de carbono por parte de este es mayor que en caso convencional.

En la etapa de mantenimiento se observa que el caso convencional continua con una emisión positiva, pero en menor magnitud que en el presentado en la Figura 5.2, mientras que las emisiones del caso agroecológico son negativas. La disminución en las emisiones tienen las mismas causas que las presentadas para el crecimiento, mientras que el aumento de las emisiones en el caso convencional se debe a que existe poda, lo que libera carbono de la biomasa, y como esta es quemada las emisiones liberadas por acciones ajenas a las existencias de carbono, no logran ser compensadas por la captura de carbono.

En el caso agroecológico también existe poda y una pérdida de carbono asociada, que a diferencia del caso convencional esta no es quemada sino incorporada en forma de *mulch*. La descomposición de la cubierta vegetal (hojarasca y madera muerta) libera carbono, por lo que esto más la liberación de carbono por la poda (pérdida en carbono en la biomasa) se traduce en una menor captura de carbono que la obtenida en el crecimiento, aún cuando la captura por crecimiento de biomasa es mayor en el mantenimiento.

En las etapas de cosecha y distribución no se presentan diferencias con respecto a la cuantificación realizada sin considerar los cambios en las existencias de carbono.

A pesar de que disminuyan las emisiones del caso convencional en los etapas de creci-

miento y mantenimiento, se presenta un impacto aún mayor que cuando no se consideraba el cambio en las existencias. Esto refleja el impacto que tiene el retiro completo del bosque nativo, donde los cambios en las existencias de carbono son tan grandes que no se logran compensar con el crecimiento del cultivo (durante el tiempo de estudio).

Por otra parte, los resultados del caso agroecológico demuestran que el reciclaje de materia orgánica contribuye al secuestro de carbono tal como lo señalan algunos autores [107]. Esto debido a que el aumento de la materia orgánica fomenta el aumento de los microorganismos presentes en el suelo que al estar formados de carbono (como cualquier ser vivo) su crecimiento y proliferación es cuantificado como captura de carbono. Además, la presencia de materia orgánica aumenta el intercambio de cationes, provocando que estén disponibles más nutrientes, pues se impide la formación de compuestos no asimilables por los árboles, lo que resulta fundamental cuando se tiene en consideración que el caso agroecológico no se utilizan fertilizantes sintéticos de alta concentración y disponibilidad inmediata de nutrientes [103].

Asimismo, se destaca que la conservación del bosque nativo, conformando un sistema agroforestal, lleva a que se logre mitigar las emisiones de CO_2eq producto de la deforestación en un periodo más corto que con el manejo convencional [103]. Pues la tasa de absorción de carbono aumenta cuando se considera la captura realizada por los árboles nativos y los paltos [103].

En suma, bajo este análisis, se destaca que si bien la quema contribuye de manera importante a las emisiones de CO_2eq , el impacto sobre el ecosistema al retirar el bosque nativo y el movimiento de tierra, son los que provocan un mayor impacto en las emisiones totales de CO_2eq al liberar carbono. Por lo que buscar conservar el bosque nativo es una de las prácticas que puede llevar a que el impacto del caso convencional se vea significativamente reducido, especialmente en la etapa de plantación. Sin embargo, considerando que el cultivo de palto tiene una duración de años, eliminar la quema puede resultar en una decisión que disminuya significativamente las emisiones de GEI y por ende, el impacto ambiental bajo esta categoría.

Capítulo 6

Evaluación del uso de agua

En el presente capítulo se detallan los factores de emisión y los resultados de los casos convencional y agroecológicos bajo la categoría de impacto de uso de agua. Los resultados obtenidos son por caso, por tipo de huella, y por actividad.

6.1. Factores de emisión

Los flujos de agua que se utilizan para el cálculo del uso de agua, se presentan en la Figura 6.1, donde se incluyen los flujos de agua verde, azul, gris e indirectas por etapas.

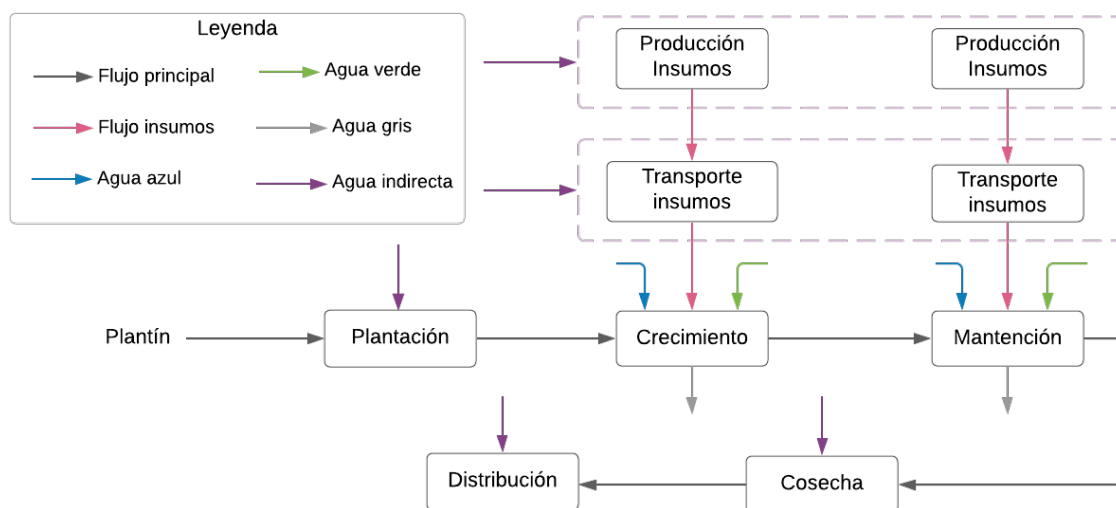


Figura 6.1: Diagrama de flujo de agua para el cálculo del uso de agua.
Fuente: Elaboración propia.

6.1.1. Huella azul y verde

Para el cálculo de la huella hídrica azul y verde se deben conocer las características climáticas de la zona de estudio, tal como la evapotranspiración y la precipitación, dichos datos se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Datos para cálculo HH azul y verde.

Ítem	Dato		Referencia
	Valor	Unidad	
ETo ^a Quillota	1.129,00	mm/año	[108]
Precipitación Quillota	462,00	mm/año	[109]
ETo Hijuelas	1.173,00	mm/año	[108]
Precipitación Hijuelas	462,00	mm/año	[109]

^a Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia fue obtenida del estudio realizado por Santibañez et al. (2015), si bien el valor es para un año, se tomó como referencia para determinar el de los años 1 al 8 en cada caso, realizando una variación porcentual al azar alrededor del número reportado, el detalle de lo realizado se presenta en el Anexo D.1.

De manera análoga se trató la precipitación de la zona, donde se tomo como supuesto que la precipitación de la zona de Valparaíso es representativa de las zonas de estudio, las variaciones de la precipitación del año 1 al 8 se muestran en el Anexo D.1.

6.1.2. Huella gris

Para el cálculo de la Huella hídrica gris se debe conocer la fracción de lixiviación (α) y la concentración máxima de contaminante aceptada legalmente ($C_{mác}$) según lo expresa la expresión 3.4, estos datos se presentan en la Tabla 6.2.

Debido a que en los sistemas agroecológicos existe una mejor salud del suelo, la cantidad de nutrientes que queda disponible para lixiviar se reduce [103], es por ello que la fracción de lixiviación de los nutrientes provenientes de los fertilizantes de origen orgánico son menores a los de origen sintético.

Por otro lado, se destaca que se toma como valor representativo de la concentración máxima aceptable del herbicida a la de 2,4-D, herbicida sintético para plantas de hojas anchas [118].

Los cálculos realizados para la obtención de esta huella, se presentan en el Anexo D.2.

6.1.3. Huella indirecta

En la Tabla 6.3 se presentan los valores de huella hídrica indirecta para cada insumo utilizado en cada caso estudiado en esta oportunidad.

La huella indirecta de la mayoría de los insumos presentados en la Tabla 6.3 son obtenidos de estudios específicos para el insumo. Las excepciones son el cálculo para el fertilizante sintético a base de fósforo y el fertilizante N orgánico. En el caso del primero no se encontró una referencia que reportara la huella virtual de este insumo, por lo que se procedió a estimar su valor por medio del agua que se usa en uno de sus procesos [122][123] más el agua referente a

Tabla 6.2: Datos para cálculo HH gris.

Ítem	Dato		Referencia
	Valor	Unidad	
Fracción de lixiviación (α)			
Nitrógeno	0,10	-	[110]
Fósforo	0,01	-	[111][112]
Aceite	$4,00 \cdot 10^4$	-	[113]
Glifosato	$3,00 \cdot 10^4$	-	[114][115]
Compost N	0,05	-	[90]
Compost P	0,0047	-	[90]
Fert. N orgánico	0,05	-	[90]
Fert. P orgánico	0,0047	-	[90]
Concentración máxima^a ($C_{m\acute{a}x}$)			
Nitrógeno	$1,50 \cdot 10^{-3}$	kg/m ³	[116]
Fósforo	$9,00 \cdot 10^{-5}$	kg/m ³	[116]
Aceite	$6,00 \cdot 10^{-3}$	kg/m ³	[116]
Herbicida	$3,00 \cdot 10^{-5}$	kg/m ³	[117]

^a Concentración máxima aceptable de contaminantes

Tabla 6.3: Datos para cálculo HH indirecta.

Ítem	Huella hídrica producto		Referencia
	Valor	Unidad	
Urea	0,18	m ³ /kg	[119]
Fósforo	14,84 ^a	m ³ /MWh	[121]
	$1,88 \cdot 10^{-3}$	m ³ /kg P ₂ O ₅	[122][123]
Pesticida ^b	27,80	L/L	[124]
Herbicida	0,22	m ³ /kg	[119]
Compost	$3,30 \cdot 10^{-4}$	m ³ /kg	[125]
Fert. N orgánico	$2,06 \cdot 10^{-4}$	m ³ /kg	[93][94]
Fert. P orgánico	1,88	m ³ /kg	[126]
Melaza	0,12	m ³ /kg	[127]
Harina de maíz	3.055,00	L/kg	[128]
Combustible	27,80	L/L	[124]
Electricidad	16,64	m ³ /MWh	[121]

^a Basado en el consumo energético de la producción de fósforo de 29,20 MJ/kg P en Dinamarca [120]

^b Pesticida obtenido de la refinería del petróleo

la energía eléctrica utilizada [121]. Con respecto al segundo, al ser preparado por una reacción enzimática propia de la empresa proveedora, se procedió a estimar su huella por medio de una estimación en la capacidad de producción [93] y del rendimiento de la reacción, esta

última desde un trabajo realizado por estudiantes de ingeniería civil de la Universidad de Chile [94]. El detalle del cálculo realizado se presenta en el Anexo D.3.

6.2. Cuantificación del impacto

El uso de agua fue calculado usando la clasificación de huella hídrica subdividida en: huella hídrica verde, azul, gris e indirecta. El uso de agua total de cada caso se presenta en la Tabla 6.4 donde se observa que el uso de agua del caso convencional total es de 40,34 m³ mientras que el del caso agroecológico es de 15,25 m³ por kg de palta. Dicho resultado refleja que el uso de agua en el caso agroecológico representa un 37,80 % del caso convencional.

Tabla 6.4: Impacto ambiental total bajo la categoría de impacto de uso de agua.

Caso	Valor [m ³ agua/kg palta]
Convencional	40,34
Agroecológico	15,25

De las etapas, las que no presentan mayor diferencia entre los casos de estudio son plantación, cosecha y distribución, tal como se observa en la Figura 6.2, donde para ambos casos el uso de agua en las etapas de plantación y cosecha es de 0,02 m³ de agua y 0,01 m³ de agua por kg de palta, respectivamente.

El desglose del impacto provocado por el uso de agua en las diversas etapas, se presenta en la Figura 6.3.

Para la etapa de distribución, el caso convencional presenta un uso de $1,40 \cdot 10^{-5}$ m³ de agua y para el caso agroecológico, $1,20 \cdot 10^{-5}$ m³ de agua por kg de palta. Estas similitudes responden a que las distancias que recorre el camión son similares en ambos casos, por lo que el gasto de agua en estas etapas correspondientes a el uso de combustible y de la producción de insumos, como se observa en la Figura 6.4, son cercanas y se diferencian principalmente en el rendimiento de cada caso.

En el caso del crecimiento y mantenimiento, el caso convencional presenta un mayor uso de agua que el caso agroecológico, siendo en el crecimiento más del doble y en el mantenimiento tres veces mayor. El mayor uso de agua viene dado por la aplicación del recurso hídrico, ver figuras a.1 y b.1 de la Figura 6.4, que incluye el agua de riego y el agua necesaria para diluir los contaminantes que llegan al agua (huella hídrica gris). Esto refleja el impacto que tienen las técnicas agroecológicas versus las convencionales en el manejo del agua y en la cantidad de contaminantes que llegan al agua.

Dentro de las demás actividades (figuras a.2 y b.2 de la Figura 6.4), el mayor uso lo tiene la producción de insumos. El impacto de esta actividad es similar en los ambos casos estudiados, lo que refleja que el cambio en los insumos no implica un cambio significativo del agua

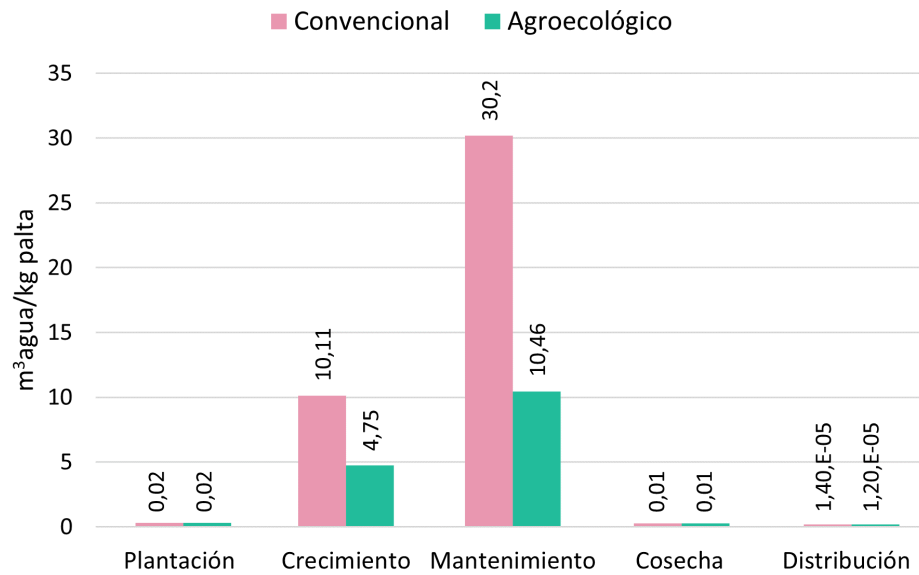


Figura 6.2: Comparación del uso de agua por etapas del caso convencional y el caso agroecológico.

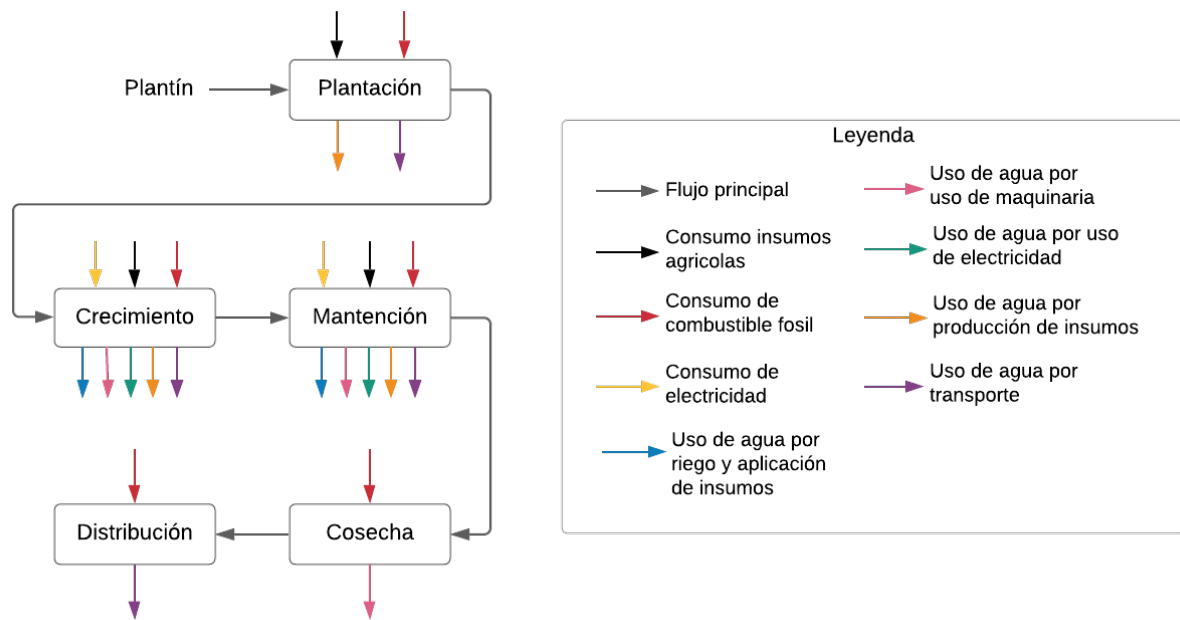


Figura 6.3: Diagrama de bloques de las emisiones emitidas por etapas para la categoría de uso de agua.

requerida para su elaboración.

El uso de electricidad es similar en cada caso, siendo un poco mayor el del caso convencional, alza asociada al tipo de riego, pues el gasto por el riego a microaspersión es mayor al asociado al riego por goteo [129][130].

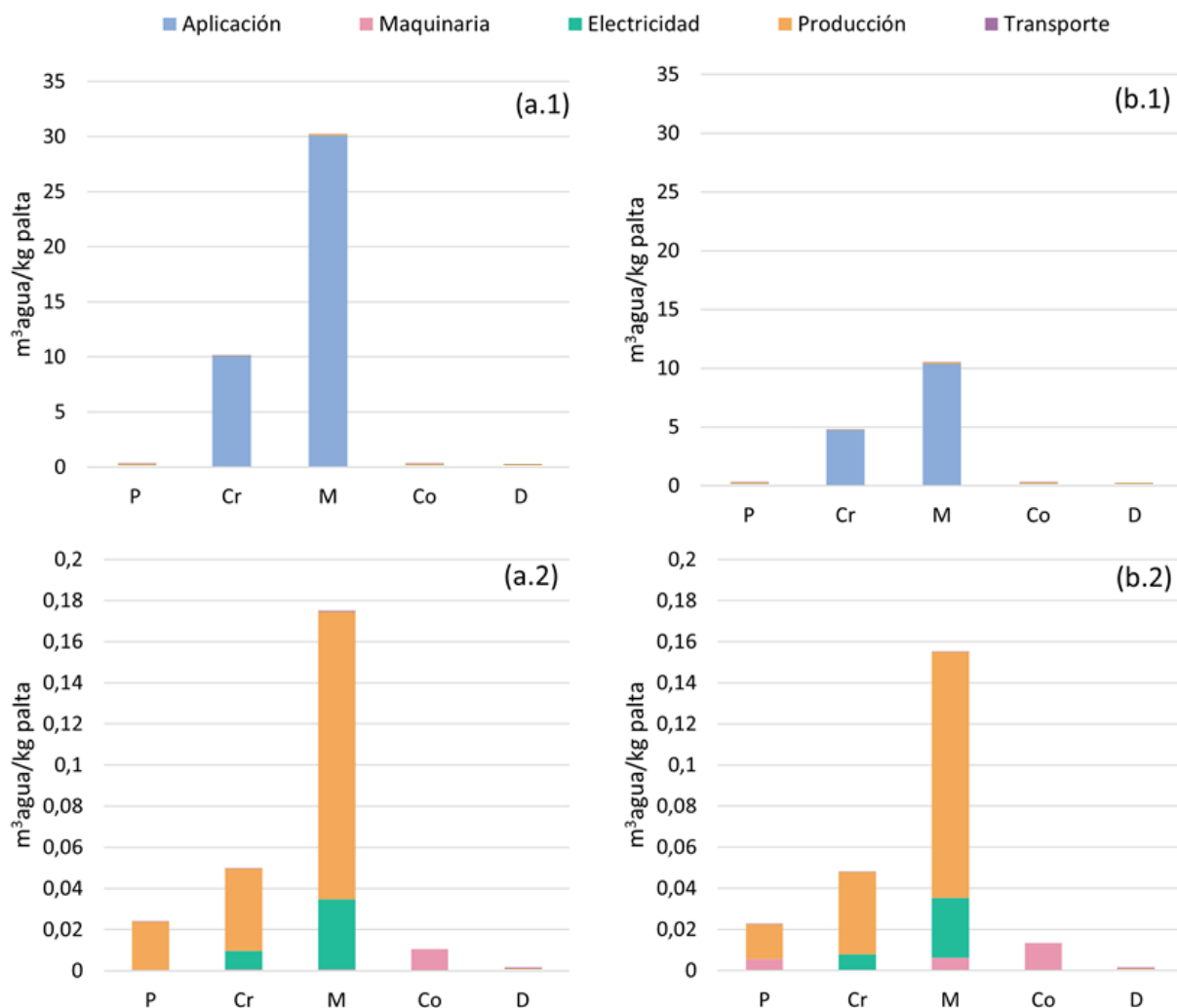


Figura 6.4: Resultados del uso de agua por actividad para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, total (.1) y específico para emisiones menores a 1 m³ (.2), para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

Luego sigue el uso de agua asociado a la maquinaria, donde el caso agroecológico presenta un mayor impacto atribuido a la densidad de árboles que implica un recorrido más grande y, por consiguiente, un gasto de combustible superior que se traduce en un mayor uso de agua.

Finalmente, el transporte representa el menor uso de agua en ambos casos. Este viene condicionado a lo que realmente usa el transporte, similar a lo que ocurre en la categoría de potencial de calentamiento global, por lo que el uso de agua de estas actividades se diluye cuando se estudia por kg de palta.

Ahora, revisando el uso de agua por tipo de huella para cada caso por etapa, se observa de la Figura 6.5 que la huella hídrica gris es la que protagoniza el uso de agua en ambos casos en las etapas con mayor uso, que son el crecimiento y el mantenimiento. Este resultado refleja que en ambos casos se necesita una cantidad de agua considerable (más del doble de los otros

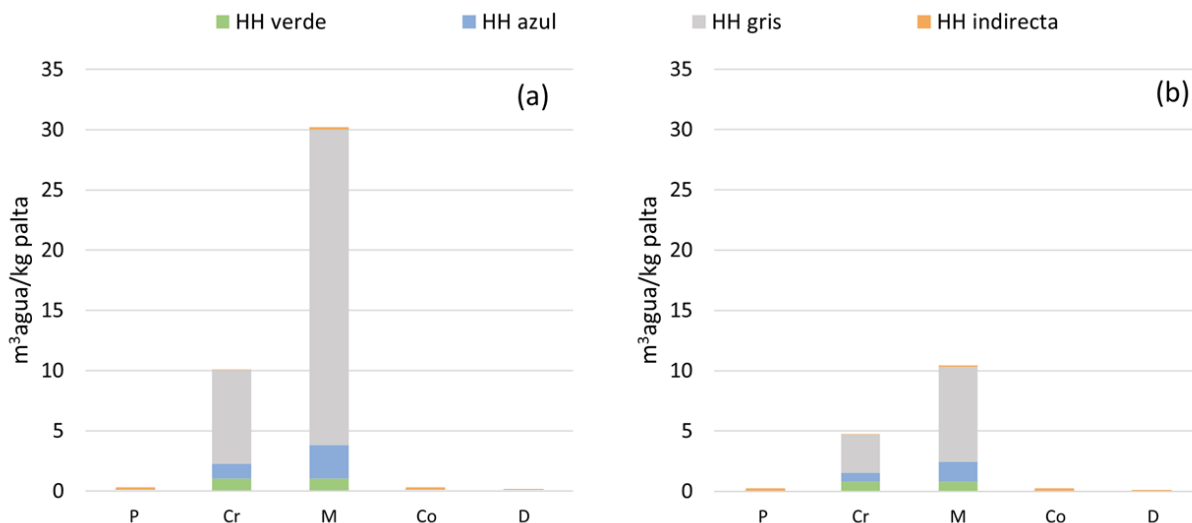


Figura 6.5: Resultados del uso de agua por tipo de huella para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

tipos de huella hídrica) para compensar la contaminación provocada por los nutrientes que llegan a las fuentes de agua.

La huella hídrica gris del caso convencional es evidente mayor al del caso agroecológico, lo que encuentra su razón en el uso de fertilizantes sintéticos, que al ser concentrados y diseñados para el uso directo, cuando no es usado por el cultivo (escenario que ocurre comúnmente por la sobrealimentación de los cultivos) este lixiviar y llega a las fuentes de agua, contaminándolas [131]. Del mismo modo ocurre con el uso de pesticidas y herbicidas, donde el compuesto no utilizado logra lixiviar contaminando las aguas y, al ser un compuesto sintético y peligroso para la salud de las personas y del ecosistema, las concentraciones legales de dichos compuestos es particularmente baja, por lo que el agua que se requiere para compensar la concentración es alta [132].

Con respecto a la huella hídrica azul, que refleja el agua usada en el riego y en la aplicaciones de insumos, el caso convencional presenta un mayor uso del recurso hídrico que el caso agroecológico siendo cercano al doble con un valor de $4,01 \text{ m}^3$ por kg de palta versus un $2,43 \text{ m}^3$ por kg de palta del caso agroecológico. Esto es producto, en primer lugar, del agua utilizada para el riego, que al ser por microaspersión es menos eficiente que el riego por goteo [13] por lo que se necesita aplicar más agua para cubrir las necesidades del cultivo. En segundo lugar, se encuentra el gasto por la aplicación de pesticidas y herbicidas que necesitan ser diluidos para ser aplicados (ver Anexo B.2), mientras que en el caso agroecológico su uso se limita solo a la preparación de los microorganismos de montaña. Como tercer punto, el uso de microorganismos de montaña como micorrizas permite aprovechar mejor el agua disponible, por lo que su ausencia en el caso convencional lleva a un mayor uso de agua de riego [133]. Finalmente, a diferencia del caso agroecológico, al no tener una capa protectora como *mulch*, no se retiene la humedad requiriendo el cultivo un mayor riego [134].

La huella hídrica verde es similar en ambos casos, debido principalmente a que ambos

casos se encuentran en la provincia de Quillota, por lo que la precipitación y evapotranspiración de cada zona en estudio es similar, en general tienen condiciones climáticas similares. Luego, la diferencia en los resultados presentados se atribuyen principalmente a la diferencia de rendimiento en cada caso.

Finalmente, en relación a la huella hídrica indirecta, esta es la menor de las huellas en ambos casos y refleja el agua utilizada para producir los insumos (agrícolas y combustible), la llamada “agua virtual”. No se presenta una diferencia significativa en el uso de agua por kg de palta para ningún caso en ninguna etapa, reflejando lo que ya se visualizaba en la Figura 6.4, donde un cambio potencial en los insumos utilizados por un u otro caso no implica un cambio significativo en el agua requerida para su elaboración.

Osorio et al. (2013) realiza un estudio de la huella hídrica en palta para las diferentes regiones en donde se cultiva, entre ellas la de Valparaíso. En su estudio, obtiene un valor de huella azul de $0,6 \text{ m}^3$ por kg de palta versus un $1,25 \text{ m}^3$ por kg de palta que reporta según WFP^a. Ambos valores reportados por Osorio et al. (2013) son mayores a los obtenidos en esta oportunidad de $4,01 \text{ m}^3$ por kg de palta para el caso convencional y de $2,43 \text{ m}^3$ por kg de palta para el agroecológico. Dicha diferencia se puede atribuir a que al ser un análisis regional no es enfocado a un solo escenario, pudiendo presentar diferencias en el tipo de suelo y rendimientos de los diversos predios de donde se basaron para el estudio, y principalmente en el límite temporal del estudio, pues si se observan los resultados obtenidos por año, se obtiene un uso de $0,5 \text{ m}^3$ por kg de palta y $0,3 \text{ m}^3$ por kg de palta por el caso convencional y agroecológico, respectivamente lo cual es consistente con lo reportado por Osorio et al. (2013).

Con respecto a la huella verde, Osorio et al. (2013) reporta un valor de $0,1 \text{ m}^3$ por kg de palta para su estudio y de $0,6 \text{ m}^3$ por kg de palta para el reportado por WFP. Estos valores son nuevamente menores a los obtenidos en esta oportunidad, correspondientes a $2,08 \text{ m}^3$ por kg de palta y $2,43 \text{ m}^3$ por kg de palta para el caso convencional y agroecológico, respectivamente. Si se obtiene el impacto por año, se obtiene $0,26 \text{ m}^3$ por kg de palta para el caso convencional y $0,3 \text{ m}^3$ por kg de palta para el caso agroecológico. Estos resultados corroboran que la principal diferencia entre los estudios es el límite temporal al cual fueron realizados, lo que llama a tener cautela al momento de revisar resultados de estudios de huella hídrica.

Finalmente, Osorio et al. (2013) se reporta un valor de huella gris de $0,15 \text{ m}^3$ por kg de palta y por la WFP de $0,5 \text{ m}^3$ por kg de palta, ambos valores por debajo de los obtenidos en este estudio de $34,00 \text{ m}^3$ por kg de palta para el caso convencional y $11,03 \text{ m}^3$ por kg de palta para el caso agroecológico. Revisando los valores por año, se obtiene $4,25 \text{ m}^3$ por kg de palta y $1,37 \text{ m}^3$ por kg de palta para el caso convencional y agroecológico, respectivamente. En esta oportunidad, los valores por año son significativamente mayores a los reportados por Osorio et al. (2013), esto se puede deber a la cantidad de fertilizantes utilizados y a los factores de lixiviación utilizados que en el estudio de Osorio et al. (2013) no son reportados. Por otro lado, al ser un estudio regional existen diferentes escenarios de cultivos, con diferentes manejos y rendimientos que no se aprecian en los resultados, por lo que estos se han de tomar solo de manera referencial.

^a WFP del ingles *Water Footprint*

Diversos estudios han reportado la diferencia de la huella hídrica entre cultivos convencionales y de índole agroecológico. En los estudios de Yandun (2018), Gavilanes (2018) y Alvarez (2019) se reporta entre un 20 y 90 % más de uso de agua en los manejos convencionales que en los agroecológicos. Dicho resultado es consistente al obtenido en este estudio, donde el caso convencional presenta un 37,80 % más de uso de agua que el caso agroecológico.

Finalmente, la diferencia del uso de agua entre el caso convencional y agroecológico se debe al sistema de riego, donde el sistema por goteo es más eficiente y requiere menos energía que el por microaspersión [13]; el uso de cubierta vegetal, como indica Khanal et al. (2009), permite retener la humedad lo que se traduce en menor agua de riego y menor pérdida de nutrientes al evitar la escorrentía. Estas técnicas permiten disminuir el impacto del cultivo en lo que respecta huella azul y huella gris, que es particularmente compleja cuando se tiene en consideración que cerca de 2/3 de las cuencas en el planeta están contaminadas principalmente con nitrógeno y fósforo, donde la agricultura es la tercera fuente de contaminantes [135] producto del uso excesivo de fertilizantes sintéticos.

Asimismo, la contaminación por el uso de pesticidas y herbicidas es particularmente complejo, pues no hay estándares de descarga suficientemente estrictos para controlar la emisión de estos compuestos en fuentes de agua [135], lo que provoca toxicidad en la población y ecosistemas aledaños. Esta falta de rigurosidad y especificidad en los controles de fuentes de agua se refleja a nivel nacional al no disponer de concentraciones máximas para el glifosato, teniendo que recurrir a la reportada para otro herbicida suponiendo que es representativo del utilizado en el estudio.

En síntesis, para evitar o al menos disminuir la contaminación de las fuentes de agua, es importante mantener una buena salud del suelo, pues esto permite disminuir el agua de regadío, disminuir la escorrentía, aumenta la materia orgánica que permite reciclar los nutrientes dentro del cultivo, y disminuye los riesgos de lixiviación; una forma de mantener la buena salud del suelo es el cambio en el manejo del cultivo, específicamente, el cambio en los fertilizantes y en el sistema de riego.

Capítulo 7

Evaluación de la eutrofización acuática

El siguiente capítulo detalla los factores de emisión y los resultados correspondientes al ACV bajo la categoría de impacto ambiental de eutrofización acuática para el caso convencional y agroecológico contrastándolos entre sí.

Se destaca que para esta categoría se ajustaron los límites del sistema a solo evaluar lo que sucede en el campo, es decir, no se consideran las emisiones al suelo, aire o agua que ocurren fuera de este. Esto responde a que la eutrofización tiene un impacto local, a diferencia de las otras categorías estudiadas [85]. Del mismo modo, solo se considera el aporte de los nutrientes al suelo dentro del predio, debido a que los aportes al aire (emisiones por uso del tractor, por ejemplo) tardan más en llegar a la fuente de agua y no se puede asegurar a que el impacto de este sea dentro del área de estudio [85].

7.1. Factores de emisión

Para la eutrofización acuática, que tiene un carácter territorial local, se contemplan los flujos presentes en la Figura 7.1, donde se incluyen las emisiones por el uso de fertilizantes donde los factores de emisión se presentan en la Sección 7.1.1.

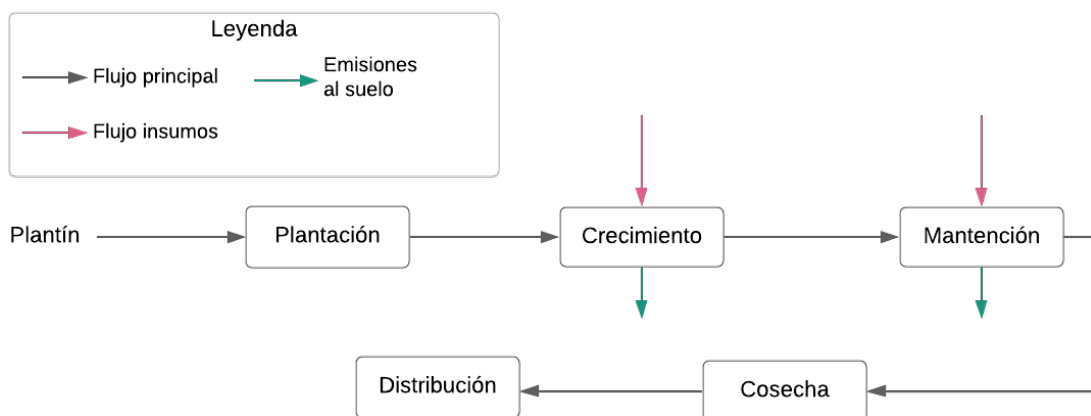


Figura 7.1: Diagrama emisiones gaseosas para el cálculo del Eutrofización acuática. Fuente: Elaboración propia.

7.1.1. Fertilizantes

Los factores para la eutrofización de los fertilizantes se presentan en la Tabla 7.1. En particular, los factores de emisión del nitrógeno y el compuesto P_2O_5 vienen dadas por valores por defecto. Mientras que para las emisiones producto del nitrógeno presente en el compost viene caracterizada para este fertilizante orgánico.

Tabla 7.1: Factores de emisión por fertilizante.

Ítem	Factor de emisión		Referencia
	Valor	Unidad	
Nitrógeno	0,42	kg PO_4^{3-} eq/kg N	[85]
P_2O_5	1,34	kg PO_4^{3-} eq/kg P_2O_5	[86]
Compost	0,13	kg NH_3 /kg N	[85]
	1,34	kg PO_4^{3-} eq/kg P_2O_5	[86]
Fertilizante N orgánico	0,42	kg PO_4^{3-} eq/kg N	[85]
Fertilizante P orgánico	1,34	kg PO_4^{3-} eq/kg P_2O_5	[86]

7.2. Cuantificación del impacto

Para la eutrofización acuática solo se consideran las emisiones al suelo correspondientes a los nutrientes nitrógeno y fósforo, por lo que solo hay emisiones en las etapas de crecimiento y mantenimiento que es donde se aplican los fertilizantes.

El cálculo se basa en la expresión 3.7 presentada en el Capítulo 3 considerando los datos del caso que se exponen en el Capítulo 4 junto con los factores de la Tabla 7.1. El detalle de los cálculos se presentan en el Anexo E.

Los resultados totales del impacto ambiental bajo esta categoría se presentan en la Tabla 7.2, donde se observa que el impacto total del caso convencional es un 83 % mayor al caso agroecológico.

Tabla 7.2: Impacto ambiental total bajo la categoría de impacto de eutrofización acuática.

Caso	Valor [kg PO_4^{3-} eq/kg palta]
Convencional	$2,48 \cdot 10^{-2}$
Agroecológico	$4,10 \cdot 10^{-3}$

Un desglose por etapas de las emisiones de cada caso se presenta en la Figura 7.2, donde se observa que el impacto del caso convencional es mayor que el caso agroecológico en las dos etapas donde hay emisiones (crecimiento y mantenimiento).

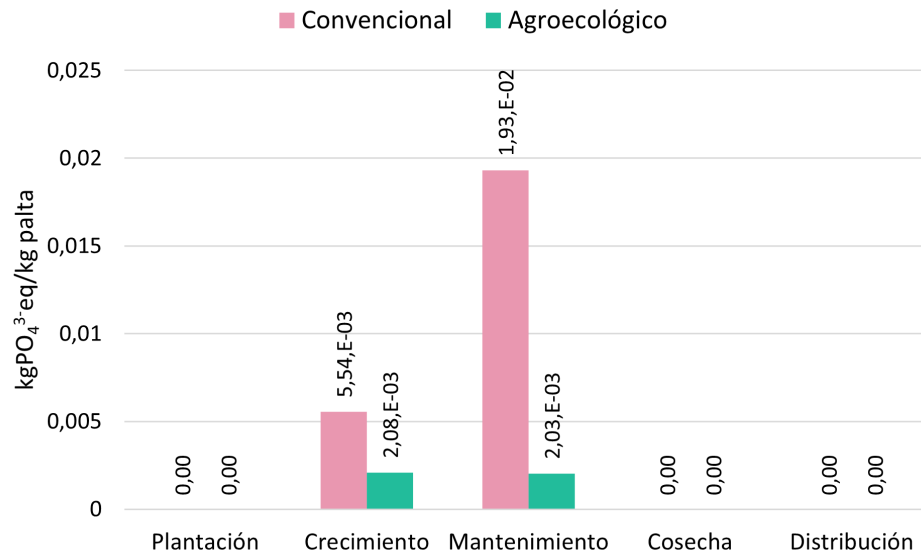


Figura 7.2: Comparación de la eutrofización acuática por etapas del caso convencional y el caso agroecológico.

Se observa que no hay una diferencia significativa entre las emisiones del caso agroecológico en las etapas de crecimiento y mantenimiento. Esto se debe al aporte del compost en el primer año donde el aporte de nutrientes es el doble en comparación a los años posteriores [70], lo que hace que las emisiones en la etapa de crecimiento sean ligeramente mayores a la de mantenimiento, siendo que un árbol adulto requiere más nutrientes que uno joven.

Analizando ahora la diferencia entre el caso convencional y agroecológico, en la etapa de crecimiento el caso convencional presenta una emisión total de $5,54 \cdot 10^{-3}$ kg PO₄³⁻ por kg palta que es más del doble que el caso agroecológico, que es de $2,08 \cdot 10^{-3}$ kg PO₄³⁻ por kg palta; mientras que en la etapa de mantenimiento, el impacto del caso convencional es de $1,93 \cdot 10^{-2}$ kg PO₄³⁻ por kg palta mientras que el del caso agroecológico es de $2,03 \cdot 10^{-3}$ kg PO₄³⁻ por kg palta, lo que es una diferencia de cerca 4 veces.

Esto se debe principalmente a la alta concentración de los nutrientes aportados por los fertilizantes sintéticos en comparación con los fertilizantes orgánicos, en donde los nutrientes de los fertilizantes orgánicos no están disponibles inmediatamente para el árbol (como sí lo están los fertilizantes sintéticos), requiriéndose un proceso de descomposición de los fertilizantes por parte de microorganismos para que los nutrientes estén disponibles [136]. Al ser los fertilizantes sintéticos más concentrados y específicos que los orgánicos [131], cuando son usados en demasía corren el riesgo de ser lixiviados, es decir, que se infiltren en el suelo antes de ser absorbidos por las plantas, lo que lleva a contaminar fuentes de agua provocando eutrofización [136], tal como se observa en las resultados obtenidos. Esto contrasta con el uso de fertilizantes orgánicos, donde los nutrientes son liberados paulatinamente por acción de los microorganismos, disminuye el riesgo de sobrealimentación [137], lo que hace que los nutrientes sean aprovechados en mayor cantidad que con los fertilizantes sintéticos, quedando menos disponibles para lixiviar.

Diversos autores, como Abella et al. (2012) y Cusi et al. (2021), indican que el nutriente

que genera mayores niveles de eutrofización es el fósforo (como fosfato principalmente) seguido del nitrógeno (como nitrato [13]). Sin embargo, las cantidades de fósforo que llegan a las fuentes de agua es menor que las de nitrógeno, puesto que el fósforo se fija al suelo lo que disminuye su capacidad de lixiviar, tal como lo señala Quintana (2006).

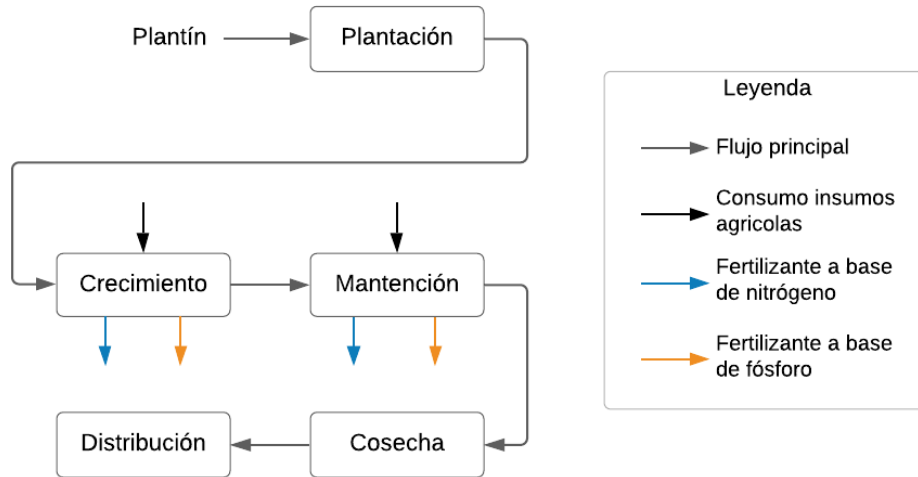


Figura 7.3: Diagrama de bloques de las emisiones emitidas por etapas para la categoría de eutrofización acuática.

El impacto se puede diferenciar entre el provocado por los fertilizantes en base a nitrógeno y los en base a fósforo, como se observa en la Figura 7.3.

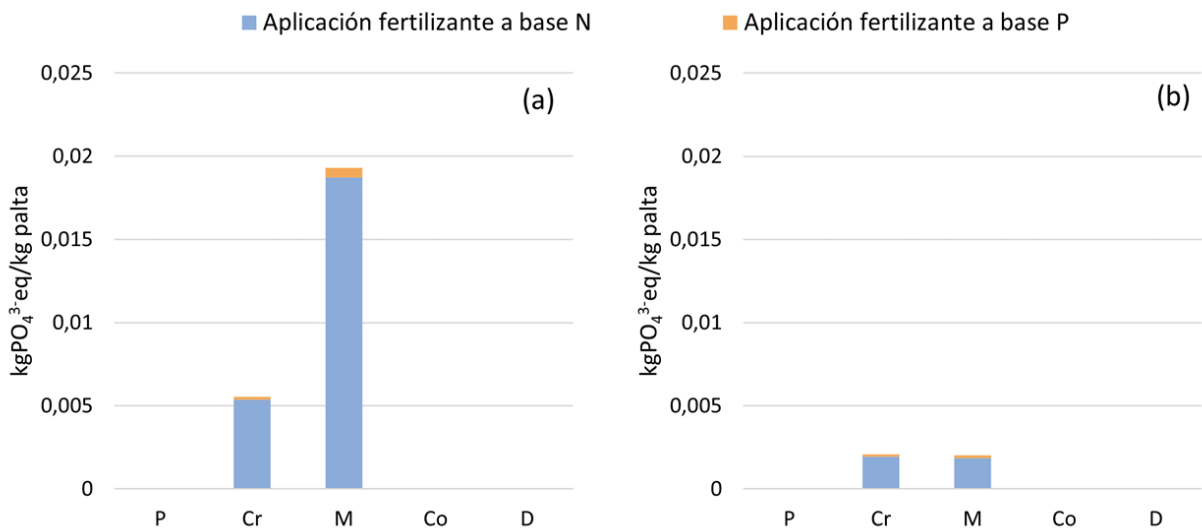


Figura 7.4: Resultados de la eutrofización acuática por aplicación de nutrientes para el caso (a) convencional y (b) agroecológico, para cada etapa donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

El comportamiento antes descrito queda en evidencia en los resultados presentados en

la Figura 7.4, donde es posible observar que en ambos casos es el aporte de nitrógeno el que lidera las emisiones de PO_4^{3-} con una clara diferencia entre las etapas de crecimiento y mantenimiento en el caso convencional; y una evidente distancia del impacto entre el caso convencional y el agroecológico.

Las emisiones de nitrógeno en el caso convencional son mayores al agroecológico, esto se debe a dos factores principales: 1) en el sistema convencional se le añaden más nutrientes de los necesarios para el crecimiento del árbol y 2) estos nutrientes no son aprovechados, por lo que lixivian. En el caso agroecológico al cambiar las condiciones del suelo (aumenta la materia orgánica) los nutrientes son liberados más lentamente, por lo que son mejor aprovechados y, por lo tanto, lixivian menos.

El uso excesivo de fertilizantes sintéticos responde a una tendencia que viene desde los años 60's, donde se entendía que entre más fertilizantes se agregaba al cultivo mayores eran los rendimientos [140]. Sin embargo, se ha comprobado que la relación no es lineal, pues los cultivos comienzan a requerir más nutrientes para rendir lo mismo, como en el caso de Chile en donde se registró un aumento del 62 % en el aporte de fertilizantes en el cultivo de trigo en cinco años que llevo solo a un aumento del 3,1 % en el rendimiento [141].

Este tipo de prácticas conlleva a graves problemas medio ambientales, a la salud de las personas, y económicos. La eutrofización acuática daña fuentes de agua dulce, afectando la biodiversidad del lugar pues aumenta la cantidad de algas presentes lo que disminuye los niveles de oxígeno del agua provocando la muerte de diversas especies. Por otro lado, la contaminación de las fuentes de agua por nitratos componen un importante origen de toxicidad para la salud humana [141]. Y la pérdida de nutrientes se refleja en costos monetarios para el agricultor, al ver que su inversión no está siendo aprovechada [140].

Existen medidas que han sido implementadas en diversas partes del mundo para evitar la eutrofización producida por el área agrícola, que es una de las principales responsables de este fenómeno [138]. Algunas de ellas tienen relación con el manejo en el campo, donde se fomenta la aplicación racional de nitrógeno, el uso de cubiertas vegetales, sistemas de riego eficientes para evitar la escorrentía, y el cambio de fuente de nutrientes por unas de origen orgánico [140]. Este último punto adquiere principal importancia cuando se observan los resultados que se han tenido en diferentes campos alrededor del mundo, según el trabajo realizado por Martínez et al. (2006) los bioproductos logran suplir los nutrientes requeridos con un mínimo uso de recursos no renovables, mejorando la calidad de los recursos internos al ser capaces de aportar nitrógeno fijado desde la atmósfera y transformando el fósforo fijado en el suelo, dejándolo nuevamente disponible.

Martínez et al. (2006) deja clara la importancia del suelo en la agricultura, destacando que este realiza funciones esenciales para la integridad y productividad del campo, por lo que un buen uso de este conlleva al reciclaje de nutrientes, la modificación de la estructura del suelo y al control biológico de plagas y enfermedades (por la "buena salud" del cultivo, lo que lo hace menos susceptible a estas adversidades). Además, destaca que estos procesos de cambio son a largo plazo, lo que adquiere principal importancia cuando se contrasta con los cultivos intensivos a corto plazo lo que conlleva a la erosión de los suelos [140].

Otras medidas tienen relación con medidas gubernamentales tales como tener seguimiento de las prácticas agrícolas llevadas en el país; poseer datos e información del manejo y tratamiento de los predios; la comunicación con otros países para conocer la experiencia de ciertas medidas; esto con el fin de encontrar las fuentes de contaminación, buscar la forma de eliminarlas (o limitarlas) y evitar que estas vuelvan a ser un problema [142].

Además, existen diferentes alternativas para recuperar los ambientes acuáticos que sufren eutrofización. Siguiendo la investigación realizada por Cusi et al. (2021), los métodos que arrojan mejores resultados son las aplicaciones de ciertas algas y zeolitas junto con el cambio en las prácticas llevadas a cabo en el campo como es el cambio a insumos biológicos que fomentaran el desarrollo microbiano de la tierra provocando una mejor asimilación de los nutrientes.

En síntesis, tal como arrojaron los resultados y los exponen ciertos autores, una práctica ligada a lo orgánico y agroecológico permite reducir los niveles de eutrofización del cultivo, en particular, del cultivo de palta Hass en la provincia de Quillota, según los resultados obtenidos en este estudio.

Capítulo 8

Normalización

En este capítulo se presenta la normalización de los resultados obtenidos por cada categoría de impacto medio a una categoría de impacto final.

De acuerdo con las categorías de impacto medio estudiadas se determina que la categoría de impacto final que logra recoger y evidenciar el impacto es los ecosistemas de agua fresca, debido a que es donde es posible observar los efectos de las emisiones producidas por el manejo agrícola. Otras categorías de impacto final (como salud humana, ecosistemas terrestres o recursos naturales) no tienen establecido un factor de normalización para algunas de las categorías de impacto medio estudiadas, como es el caso de la eutrofización que solo es posible cuantificarla para los ecosistemas de agua fresca y marinos.

Los factores utilizados son los proporcionados por ReCiPe^a para los ecosistemas de agua fresca y se presentan en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Factores de normalización para el ecosistemas de agua fresca según ReCiPe 2016 v1.1.

Ítem	Factor		Referencia
	Valor	Unidad	
Potencial de calentamiento global	$6,82 \cdot 10^{-13}$	especies·año/kg CO ₂ eq	[143]
Uso de agua	$6,04 \cdot 10^{-13}$	especies·año/m ³ agua	[143]
Eutrofización acuática	$6,17 \cdot 10^{-7}$	especies·año/kg Peq	[143]

Se destaca que la normalización se realizó con los resultados obtenidos sin considerar los cambios en las existencias de carbono cuya diferencia en el resultado presentado corresponde a menos del 1%. El detalle de los cálculos que llevan a los resultados presentados a continuación se presentan en el Anexo F. Dicho esto, en la Tabla 8.2 se presentan los resultados normalizados de los casos convencional y agroecológico.

El impacto total del caso convencional es 6 veces mayor al del caso agroecológico, con un valor de $5,10 \cdot 10^{-9}$ especies·año versus los $8,52 \cdot 10^{-10}$ especies·año por kg de palta del caso agroecológico. Esto refleja la tendencia de los resultados obtenidos en las categorías de im-

^a Desarrollado por el Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de los Países Bajos.

Tabla 8.2: Impacto ambiental total normalizada.

Caso	Valor [especies·año/kg palta]
Convencional	$5,10 \cdot 10^{-9}$
Agroecológico	$8,52 \cdot 10^{-10}$

pacto evaluadas individualmente, donde el caso convencional presenta un mayor impacto que el agroecológico.

La diferencia entre los resultados del caso convencional y agroecológico se asocia al impacto provocado por la eutrofización en las especies acuáticas afectadas al año por kg de palta, tal como se observa en la Figura 8.1, donde la eutrofización acuática domina el resultado normalizado.

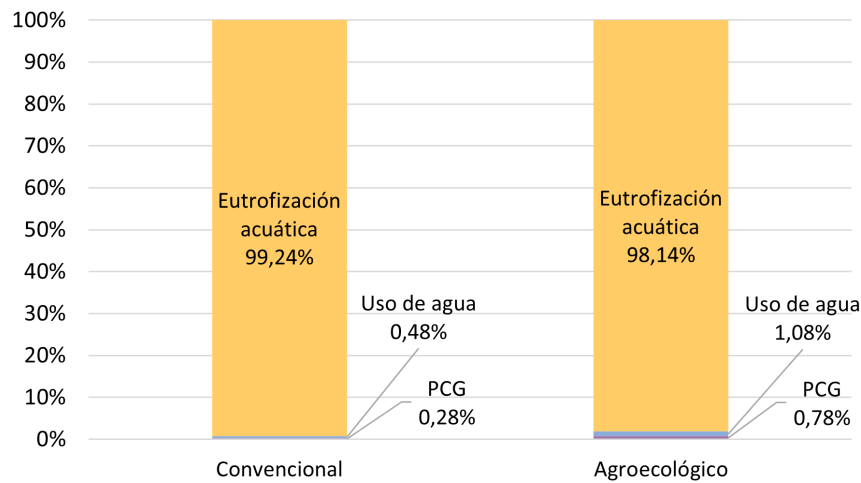


Figura 8.1: Desglose del impacto normalizado por categoría estudiada para el caso convencional y agroecológico.

El caso convencional es dos veces mayor al caso agroecológico en las categorías de Potencial de Calentamiento Global y uso de agua, mientras que para la eutrofización es 6 veces mayor, tendencia que domina en el resultado presentado en la Tabla 8.2.

El resultado por etapas refleja la misma propensión de los resultados generales, como se observa en la Figura 8.2 donde, a excepción de la cosecha, el impacto del caso convencional es cerca de 6 veces mayor al del caso agroecológico.

El resultado dispar a la tendencia de las otras etapas observado en la cosecha se puede atribuir a la diferencia de densidades (árbol/ha) de cada uno de los casos, donde el recorrido que debe realizar el caso agroecológico para retirar las paltas es mayor al del caso convencional, lo que hace que se utilice más combustible (por el uso del tractor en el acarreo de personas) lo que se refleja en un impacto mayor por parte de este caso en esta etapa por kg de palta, impacto relacionado principalmente a la categoría de potencial de calentamiento

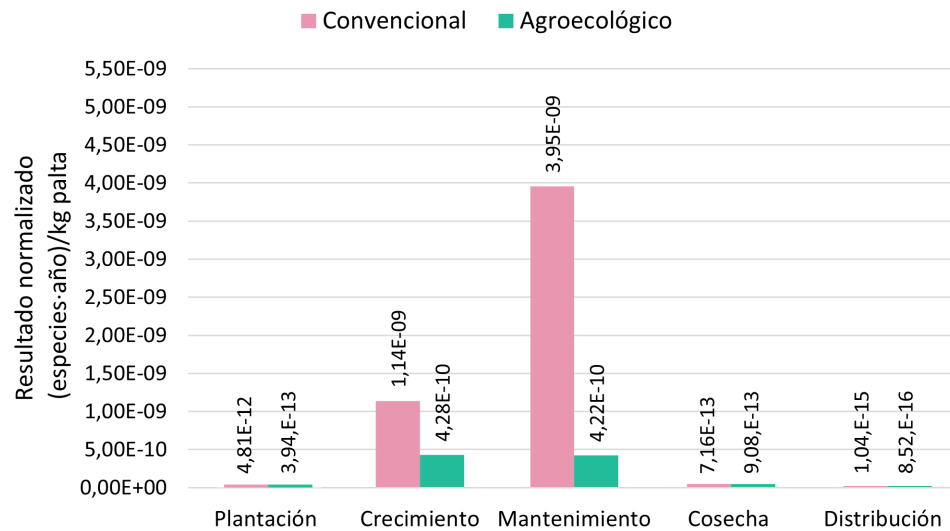


Figura 8.2: Resultados normalizados donde se comparan los casos convencional y agroecológico.

global por la liberación de GEI.

Se destaca que el impacto del caso agroecológico en la etapa de mantenimiento es menor que en la etapa de crecimiento, lo que es interesante considerando que en la etapa de mantenimiento los requisitos nutricionales del árbol son mayores que en la etapa de crecimiento, por lo que su impacto debería ser mayor. Al igual que en las categorías de impacto estudiadas, especialmente en la eutrofización acuática por el aporte de nutrientes, esta diferencia se le atribuye al uso de compost en el primer año del crecimiento del árbol, donde se ha de añadir el doble de lo requerido en los años posteriores producto de estar siendo aplicado a un terreno que no ha recibido tratamiento con anterioridad [70]

Esto último refleja el impacto que tiene la aplicación de insumos agrícolas dentro del cultivo de paltas. Tal y como se observó en las categorías antes evaluadas, es esta la actividad que predomina el impacto total (ver Figuras F.1 y F.2 en Anexo F para más detalle), lo que evidencia la relevancia de los fertilizantes dentro del predio, donde los de origen sintético afectan 6 veces más a las especies acuáticas al año por kg de palta que los de origen orgánico (de acuerdo al resultado de la eutrofización acuática).

Los resultados observados en esta oportunidad dan una luz más clara del impacto ambiental atribuido a los diferentes manejos agrícolas para el cultivo de palta Hass, donde se refleja que un cultivo agroecológico presenta una significativa diferencia, del 83 %, con el cultivo convencional en las dos etapas que más impacto tiene durante el cultivo, que son el crecimiento y el mantenimiento.

Este resultado se correlaciona con lo declarado por diversos autores donde destacan que el manejo agroecológico disminuye los niveles de nutrientes en el suelo (pues son mejores aprovechados) lo que se refleja en una disminución en las cantidades de nitrógeno y fósforo que llegan a contaminar las aguas [144]. Además, promueve y conserva una población mi-

crobiológica que permite controlar enfermedades y plagas lo que se refleja en un menor o nulo uso de pesticidas y herbicidas, pues el uso de compost y cubiertas vegetales también ayudan a controlar el crecimiento de plantas indeseadas [34]. Se destaca que en los manejos convencionales, el control de plagas, enfermedades y nutrición de los cultivos son externos, es decir, se debe de incorporar insumos para controlar las plagas y enfermedades, y suplir de nutrientes el cultivo, mientras que en un cultivo agroecológico el manejo es interno, el agricultor se preocupa de mantener un nivel de microorganismos adecuado para controlar las plagas y enfermedades, así como los nutrientes necesarios para el buen desarrollo del cultivo, al incorporar compost y *mulch* que permite reciclar nutrientes dentro del mismo predio [34].

Capítulo 9

Análisis de sensibilidad

El siguiente capítulo se divide en dos secciones. En la primera se busca sensibilizar las técnicas agrícolas para determinar las más significativas en términos de impacto ambiental. En la segunda, se sensibilizan diferentes rendimientos y densidades con tal de comparar su impacto ambiental.

9.1. Técnicas agrícolas

En la siguiente sección se busca responder cuáles de las técnicas estudiadas en el caso agroecológico son más significativas en términos de impacto ambiental. Para ello se sensibilizan 4 aspectos del análisis que dan paso a 4 medidas donde se hacen cambios sobre el caso convencional, reemplazando prácticas convencionales por agroecológicas. Las medidas son analizadas bajo las mismas categorías de impacto que el caso convencional y agroecológico, y los resultados son discutidos por categoría para luego dar paso a la normalización que dará luces más claras sobre las técnicas más significativas.

Las medidas estudiadas se nombran y describen a continuación:

- **Medida 1: Fertilizantes**

Cambio en los fertilizantes sintéticos por fertilizantes agroecológicos sobre el cultivo convencional, es decir, cambio de urea y fertilizante P sintético por compost, fertilizante N orgánico y fertilizante P orgánico. Este cambio implica un cambio en el nutriente disponible para ser lixiviado por el aporte de materia orgánica del compost [90][145].

- **Medida 2: Gestión residuos**

Cambio en la gestión de residuos sobre el cultivo convencional al reemplazar la quema por la trituración de los residuos producto de la plantación y la poda. La trituración de los residuos de la poda son incorporados al suelo lo que conlleva a una disminución en el riego (pues la cubierta vegetal retiene la humedad) [134] y en el uso de herbicida (la cubierta vegetal impide el crecimiento de maleza) [146][147].

- **Medida 3: Riego**

Cambio del sistema de riego por microaspersión a riego por goteo sobre el cultivo convencional. Lo que lleva a una disminución en el uso de agua, en la electricidad [129][130] y en la pérdida de nutrientes por escorrentía [148].

■ **Medida 4: Bosque nativo**

Cambio en la preservación del bosque nativo sobre el cultivo convencional, se retira solo la cantidad de árboles necesarios para permitir el cultivo de paltos, como matorrales con espinas (Trevo y Espino) y herbáceas. La interacción con el bosque nativo conlleva a que los nutrientes sean mejor aprovechados lixiviando menos [149].

9.1.1. Evaluación del Potencial de Calentamiento Global

Los resultados obtenidos para el Potencial de Calentamiento Global se presentan en la Tabla 9.1. La medida 3 es la que presenta un mayor impacto con 20,61 kg CO₂eq, mientras que es la medida 2 la que tiene un menor impacto con 11,29 kg CO₂eq por kg de palta.

Tabla 9.1: Impacto ambiental total de las medidas bajo la categoría de Potencial de Calentamiento Global.

Caso	Valor [kg CO ₂ eq/kg palta]
M1: Fertilizantes	19,64
M2: Gestión residuos	11,29
M3: Riego	20,61
M4: Bosque nativo	16,29
Convencional	20,99
Agroecológico	9,70

La medida que presenta un menor impacto es la medida 2 con una diferencia del 85,91 % con respecto al caso convencional. La medida con un mayor impacto es la medida 3 que presenta una diferencia con el caso convencional de solo un 1,84 %.

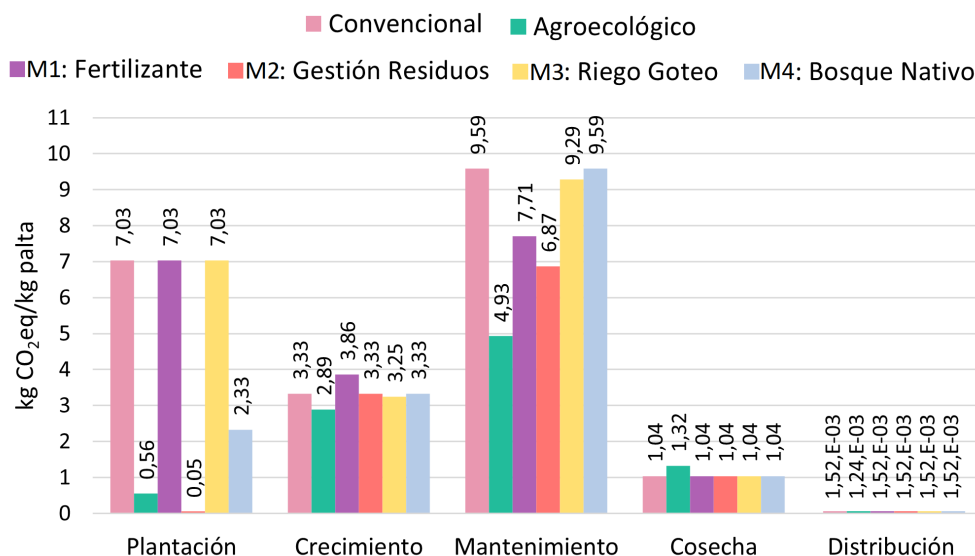


Figura 9.1: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas de las medidas analizadas. Base de comparación caso convencional.

Analizando los resultados presentados en la Figura 9.1 se observa que en la plantación los cambios se presentan en las técnicas donde se cambió la disposición de los residuos, es decir, ya no existe quema; y en el bosque nativo, pues ya no se retira todo el bosque disponible por lo que se llega a quemar una porción pequeña en comparación al caso convencional. Estas medidas son las que más se asemejan al caso agroecológico. El menor impacto de la medida con respecto al caso agroecológico se debe principalmente al mayor rendimiento de la medida 2, efecto análogo al presente en la cosecha.

En el crecimiento, se observa que la mayor emisión la tiene la medida de cambio de fertilizante. Esto debido a que, al igual que en el caso agroecológico, en el año 1 se debe agregar el doble de compost al ser una zona que no ha sido tratada. Con respecto a las otras medidas, estas presentan un resultado similar con una pequeña diferencia en la medida 3 asociada al cambio en el uso de electricidad.

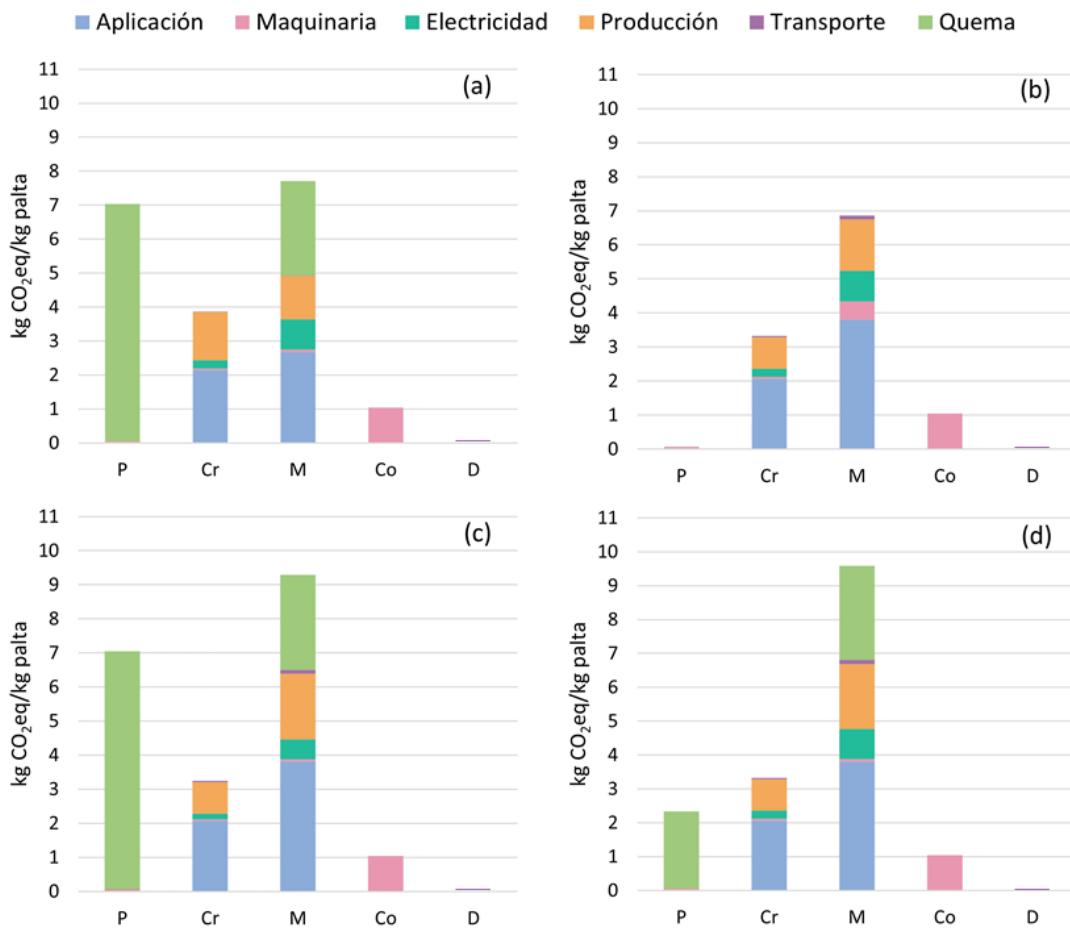


Figura 9.2: Resultado del Potencial de Calentamiento Global por actividad de las medidas analizadas. (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.

Con respecto al mantenimiento, se observa una mayor diferencia entre las medidas, en primer lugar se observa que no hay diferencia entre el caso convencional y el caso con la preservación del bosque nativo. Una pequeña diferencia se observa con el caso de cambio de

riego que viene dada por el cambio en la electricidad, al igual que en el crecimiento. Los cambios en los fertilizantes presenta una mayor emisión que el cambio en la gestión de residuos, donde ya no se queman los residuos de la poda.

De la Figura 9.2, se deslumbra que una de las técnicas que tiene mayor impacto en la categoría de Potencial de Calentamiento Global es el cambio de gestión de residuos, pues al no quemar se obtiene una disminución significativa de las emisiones en las etapas de plantación y mantenimiento cuando se compara con las otras medidas.

El cambio en el uso de fertilizantes conlleva a una disminución en la aplicación, producto de la disminución en las emisiones directas e indirectas de N_2O , pues los fertilizantes de origen sintético presentan una mayor emisión de N_2O que el compost [81]. No se observa una diferencia significativa en la producción de los insumos, lo cual puede venir relacionado a que la cantidad requerida conlleva a una baja emisión y el cambio en el transporte de internacional (fertilizante sintético) a nacional (fertilizante orgánico) no es significativa en términos de Potencial de Calentamiento Global.

Entonces, el orden de las técnicas más significativas en términos de Potencial de Calentamiento Global es el siguiente, donde en paréntesis se muestra la diferencia del impacto con el caso convencional:

Medida 3		Medida 1		Medida 4		Medida 2
Riego goteo	<	Fertilizante	<	Bosque nativo	<	Gestión residuos
(1,81 %)		(6,43 %)		(22,39 %)		(46,21 %)

Evaluación del Potencial de Calentamiento Global IPCC

Si ahora observamos los resultados obtenidos bajo las directrices del IPCC se observa que, al igual que en el caso convencional, el impacto aumenta cuando se consideran los cambios en las existencias de carbono, siendo el menor cambio el ocurrido en la medida M4, tal como se observa en la Tabla 9.2.

Tabla 9.2: Impacto ambiental total de medidas bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global bajo las directrices del IPCC.

Caso	Valor [kg CO ₂ eq/kg palta]
M1: Fertilizantes	35,81
M2: Gestión residuos	28,48
M3: Riego	36,77
M4: Bosque nativo	17,00
Convencional	37,15
Agroecológico	3,32

En la Figura 9.3, se observa que en la etapa de crecimiento todas las medidas presentan emisiones negativas; y en la etapa de mantenimiento, positivas. Las emisiones de las medidas

son mayores a las del caso agroecológico en cada etapa menos en la cosecha debido al menor rendimiento de este en comparación a las medidas.

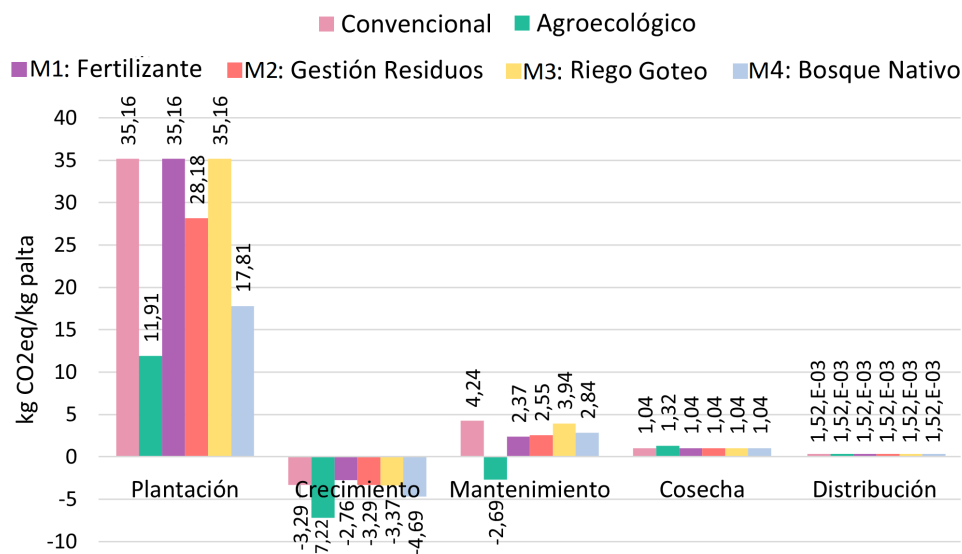


Figura 9.3: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas de las medidas analizadas siguiendo las directrices del IPCC.

En la plantación se revierten las medidas que presentan una menor emisión, ahora es el caso con la preservación de bosque nativo el cual presenta una menor emisión, seguido de la gestión de residuos. Esto se debe a que al conservar parte de la flora nativa, permanecen las existencias de carbono en la biomasa, en la materia orgánica y en el suelo, mientras que en los otros casos esta es removida, lo que conlleva a un aumento en las emisiones de CO_2eq .

En el crecimiento, la mayor captura de CO_2eq la tiene la medida de preservación de bosque nativo (M4), producto del aporte del bosque nativo que junto a los paltos, logra una captura mayor que en las demás medidas. En el caso del mantenimiento también existe captura de carbono, sin embargo, esta no es suficiente para compensar las emisiones.

Por otro lado, se esperaría que la no quema de residuos conllevaría a que las emisiones sean las más bajas dentro de las medidas estudiadas, sin embargo esto no es así, y en la etapa de mantenimiento esto se debe a que el chip producido es incorporado a la tierra, por lo que su descomposición libera existencias de carbono lo que se traduce en emisiones de CO_2 , provocando que el impacto de la medida 2 sea mayor a otras medidas.

El cambio de las existencias de carbono presenta especial impacto en la medida 4, que preserva el bosque nativo por lo que el impacto relacionado al despeje del terreno en la plantación disminuye, cuando se compara con el caso convencional. Además, al coexistir el bosque nativo con el cultivo de paltos, la captura de CO_2eq se intensifica, lo que se traduce en que esta medida presente los menores impactos en la etapa de crecimiento.

Los resultados obtenidos por actividad presentados en la Figura 9.4 muestran el cambio que produce la tala de bosque nativo en las existencias de carbono, donde la conservación de

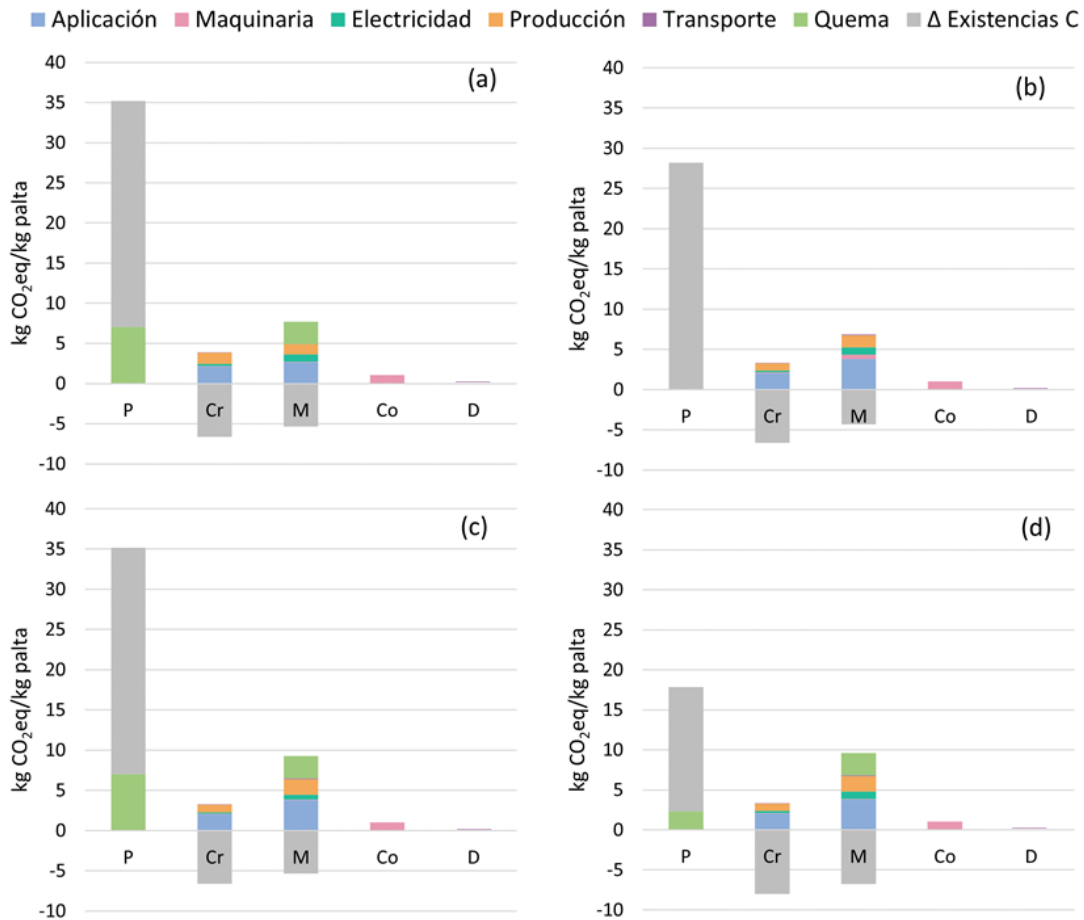


Figura 9.4: Resultados del Potencial de Calentamiento Global por actividad de las medidas analizadas siguiendo las directrices del IPCC. (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.

este disminuye las emisiones, como se observa en la figura (d) de la medida de conservación de Bosque nativo.

De las medidas evaluadas, aquel que presenta una mayor influencia en el cambio en las existencias de carbono es la medida 4. Esto refleja la importancia de la conservación del bosque nativo, que aporta en el secuestro de carbono y en mejorar las condiciones del suelo, provocando mejores condiciones para el cultivo.

Luego, siguiendo las directrices del IPCC, el orden de las técnicas más significativas en términos de Potencial de Calentamiento Global es el que se presenta a continuación, donde en paréntesis se muestra la diferencia del impacto con el caso convencional:

Medida 3	<	Medida 1	<	Medida 2	<	Medida 4
Riego goteo		Fertilizante		Gestión residuos		Bosque nativo
(1,02 %)		(3,61 %)		(23,34 %)		(54,24 %)

Se observa que se invierte el orden entre la medida 2 y 4 con respecto al orden obtenido sin

considerar el cambio en las existencias de carbono. Esto se debe principalmente al impacto del bosque nativo en la captura de carbono, disminuyendo el impacto total generado por el manejo convencional.

9.1.2. Evaluación del uso de agua

El uso de agua de cada medida evaluada se presenta en la Tabla 9.3. El menor uso lo presenta la medida 1 con un total de 17,39 m³, y el mayor uso, la medida 2 con 39,53 m³ por kg de palta.

Tabla 9.3: Impacto ambiental total de medidas bajo la categoría de impacto de uso de agua.

Caso	Valor [m ³ agua/kg palta]
M1: Fertilizantes	17,39
M2: Gestión residuos	39,53
M3: Riego	38,26
M4: Bosque nativo	26,86
Convencional	40,34
Agroecológico	15,25

La mayor diferencia con el caso convencional se presenta en el M1 (56,89%), mientras que la menor es obtenida por el M2 (2,01%). Esto tiene relación principalmente con que el cambio en el uso de fertilizantes implica cambios en la huella gris e indirecta, lo que se refleja en los resultados observados. Por otra parte, el cambio en la gestión de residuos no presenta mayores cambios en el uso de agua, en comparación al caso convencional, por lo que su impacto es similar.

Los resultados generales por etapa se presentan en la Figura 9.5. De ahí se observa que en las etapas de plantación, cosecha y distribución no hay diferencias entre las medidas estudiadas.

Las principales diferencias se encuentran en las etapas de crecimiento y mantenimiento, donde la medida M1 es el que presenta un menor impacto en ambas etapas, siendo en el mantenimiento donde la diferencia con las demás medidas se intensifican acercándose al impacto del caso agroecológico.

Dicha diferencia corresponde principalmente a agua gris, como se observa en la Figura 9.6. El agua gris es producto de la lixiviación de los nutrientes que contamina las aguas, por lo que el cambio en los fertilizantes mejora la calidad del suelo y al ser fertilizantes de origen orgánico, los nutrientes son liberados paulatinamente, siendo mejor aprovechados por los árboles y disminuyendo la cantidad que lixivian.

La medida 4 es el que presenta el segundo menor impacto en uso de agua en ambas etapas. Esto se debe principalmente a que el bosque nativo permite disminuir el uso de agua al

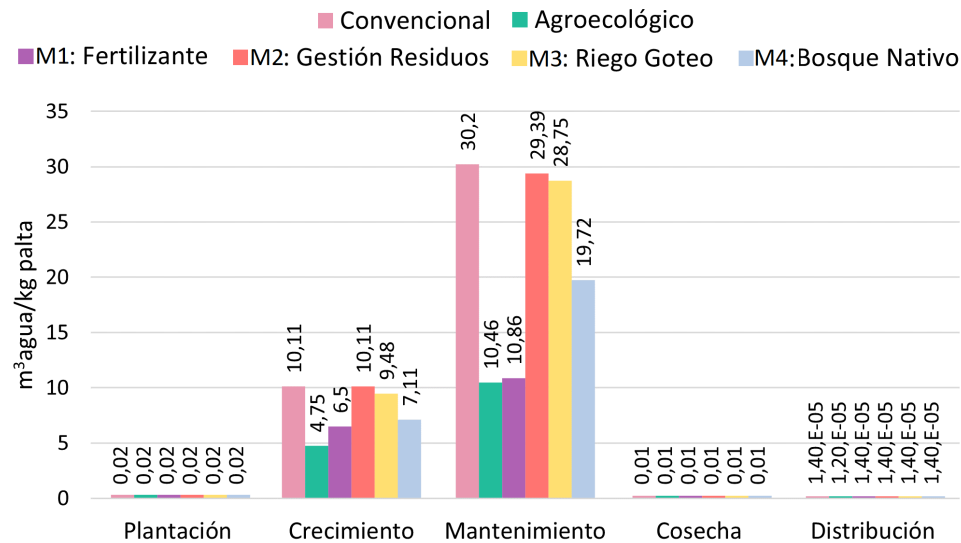


Figura 9.5: Comparación del uso de agua por etapas de las medidas analizadas.

mejorar el suelo que permite retener la humedad y disminuye la lixiviación de los nutrientes, que se traduce en una disminución de la huella gris, en relación al caso convencional.

La tercera medida con menor impacto, ya con una menor diferencia en comparación al caso convencional, es el cambio de riego a uno por goteo. Resulta interesante que la medida que tiene un impacto directo en el uso de agua, es uno de los que menos impacta cuando se estudia el uso de agua. Esto se debe principalmente a que el principal impacto es el agua gris (ver Figura 9.6) y esta medida presenta una diferencia en la huella azul (ver figura (c) de la Figura 9.6), donde se gasta cerca de la mitad de agua para el riego que las demás medidas.

Por último, se tiene la medida 2 que presenta la menor diferencia con el caso convencional. Esto se debe principalmente a que el uso de la madera triturada utilizada como *mulch* ayuda a conservar la humedad, lo que se refleja en una disminución en la huella azul al necesitar menos agua de riego el cultivo. Por otra parte, el *mulch* impide el crecimiento de maleza, por lo que disminuye la cantidad de herbicidas requeridos lo que se traduce en una reducción de la huella gris, al disminuir la cantidad de contaminantes que llegan al agua. Si bien hay una reducción de las huellas hídricas, esta no es sustancial al compararse con las demás medidas.

Revisando los impactos por actividad presentados en la Figura 9.7, se observa que en todas las medidas el mayor impacto está dado por la aplicación del agua. Está incluye el agua requerida para el crecimiento del cultivo (huella verde y azul) y el agua producto de los contaminantes que afectan fuentes de agua (huella gris). La diferencia entre las medidas encuentra las mismas razones que en el análisis por tipo de huella.

Revisando el desglose de los impactos por actividades que son menores a 1 m^3 por kg de palta, se tiene que la producción de insumos protagoniza el impacto en las medidas 2, 3 y 4 presentando una notable diferencia con la medida 1. Esto refleja la diferencia que existe cuando se hace el cambio en los fertilizantes. El uso de agua para la elaboración de los

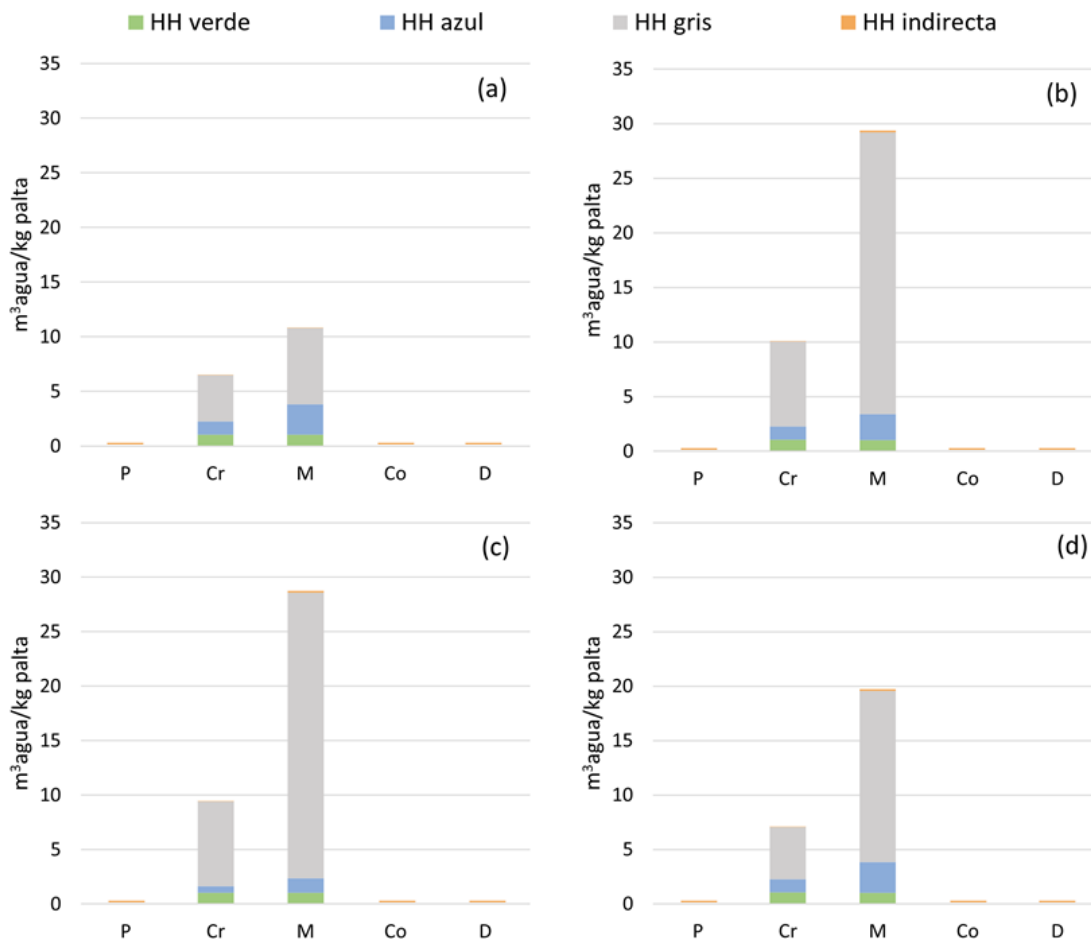


Figura 9.6: Resultados del uso de agua por etapas de las medidas analizadas, por tipo de huella. (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.

fertilizantes sintéticos es significativamente mayor al necesario para elaborar los fertilizantes orgánicos (cerca del 70%).

Luego, se destaca el uso de electricidad que predomina en la medida 1. El menor uso de electricidad se aprecia en la medida 3, donde el cambio en el sistema de riego conlleva a una disminución en el requerimiento eléctrico [129][130].

El uso de maquinaria se intensifica en la medida 2, al usar en mayor medida el tractor para realizar la acción de triturar los desechos producidos por la poda lo que se traduce en un mayor uso de combustible.

Finalmente, el transporte es el que produce un menor impacto en cada medida.

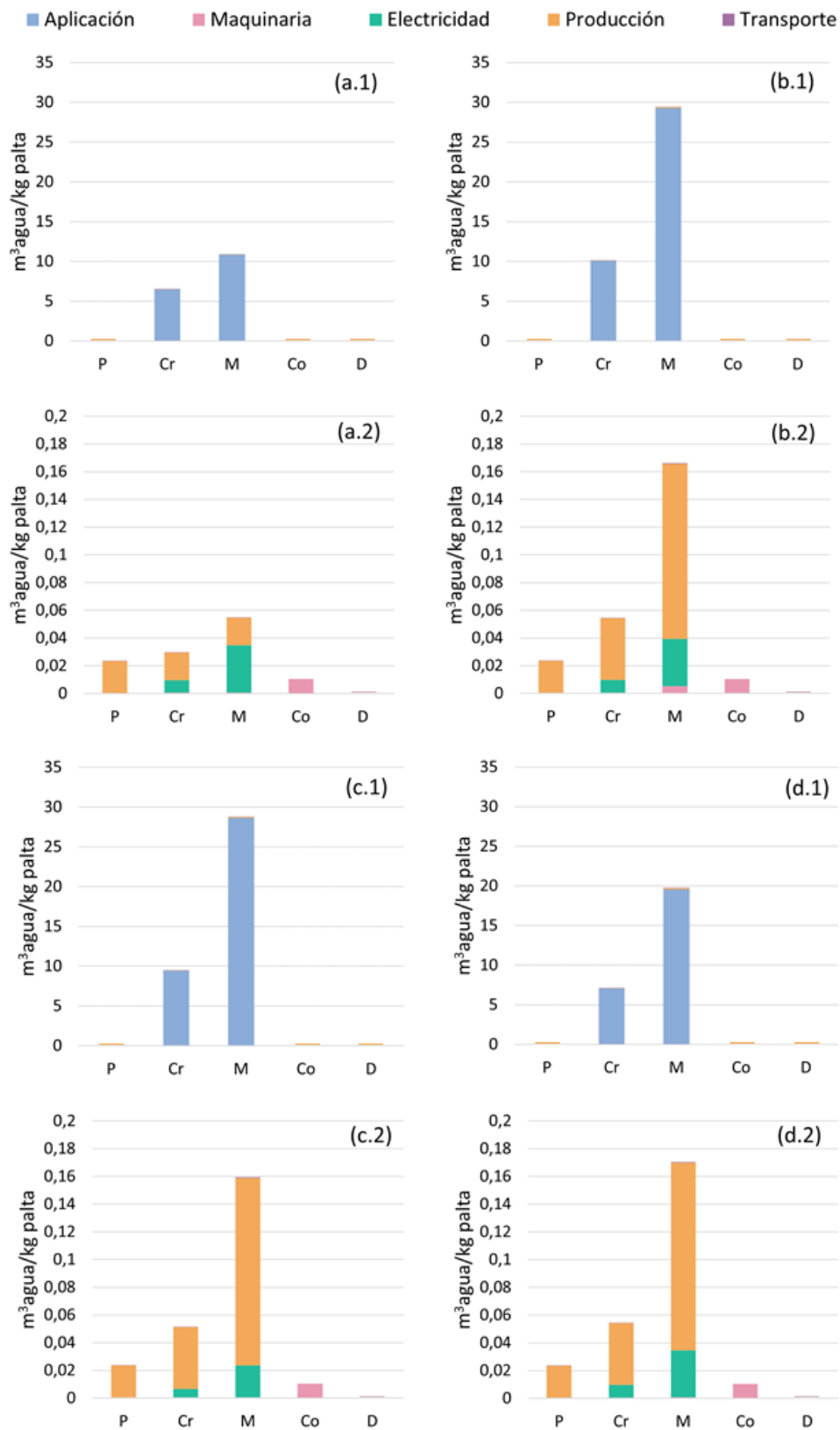


Figura 9.7: Resultados del uso de agua por actividad por etapas de las medidas analizadas, total (.1) y específico para emisiones menores a 1 m³ (.2). (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.

Con los resultados obtenidos en esta categoría de impacto, el orden de las técnicas más significativas en términos de uso de agua es el siguiente, donde en paréntesis se muestra la diferencia del impacto con el caso convencional:

Medida 2		Medida 3		Medida 4		Medida 1
Gestión residuos	<	Riego goteo	<	Bosque nativo	<	Fertilizante
(2,01 %)		(5,16 %)		(33,42 %)		(56,89 %)

Se destaca que es la medida 1 el que presenta una mayor diferencia con respecto al caso convencional y mayor similitud con el caso agroecológico, a diferencia del que afecta directamente el uso de agua en el predio que es la medida 3. Esto se debe principalmente a que el mayor uso de agua es huella gris, por lo que el cambio de fertilizantes impacta directamente en la disminución de la contaminación de las aguas, mientras que el cambio de riego afecta al agua azul, que no predomina en el uso de agua total siendo cercano a la mitad que el de las otras medidas.

9.1.3. Evaluación de la eutrofización acuática

El resultado total de la eutrofización acuática por medida estudiada se presenta en la Tabla 9.4. El mayor impacto lo presenta la medida 3 con un valor de $2,24 \cdot 10^{-2}$ kg PO_4^{3-} eq, mientras que el menor impacto lo tiene la medida 1, con un valor de $5,20 \cdot 10^{-3}$ kg PO_4^{3-} eq por kg de palta.

Tabla 9.4: Impacto ambiental total de medidas bajo la categoría de impacto de eutrofización acuática.

Caso	Valor [kg PO_4^{3-} eq/kg palta]
M1: Fertilizantes	$5,20 \cdot 10^{-3}$
M2: Gestión residuos	$1,79 \cdot 10^{-2}$
M3: Riego	$2,24 \cdot 10^{-2}$
M4: Bosque nativo	$1,28 \cdot 10^{-2}$
Convencional	$2,48 \cdot 10^{-2}$
Agroecológico	$4,10 \cdot 10^{-3}$

La medida que presenta menor cercanía con el caso convencional es la medida 3, presentando una diferencia del 9,68 %. Mientras que es la medida 1 el que presenta una mayor diferencia, con un 79,03 %.

Revisando los resultados por etapa, en la Figura 9.8 se observa que las diferencias entre las medidas se acrecienta en la etapa de mantenimiento. De la Figura 9.9 se observa que el mayor nutriente que más se pierde en todas las medidas, es el nitrógeno.

El impacto de la medida 1 es la menor de las medidas en ambas etapas, siendo la diferencia mayor en la etapa de mantenimiento. Esto debido a que, como ya se ha mencionado, los fertilizantes de origen orgánico y compost liberan los nutrientes paulatinamente, lo que

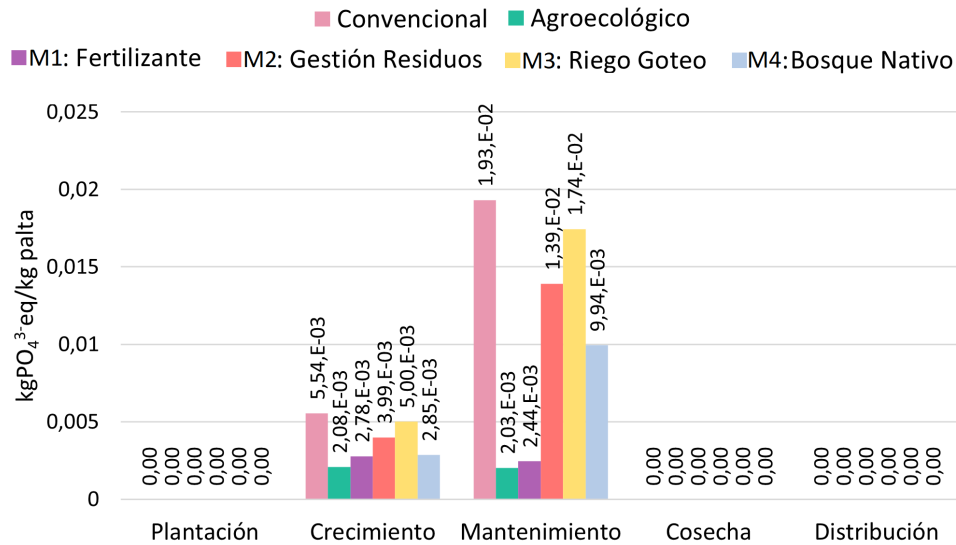


Figura 9.8: Comparación de la eutrofización acuática por etapas de las medidas analizadas.

se refleja en un menor impacto al mejorar las condiciones del suelo y disminuir la lixiviación de nutrientes, especialmente del fósforo por su capacidad de retención en el suelo, tal como se observa en la Figura 9.9.

Con respecto a las otras medidas, se observa una disminución de la lixiviación en la medida 4 con respecto al caso convencional. Esto se debe a que el bosque nativo mejora la calidad del suelo, disminuyendo la lixiviación de los nutrientes, provocando un menor impacto.

En el caso de la medida 2, la cubierta vegetal generada disminuye la escorrentía de nutrientes por lo que la pérdida de estos es menor que en el caso convencional.

Por último, el cambio del sistema de riego por uno por goteo (M3), aumenta la eficiencia del riego evitando la pérdida de nutrientes por escorrentía, lo que se traduce en una ligera diferencia con respecto al caso convencional siendo la medida con un mayor impacto.

Entonces, con los resultados obtenidos, el orden de las técnicas más significativas en términos de eutrofización acuática es el que se muestra a continuación, donde en paréntesis se muestra la diferencia del impacto con el caso convencional:

Medida 3		Medida 2		Medida 4		Medida 1
Riego goteo	<	Gestión residuos	<	Bosque nativo	<	Fertilizante
(9,68 %)		(27,82 %)		(48,39 %)		(79,03 %)

Se observa una elevada diferencia entre el caso convencional y la medida 1 (el que se acerca más al impacto del caso agroecológico), como es de esperarse al cambiar una de las fuentes más grandes de lixiviación que es la fuente de nutrientes en el sector agrícola [141].

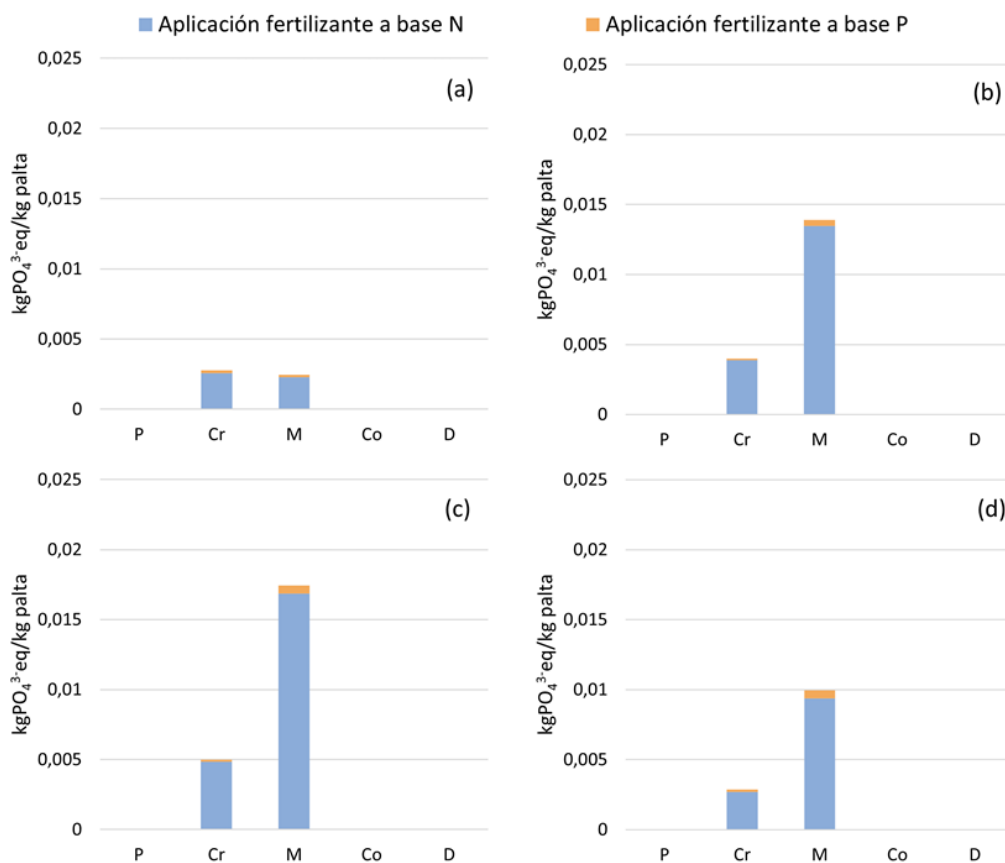


Figura 9.9: Resultados de la eutrofización acuática por etapas de las medidas analizadas por aplicación. (a) M1: Fertilizantes, (b) M2: Gestión residuos, (c) M3: Riego, (d) M4: Bosque nativo.

9.1.4. Normalización

Con el fin de obtener un resultado unificado que permita ranquear las técnicas estudiadas, se normalizan los resultados presentados en este capítulo según las especies dañadas de un ecosistema acuático, los resultados son presentados en la Tabla 9.5. El desarrollo es análogo al mostrado en el Anexo F.

Tabla 9.5: Impacto ambiental total de medidas normalizada.

Caso	Valor [especies·año/kg palta]
M1: Fertilizantes	$1,09 \cdot 10^{-9}$
M2: Gestión residuos	$3,67 \cdot 10^{-9}$
M3: Riego	$5,10 \cdot 10^{-9}$
M4: Bosque nativo	$2,63 \cdot 10^{-9}$
Convencional	$5,10 \cdot 10^{-9}$
Agroecológico	$8,52 \cdot 10^{-10}$

El resultado general muestra que el menor impacto es de la medida 1, luego la medida 4, seguido de la medida 2 y finalmente la medida 3. El resultado se rectifica cuando se observan los valores obtenidos por etapas en la Figura 9.10.

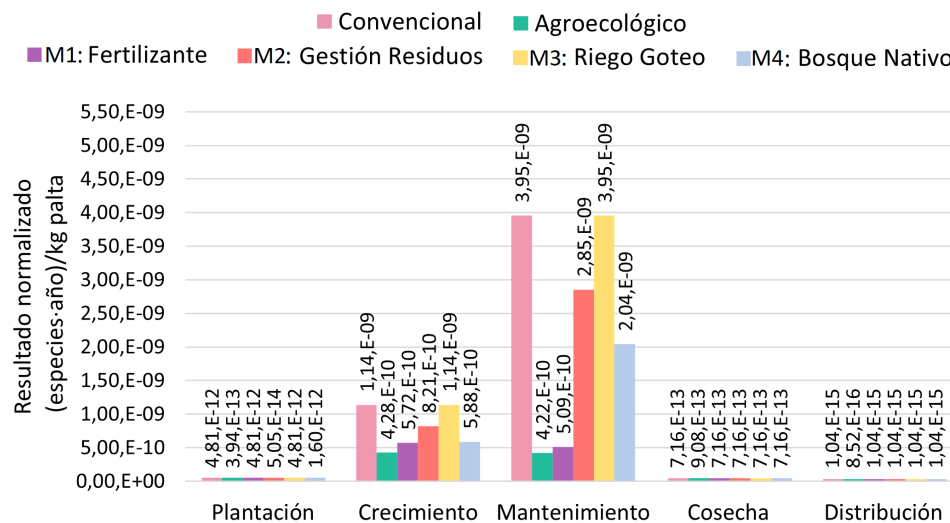


Figura 9.10: Resultados normalizados donde se comparan las medidas analizadas.

De la Figura 9.10 se obtiene que los impactos en la etapa de plantación son bastante similares entre las medidas. Mientras que en las etapas de cosecha y distribución son iguales, no hay diferencias en estos puntos bajo las medidas estudiadas.

Estos resultados muestran un impacto similar de la medida 3 con el caso convencional en cada etapa. Mientras que la medida 1 presenta grandes diferencias en la etapa de crecimiento y, sobre todo, en la de mantenimiento.

Por último, se concluye que el orden de las técnicas en relación al impacto ambiental provocado a las especies acuáticas es (en paréntesis se presenta la diferencia con respecto al caso convencional):

Medida 3		Medida 2		Medida 4		Medida 1
Riego goteo	<	Gestión residuos	<	Bosque nativo	<	Fertilizante
(0,03 %)		(27,92 %)		(48,36 %)		(78,67 %)

Este resultado muestra que el cambio en el sistema de riego tiene un menor impacto en el manejo convencional (bajo las categorías estudiadas) pues el agua ahorrada es baja en comparación a la huella gris, sin embargo, viendo solo ese aspecto, el cambio es una buena alternativa para el ahorro de agua. Además, este cambio también ayuda en prevenir la escorrentía y, por consiguiente, la pérdida de nutrientes. Por último se destaca que este cambio es el único que proporciona un ahorro en el uso de la matriz energética.

La gestión de residuos se transforma en una alternativa para evitar la quema aunque no sea la que genera un mayor impacto en el manejo agrícola tradicional. Utilizar los restos de poda para formar cubiertas vegetales retiene la humedad y evita la escorrentía que permite ahorrar agua de riego y evitar la lixiviación de nutrientes. Sin embargo, la trituración de los restos utiliza combustible que tiene un impacto asociado así como el uso de *mulch*, que provoca la liberación de carbono a la atmósfera producto de la descomposición de la madera muerta.

La conservación del bosque nativo demostró ser una buena alternativa para disminuir los impactos del cultivo convencional. La presencia del bosque permite secuestrar carbono y mejorar la calidad del suelo, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento de los nutrientes. Además, al no retirar toda la flora presente en el terreno, existe una disminución en la pérdida de carbono (en comparación al caso convencional) y en la liberación de GEI por la quema de los residuos.

Finalmente, con el estudio realizado, se concluye que la técnica que provoca un mayor cambio en el impacto medio ambiental es el cambio de fertilizantes sintéticos por unos de origen agroecológico.

Esto se debe a que el aporte de materia orgánica producto del compost, mejora la salud y resiliencia del suelo haciendo que pueda enfrentar perturbaciones sin perder estructura ni elementos. Por otro lado, la cantidad de nutrientes que quedan disponibles son en menor cantidad y se liberan de a poco, lo que permite ser mejor absorbidos y estar disponibles de manera más constantes. Por último, la producción local del compost se traduce en una disminución en la producción y transporte de insumos.

Estos cambios producto del reemplazo del tipo de fertilización, provocan que los niveles de lixiviación de nutrientes disminuyan provocando un menor impacto en lo que es uso de agua (huella gris) y eutrofización acuática, junto con una mejor salud del suelo, que logra aportar a la captura de carbono.

9.2. Rendimientos y densidades de plantación

En esta sección se sensibilizan dos escenarios que representan distintos pares densidad-rendimiento con tal de evaluar como cambia el impacto ambiental bajo las categorías estudiadas. Se evalúa un escenario para el caso convencional y uno para el caso agroecológico que se describen a continuación:

■ Escenario 1: R1D1

Cambio en el rendimiento del caso convencional a 18 ton/ha contemplando un cambio a una plantación intensiva (1,25 x 1,25 m) con una densidad de 6.400 plantas/ha. Este escenario referencia a las prácticas de plantación actualmente llevadas a cabo en Chile [150]. Se reporta un ahorro de entre 15 y 20 % del recurso hídrico y del uso de fertilizante nitrogenados [150], se asume que es con respecto a lo que se necesita por árbol para una plantación no intensiva. Bajo este escenario se reduce la producción por árbol de aprox. 40 kg/árbol a casi 3 kg/árbol.

■ **Escenario 2: R2D2**

Cambio en el rendimiento del caso agroecológico a 8,87 ton/ha con cambio en la densidad a 360 plantas/ha según los resultados reportados por un estudio en California, Estados Unidos [151]. Baja la producción por árbol de aprox. 31 kg del caso agroecológico a aprox. 25 kg en este escenario.

9.2.1. Evaluación del Potencial de Calentamiento Global

Los resultados obtenidos para la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global se presentan en la Tabla 9.6. De los resultados obtenidos, se observa que es el escenario 1 el que presenta un mayor impacto con 110,62 kg CO₂eq.

Tabla 9.6: Impacto ambiental total de escenarios bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global.

Caso	Valor [kg CO ₂ eq/kg palta]
E1: R1D1	148,10
E2: R2D2	15,69
Convencional	20,99
Agroecológico	9,70

De los resultados se obtiene que una plantación intensiva presenta un impacto 600 % mayor al caso convencional. Mientras que el escenario 2 que representa un cultivo agroecológico reportado, es un 38 % mayor al caso agroecológico estudiado.

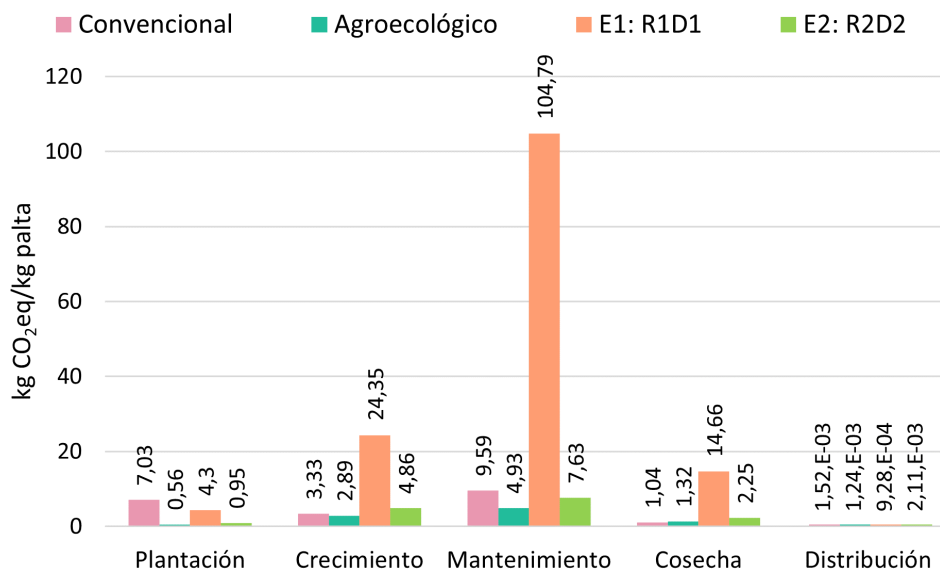


Figura 9.11: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas de los escenarios sensibilizados.

En la Figura 9.11 se presentan los resultados de cada escenario por etapa del cultivo,

lo que refuerza lo declarado anteriormente. Se observa que, principalmente en las etapas de crecimiento y mantenimiento, las diferencias se evidencian.

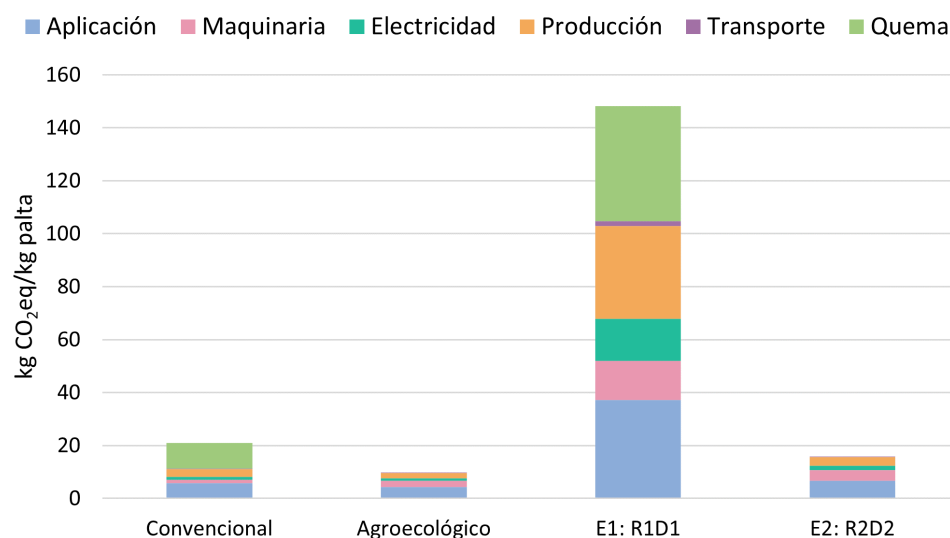


Figura 9.12: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por actividad de los escenarios sensibilizados.

La elevada emisión del escenario 1, en comparación al caso convencional, se debe principalmente al cambio en la densidad de plantación que no resulta en una mayor eficiencia por árbol, pero sí por hectárea. Una plantación extensiva tiene más cantidad de árboles por hectárea lo que aumenta el consumo de insumos y con ello, las emisiones relacionadas a la aplicación, producción y transporte, así como la quema de residuos que se intensifica, como se observa en la Figura 9.12, a pesar de reportar una reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados por árbol.

La reducción en la producción por árbol y en el uso de fertilizantes nitrogenados viene dado por una reducción en el tamaño del árbol, que permite la configuración característica de este tipo de cultivo. Se destaca que al no tener mayores antecedentes del cultivo se recurrieron a supuestos que pueden variar a lo encontrado en la práctica.

Entre el escenario 2 y el caso agroecológico no se observa mayor diferencia en la proporción de las actividades en el impacto, solo en la intensidad de este. Esto debido a que el escenario 2 presenta un menor rendimiento que junto a un uso de compost estándar en los años, termina teniendo un mayor impacto por kg de palta a pesar del menor uso de fertilizantes orgánicos producto de una menor densidad.

Evaluación del Potencial de Calentamiento Global IPCC

Observando ahora los resultados presentados en la Tabla 9.7 considerando las directrices del IPCC se observa que el escenario 2 logra tener una emisión negativa, es decir, captura CO₂ desde el ambiente. Mientras que el escenario 1, aumenta sus emisiones con respecto al resultado anterior.

Tabla 9.7: Impacto ambiental total de escenarios bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global bajo las directrices del IPCC.

Caso	Valor [kg CO ₂ eq/kg palta]
E1: R1D1	289,24
E2: R2D2	-0,97
Convencional	37,15
Agroecológico	3,32

En general, se observa que bajo un manejo convencional al considerar el cambio en las existencias de carbono, aumenta el impacto. Mientras que bajo un manejo agroecológico, disminuye.

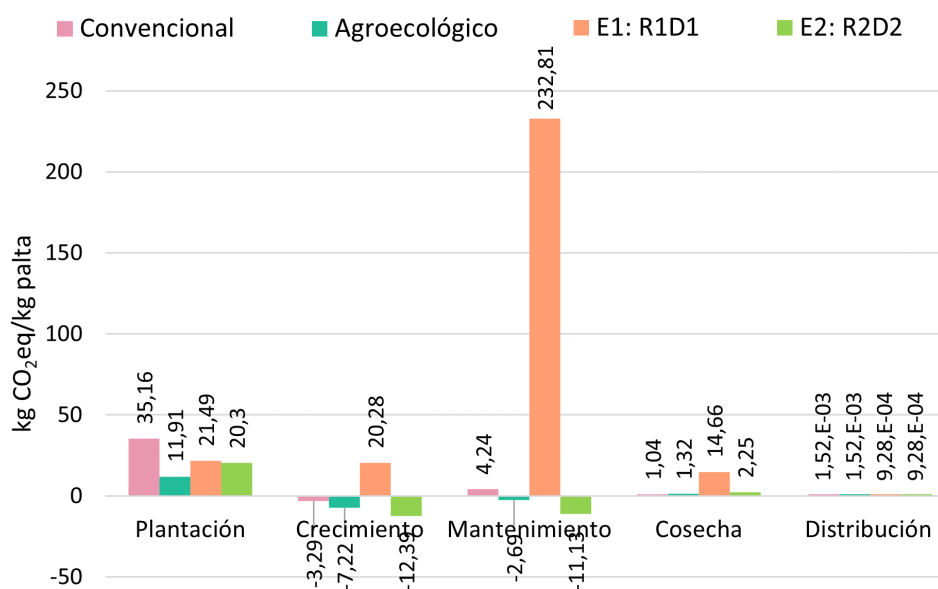


Figura 9.13: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas de los escenarios sensibilizados siguiendo las directrices del IPCC.

Lo anterior se refleja en los resultados por etapas presentados en la Figura 9.13, donde en la etapa de plantación, a pesar de liberar la misma cantidad de carbono en el escenarios 1 y en el caso convencional; el mayor rendimiento del escenario 1 hace que el impacto por kg de palta sea menor que el caso convencional.

Fenómeno similar se observa en las etapas de crecimiento y mantenimiento donde la captura de CO₂, que se refleja en las emisiones negativas, es mayor en el escenario 2 que en el caso agroecológico, producto del menor rendimiento y a la mayor cantidad de árbol nativo (por consecuencia de la menor densidad), que aumenta la captura de CO₂ por kg de palta y “compensa” las emisiones producto del cultivo.

De la Figura 9.14 se observa que la variación en las existencias de carbono del escenario 2 representa la mitad de las emisiones totales. Esto se debe a la cantidad de árboles a los que se les debe controlar la altura, liberando carbono producto de la poda.

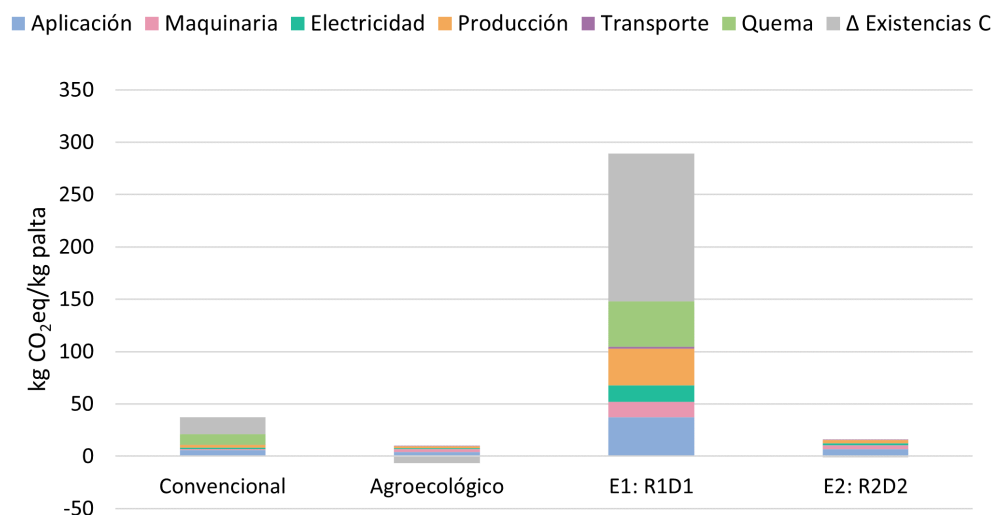


Figura 9.14: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por actividad de los escenarios sensibilizados siguiendo las directrices del IPCC.

Estos resultados resultan particularmente interesantes cuando se comparan con los reportados por el estudio realizado por INIA (2010) en donde se declara un impacto de $-0,04$ kg CO_2eq por kg de palta plantada bajo un manejo convencional en ladera, que se ha declarado como “carbono positivo” cuando el valor está más cercano a la neutralidad (“carbono neutral”), este valor se obtiene cuando se considera el “cambio de uso” de suelo en el análisis, es decir, eliminar el bosque nativo de laderas y plantar paltos en su lugar.

En dicho estudio no se reporta si se considera el impacto de la eliminación de existencias de carbono por el despeje de terreno en la plantación o por la poda de los árboles, por lo que se debe tomar con cautela el valor reportado. Especialmente, cuando los resultados obtenidos en esta oportunidad indican que para tener emisiones negativas se debe optar por un cultivo agroecológico, preservando el bosque nativo, que contribuye a la conservación de las existencias de carbono.

9.2.2. Evaluación del uso de agua

Los resultados obtenidos para el uso de agua se presentan en la Tabla 9.8. Se destaca el elevado impacto del escenario 1 con respecto a los demás reportados.

Tabla 9.8: Impacto ambiental total de escenarios bajo la categoría de impacto de uso de agua.

Caso	Valor [kg m^3 agua/kg palta]
E1: R1D1	408,70
E2: R2D2	24,93
Convencional	40,34
Agroecológico	15,25

El escenario 1 es un 90% mayor al caso convencional. En tanto que el escenario 2 presenta un impacto 39% mayor al caso agroecológico.

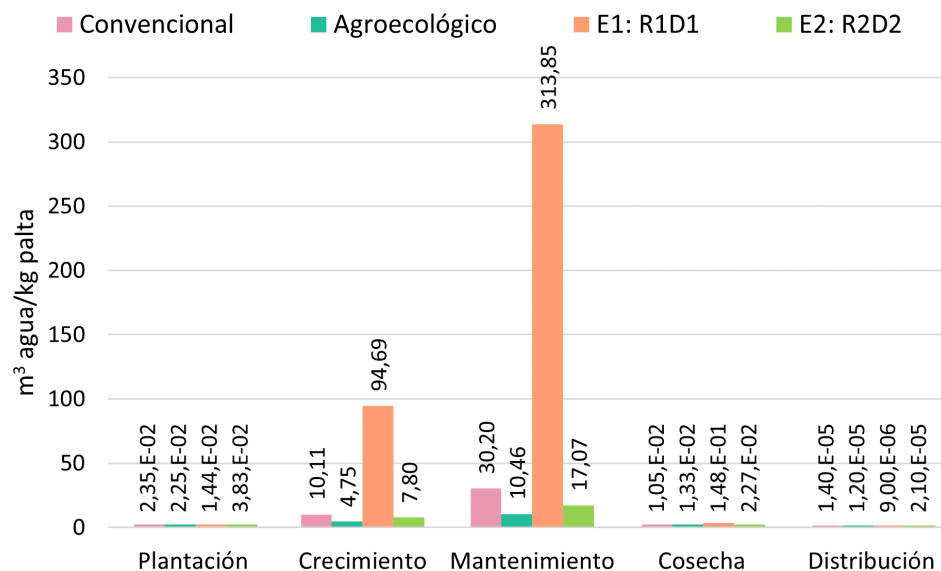


Figura 9.15: Comparación del uso de agua por etapas de los escenarios sensibilizados.

El uso principal de agua, al igual que en los capítulos anteriores, corresponde a la aplicación como se observa en la Figura 9.16. Seguido de la producción de insumos.

El mayor uso de agua lo presenta el escenario 1, localizado en las etapas de crecimiento y mantenimiento (ver Figura 9.15), que se condice con el uso de agua para regadío y el uso de fertilizantes, es decir, con la actividad de aplicación como se observa en la Figura 9.16, que como se vio en las secciones anteriores, tienen una importante componente en su impacto en el agua gris (ver figura (a) de Figura 9.17), lo que sumado a la cantidad de plantas por hectárea, tiene un gran gasto hídrico, aún considerando el ahorro de agua de riego y uso de fertilizantes nitrogenados reportado [150].

Sin embargo, cuando se revisan la figura (b) de la Figura 9.17, se observa que su huella azul es menor al caso convencional. Esto se debe a que los valores reportados para el riego son por hectáreas y no se hace mayor diferencia a la densidad de plantación a la cual se suministra. Además, la plantación intensiva tiene un ahorro de agua asociado (ahorro con respecto al caso convencional), por lo que el agua utilizada por hectárea es menor. Esto sumado al mayor rendimiento, se plasma en un uso de agua azul menor a los demás escenarios por kg de palta.

Por último, no se presenta una diferencia significativa entre el escenario 2 y el caso agroecológico en la huella azul. El mayor uso de agua es producto del menor rendimiento, pues al tener una menor cantidad de árboles por hectárea, el agua destinada a la preparación de insumos es menor.

Ante los resultados obtenidos, se destaca que bajo un manejo agroecológico el uso de agua

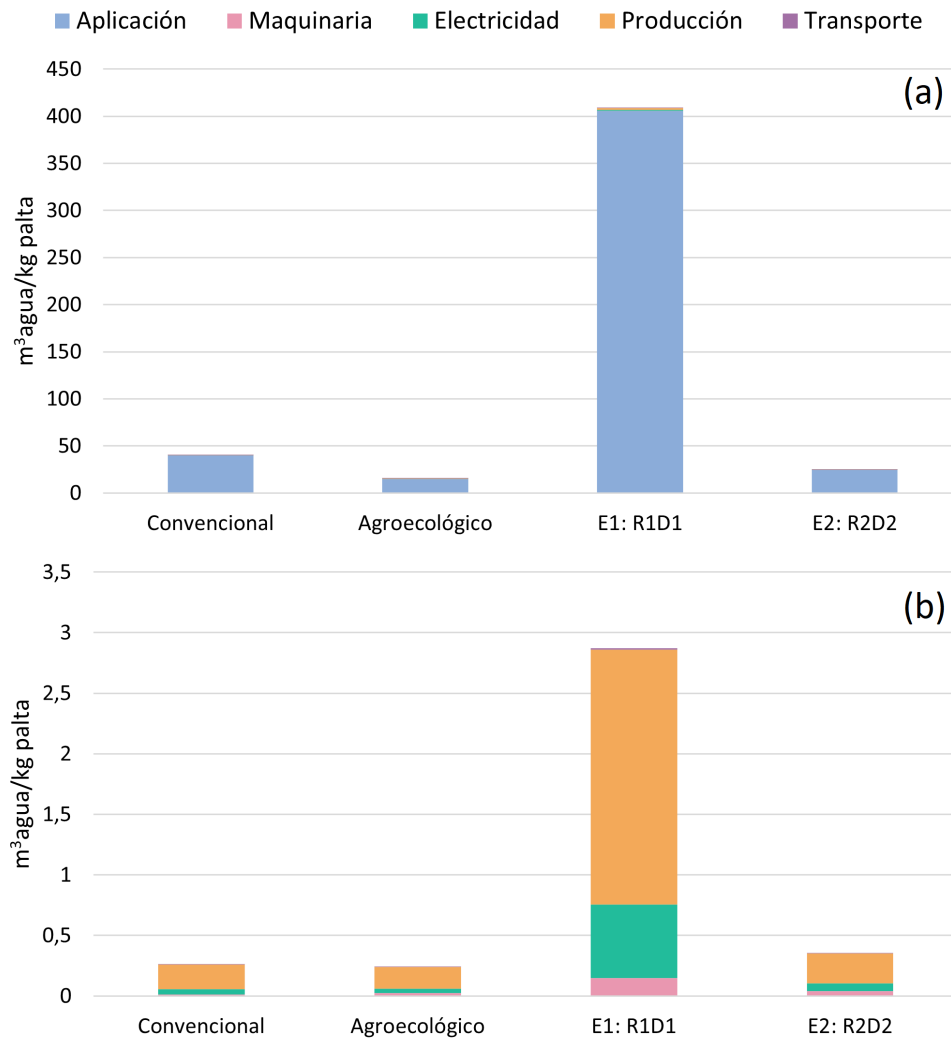


Figura 9.16: Comparación del uso de agua por actividad de los escenarios sensibilizados, total (a) y específico para emisiones menores a $3 m^3$ (b).

para riego, principal componente de la huella azul, puede llegar a ser la mitad por kg de palta del uso bajo un manejo convencional. Como ya se explicó, el escenario 1 posee un menor uso de agua por el ahorro reportado por hectárea y el mayor rendimiento que los otros casos. Con esto dicho, se ha de destacar que el estudio realizado por CAZALAC (2020) indica que un riego de cerca de $9.000 m^3$ por hectárea al año es “adecuado y eficiente” por lo que el riego al año 8 del caso convencional y del escenario 1 están cerca de este valor. Sin embargo, se ha de destacar que el resultado es para la provincia de San Felipe en la región de Valparaíso, que se ha tenido que adaptar a la baja de los caudales del río Aconcagua y que al usar un sistema de riego por goteo, logra tener un riego “adecuado y eficiente”. Además, en dicho documento se establece que “es factible probar alternativas que permitan mejorar esta gestión y ahorrar agua”, por lo que es posible disminuir el uso del recurso hídrico, que puede venir de la mano con la implementación de técnicas agroecológicas que permitan llegar a usos cercanos a los del caso agroecológico y escenario 2 de menos de $8.000 m^3$ por hectárea al año.

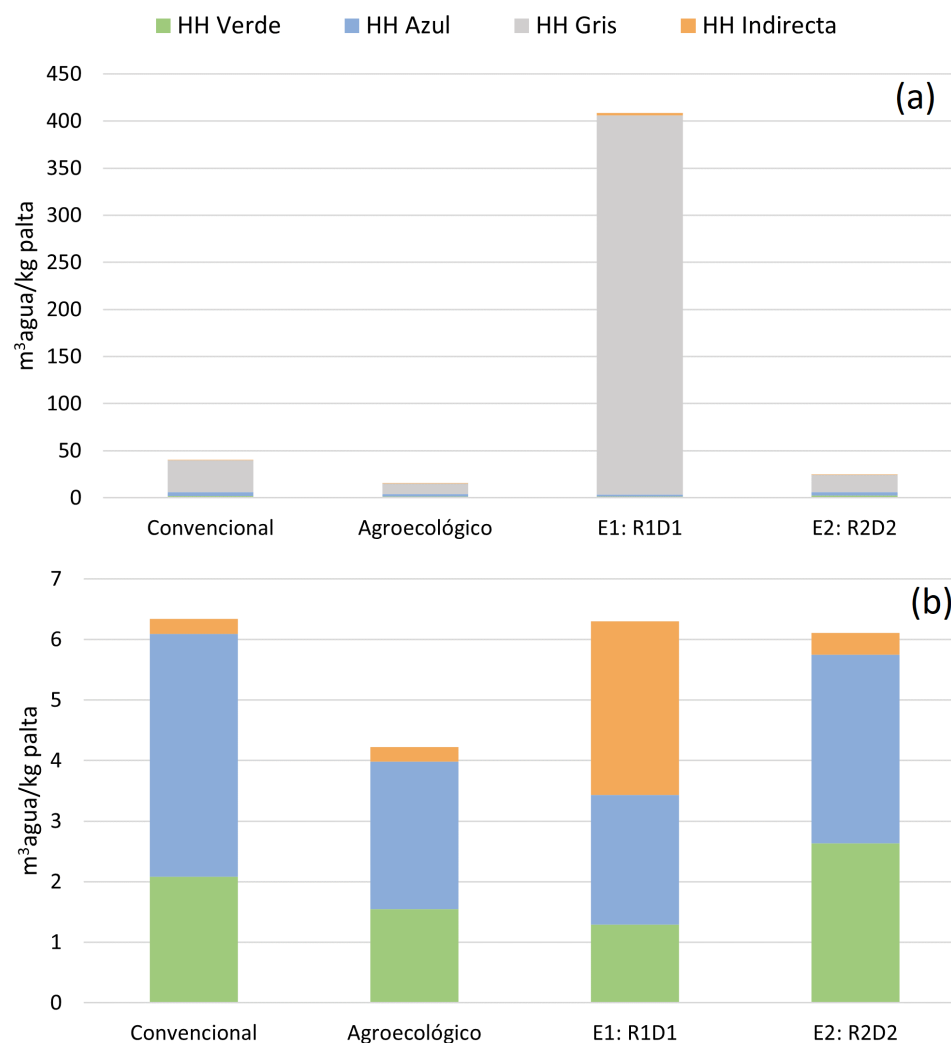


Figura 9.17: Comparación del uso de agua por tipo de huella de los escenarios sensibilizados, todas las huellas (a) y sin huella gris (b).

9.2.3. Evaluación de la eutrofización acuática

En relación a la eutrofización acuática, los resultados se presentan en la Tabla 9.9. El mayor impacto en relación a los demás escenarios, lo presenta el escenario 1.

Tabla 9.9: Impacto ambiental total de escenarios bajo la categoría de impacto de eutrofización acuática.

Caso	Valor [kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]
E1: R1D1	$2,82 \cdot 10^{-1}$
E2: R2D2	$6,80 \cdot 10^{-3}$
Convencional	$2,48 \cdot 10^{-2}$
Agroecológico	$4,10 \cdot 10^{-3}$

Con respecto al caso convencional, el escenario 1 presenta un impacto 91% mayor. En relación al caso agroecológico, los escenarios 2 es un 40% mayor.

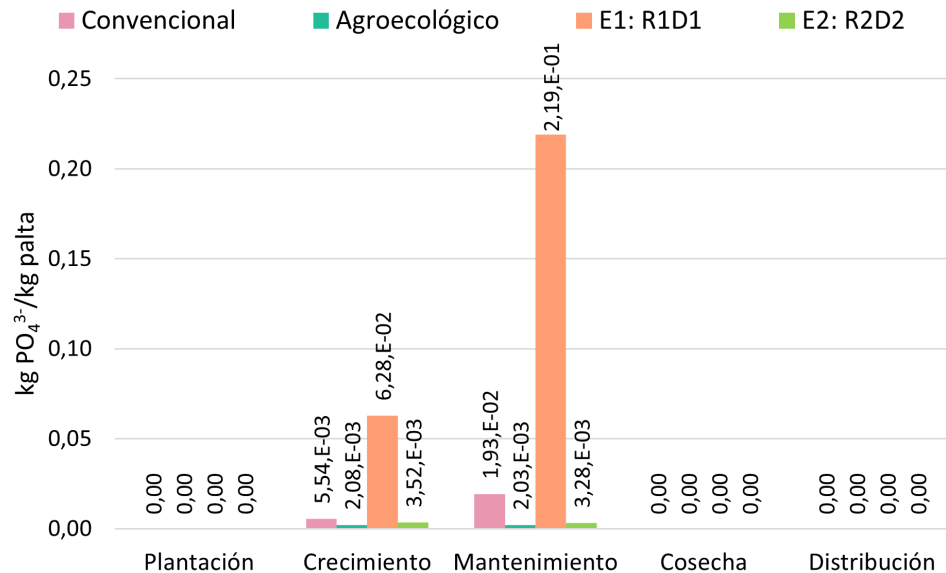


Figura 9.18: Comparación de la eutrofización acuática por etapas de los escenarios sensibilizados.

Producto de la cantidad de nutrientes necesarios para nutrir a los árboles del escenario 1, este presenta el mayor impacto de los escenarios evaluados en cada etapa, tal como se observa en la Figura 9.18, a pesar del ahorro reportado por árbol de fertilizante nitrogenado .

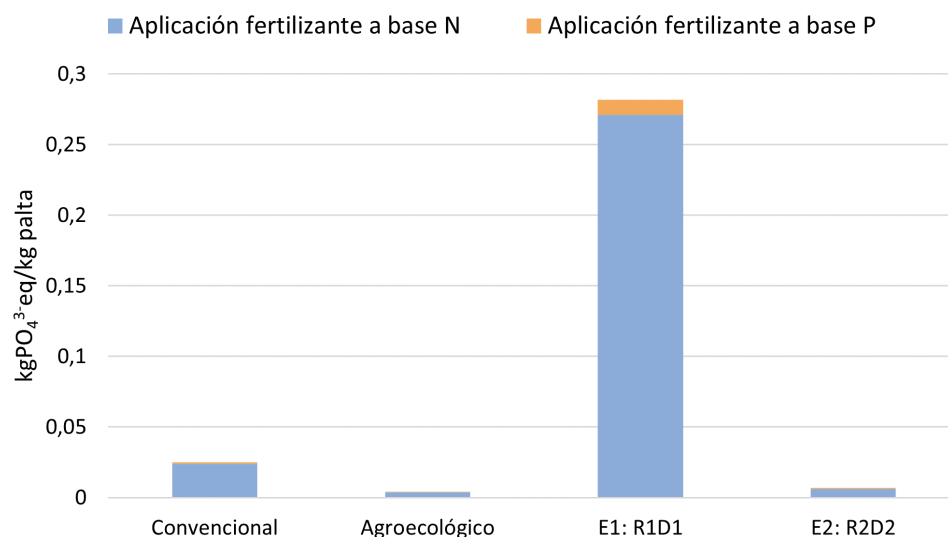


Figura 9.19: Comparación de la eutrofización acuática por actividad de los escenarios sensibilizados.

No se observan diferencias significativas entre el escenario 2 y el caso agroecológico a pesar

de la diferencia de densidades y rendimientos, esto se debe a que el uso de compost es estándar y no depende de la densidad de plantación, luego la variación de resultados responde a los requerimientos de fertilizantes orgánicos para cada escenarios, obteniendo un mayor impacto en el escenario 2 que tiene un menor rendimiento.

Al igual que en análisis anteriores, las mayores emisiones vienen ligadas a la aplicación de fertilizantes a base de nitrógeno como lo refleja la Figura 9.19.

9.2.4. Normalización

Para obtener resultados unificados, se normalizan los resultados obtenidos en las categorías de impacto anteriores según las especies dañadas de un ecosistema acuático, obteniendo los resultados obtenidos en la Tabla 9.10.

Tabla 9.10: Impacto ambiental total de escenarios normalizada.

Caso	Valor [especies·año/kg palta]
E1: R1D1	$5,77 \cdot 10^{-8}$
E2: R2D2	$1,41 \cdot 10^{-9}$
Convencional	$5,10 \cdot 10^{-9}$
Agroecológico	$8,52 \cdot 10^{-10}$

Los resultados muestran que el escenario 1 presenta un impacto 1.032% mayor al caso convencional. En tanto, el escenario 2 es un 66% mayor al caso agroecológico.

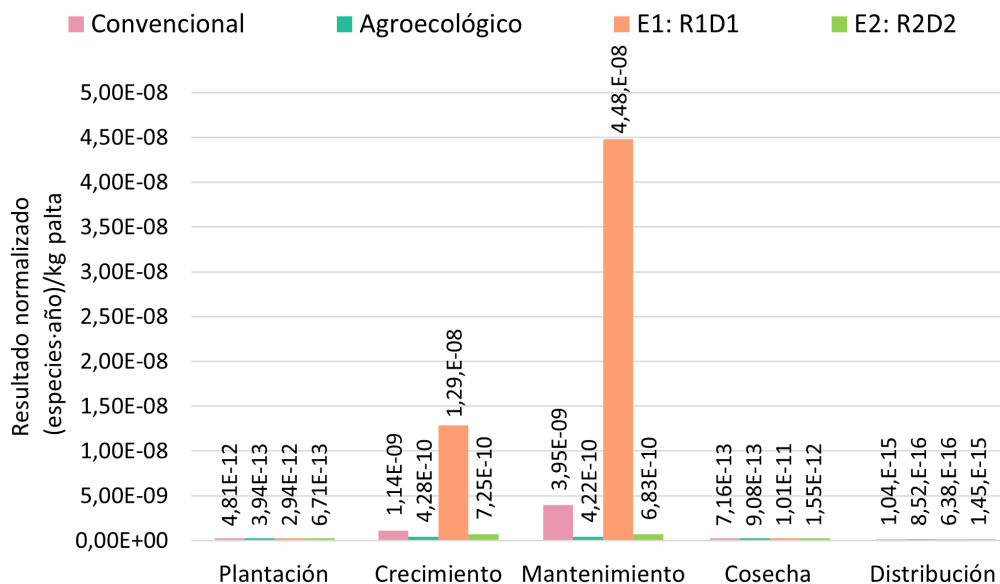


Figura 9.20: Resultados normalizados por etapas donde se comparan los escenarios sensibilizados.

En la Figura 9.20 se presentan los resultados por etapa del cultivo, en donde se observa que

el escenario 1 tiene un impacto significativamente mayor a los demás casos, especialmente en las etapas de crecimiento y mantenimiento, que es donde se aplican los principales insumos para el desarrollo del árbol.

En suma, el escenario 1 con una densidad considerablemente mayor a los demás estudiados es el que presenta un mayor impacto sobre las especies de agua dulce, aun cuando el rendimiento es mayor que a su homónimo, el caso convencional; y cuando se declara que la cantidad de fertilizantes nitrogenados y agua requerida es menor que en los demás escenarios [150].

Esta declaración fue realizada en un artículo en la página de la revista *Redagrícola*, un medio técnico sobre agricultura presente en Chile, Perú y Colombia; por el ingeniero agrónomo Francisco Gardiazábal. En dicho artículo se indica que se puede ahorrar entre un 15 y 20% del recurso hídrico y de fertilizantes nitrogenados [150] con una plantación intensiva, sin embargo, no se declara con respecto a qué es la reducción, por lo que se asumió que era por árbol con respecto a una plantación no intensiva, es decir, al caso convencional.

Así mismo, se ha de corroborar la periodicidad de la poda y el requerimiento de otros nutrientes, pues los árboles en este tipo de plantación son más pequeños, lo que puede llevar a un menor requerimiento de nutrientes y a un ajuste en la poda o a la incorporación de otros agentes que impidan el crecimiento del árbol.

En relación al escenario 2, se robustecen los hallazgos encontrados en los análisis de las demás categorías de impacto, donde el cambio en la densidad de plantación y rendimiento provoca un aumento en el impacto con respecto al caso agroecológico, lo que evidencia la importancia de la producción en el impacto final pues al tener una menor densidad, la cantidad de insumos que requiere es menor y se esperaría un menor impacto por kg de palta.

Es así como el estudio de la variación del impacto, cuando se modifica rendimiento y densidad, permite comprender de mejor forma como diferentes escenarios de plantación impactan al medio ambiente.

En particular, la región de Valparaíso presentó al 2020 un rendimiento y densidad promedio de 10 ton y 690 plantas por hectárea [25], mientras que en Quillota se han reportado rendimientos de entre 6 y 8 ton/ha [18] y el estándar de plantaciones va desde los 238 a 420 plantas/ha [27], esto indica que el caso convencional se encuentra dentro del estándar con un rendimiento de 11 ton/ha al año y una plantación de 278 plantas/ha. Por otro lado, se ha reportado que la producción anual fluctúa dependiendo del año, alcanzando en años altos 20 ton/ha, mientras que en años bajos se llega a 5 ton/ha [13]. Entonces en años donde disminuye el rendimiento aumenta el impacto, mientras que en años donde aumenta, el impacto disminuye por kg de palta. He ahí la importancia de reportar los rendimientos anuales cuando se revisan trabajos de estas características.

Así mismo, estudiar las nuevas formas de cultivo intensivas (escenario 1), donde aumenta considerablemente la densidad de plantación, permite tener una estimación de los impactos que tiene esta práctica, en donde se obtiene que el impacto aumenta en un 1.032,20% en relación al caso convencional.

Finalmente, con respecto a las variaciones para el caso agroecológico, estas se deben tomar con cautela, pues existen diversas técnicas agroecológicas y con la implementación de cada una de ellas varia el rendimiento y la densidad de plantación, como por ejemplo la no poda de árboles, esta técnica conlleva a tener un predio con menos árboles por hectárea, pues se requiere espacio para que estos crezcan.

Capítulo 10

Caso de estudio: Ensenada Los Tilos

En este capítulo se presentan las características del caso de estudio de Ensenada Los Tilos junto con los resultados obtenidos del ACV para cada categoría de impacto estudiada en esta oportunidad. Se determina si el impacto de Ensenada Los Tilos está más cerca del caso convencional o agroecológico.

El centro de investigación Ensenada Los Tilos se encuentra ubicado en la región de Valparaíso en la comuna de Hijuelas. Este predio se encuentra en transición agroecológica, es decir, dentro del manejo del cultivo se han incorporado técnicas agroecológicas, donde se destaca el riego por goteo, no quemar los residuos agrícolas, y la preservación (y regeneración) del bosque nativo. Los detalles de este caso se presentan a continuación:

- **Ubicación**

Comuna de Hijuelas en la provincia de Quillota.

- **Tipo de cultivo**

El cultivo de palta Hass se realiza en plano utilizando camellones.

- **Extensión**

Según los registros tiene una extensión de 28 hectáreas.

- **Riego**

El sistema de riego determinado es por goteo con sensores. Según los registros, el volumen de riego utilizado es de 7.964 m³/ha.

- **Rendimiento del cultivo**

El rendimiento para la temporada 2019-2020 fue de 21,00 ton/ha el cual corresponderá al año 8 del análisis.

- **Insumos**

Los insumos utilizados son como fertilizantes Urea y Fosfimax®40-20, mientras que como pesticida y herbicida, Winspray® y Roundup®, respectivamente.

Se destaca que el predio cuenta con diversos ensayos que no se han aplicado a todo el predio, por lo que no serán incluidos en el análisis, entre ellos: uso de sensores para medir el riego con el fin de mejorar las decisiones que se han de tomar en este ámbito, uso de micorrizas, generación de compost con poda de paltos, uso de controladores biológicos, incorporación de vinyasa de orujo de uva, y desmalezamiento manual.

El límite del sistema, la unidad funcional y las categorías de impacto a estudiar son iguales al del análisis para los casos convencional y agroecológico. Los datos para caracterizar este caso de estudio fueron obtenidos de registros al 2021 y de entrevistas a trabajadores del predio. Los registros se consideraron al año 8 y fueron ajustados de acuerdo a proporciones entregadas por Allende (1995) para obtener los valores de los años anteriores (del año 1 al 7), en caso de ser necesario. Los factores de emisión utilizados para los análisis de las diversas categorías de impacto fueron las mismas que para el análisis antes realizado. El detalle de los datos utilizados se presentan en el Anexo I. En la Tabla 10.1 se presenta una comparación entre los casos estudiados. A continuación se muestran los resultados obtenidos y su comparación con los casos anteriormente estudiados.

Tabla 10.1: Caracterización caso de estudio.

Técnica	Ensenada Los Tilos	Convencional	Agroecológico
Fertilizantes	Sintéticos	Sintéticos	Orgánicos
Residuos poda	<i>Mulch</i>	Quema	<i>Mulch</i>
Sistema riego	Goteo	Microaspersión	Goteo
Bosque nativo	Conservación	Tala	Conservación

10.1. Evaluación de Potencial de Calentamiento Global

El cálculo del Potencial de Calentamiento Global sigue los pasos presentados en el Anexo C. Los resultados obtenidos para el caso de estudio se presentan en la Tabla 10.2, donde se contrastan con los obtenidos en los casos convencional y agroecológico.

Tabla 10.2: Impacto ambiental total del caso de estudio bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global.

Caso	Valor [kg CO ₂ eq/kg palta]
Ensenada Los Tilos	9,02
Convencional	20,99
Agroecológico	9,70

El Potencial de Calentamiento Global de Ensenada Los Tilos es menor a los casos antes analizados. Presenta una diferencia del 7,01 % con el caso agroecológico y del 57,03 % con el caso convencional. Esto nos indica que la emisiones del predio están más cerca del caso agroecológico que del caso convencional.

De la Figura 10.1 se observa que en las categorías de plantación, crecimiento y cosecha las emisiones de Ensenada Los Tilos son menores al del caso agroecológico y convencional, pero son mayores en el mantenimiento e iguales en la distribución.

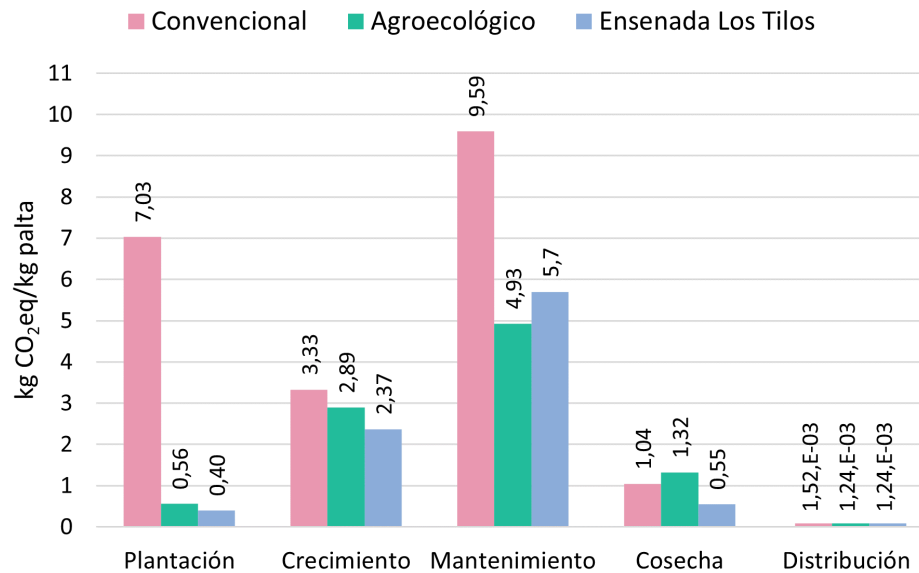


Figura 10.1: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas del caso de estudio con el caso convencional y agroecológico.

Este comportamiento refleja, entre otras cosas, el mayor rendimiento de este predio en comparación con el caso agroecológico, lo que responde al uso de fertilizantes sintéticos que han probado ser la razón de altos rendimientos en los cultivos [141]. Esto hace que en etapas como la plantación y la cosecha el impacto por kg de palta sea menor. Dicho rendimiento debe tomarse con cautela, pues el aumento en el uso de fertilizantes sintéticos no significa aumentar linealmente la producción, llevando a que se aumente año a año su uso para producir la misma cantidad o con un pequeño aumento, lo que favorece la contaminación de aguas [140]. Sin embargo, esto sugiere que un uso óptimo de fertilizantes sintéticos permite aumentar el rendimiento sin que su uso conlleve a un mayor impacto bajo esta categoría, por lo que un cultivo híbrido sería la mejor opción de cultivo.

En la Figura 10.2 se presentan los resultados por actividades, donde se observa que la gran diferencia entre el impacto del caso convencional y el de Ensenada Los Tilos está en la quema de los residuos.

En el caso de estudio, se observa que la mayor emisión está dada por la aplicación de los insumos, siendo similar a la obtenida por el caso convencional pues en ambos casos se usan insumos de origen sintético. Asimismo, se observa que el impacto por la producción de insumos es similar en ambos casos producto de que usan los mismos insumos. La electricidad y uso de maquinaria es menor en el caso de estudio, atribuible principalmente al mayor rendimiento del predio lo que disminuye el impacto por kg de palta. Finalmente, el transporte representa la actividad con menor impacto.

Evaluación del Potencial de Calentamiento Global bajo las directrices del IPCC

Al igual que en los casos antes analizados, se cuantificó el impacto bajo las directrices del IPCC, obteniendo los resultados totales presentados en la Tabla 10.3.

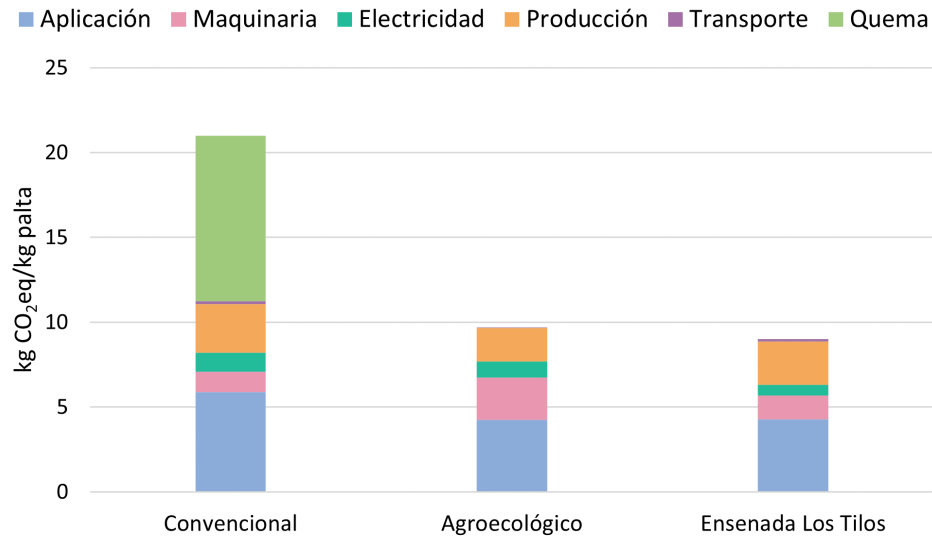


Figura 10.2: Resultados del Potencial de Calentamiento Global por actividad del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.

Tabla 10.3: Impacto ambiental total del caso de estudio bajo la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global bajo las directrices del IPCC.

Caso	Valor [kg CO ₂ eq/kg palta]
Ensenada Los Tilos	5,18
Convencional	37,15
Agroecológico	3,32

El Potencial de Calentamiento Global de Ensenada Los Tilos, bajo las directrices del IPCC, es mayor al caso agroecológico presentando una diferencia del 56,02 %, y es menor al caso convencional con una diferencia del 86,06 %.

En la Figura 10.3 se presentan los resultados por etapas. Se observa una particular diferencia en las etapas de crecimiento y mantenimiento, donde el impacto del caso de estudio es levemente mayor al caso agroecológico. Mientras que en las demás etapas, el impacto es menor a ambos casos, como es la plantación y la cosecha.

En la plantación, el caso de estudio presenta el menor impacto por kg de palta. Esto se debe a que, a diferencia del caso convencional, se preserva el bosque nativo, por lo que los cambios en las existencias de carbono son menores, y los residuos retirados no son quemados, tal y como sucede en el caso agroecológico. Esta diferencia explica la menor emisión con respecto al caso convencional pero no con el caso agroecológico. La diferencia con el caso agroecológico se debe al rendimiento del predio. Al ser el rendimiento del caso de estudio mayor al agroecológico, las emisiones por kg de palta son menores.

En el caso de las etapas de crecimiento y mantenimiento, en ambas etapas las emisiones

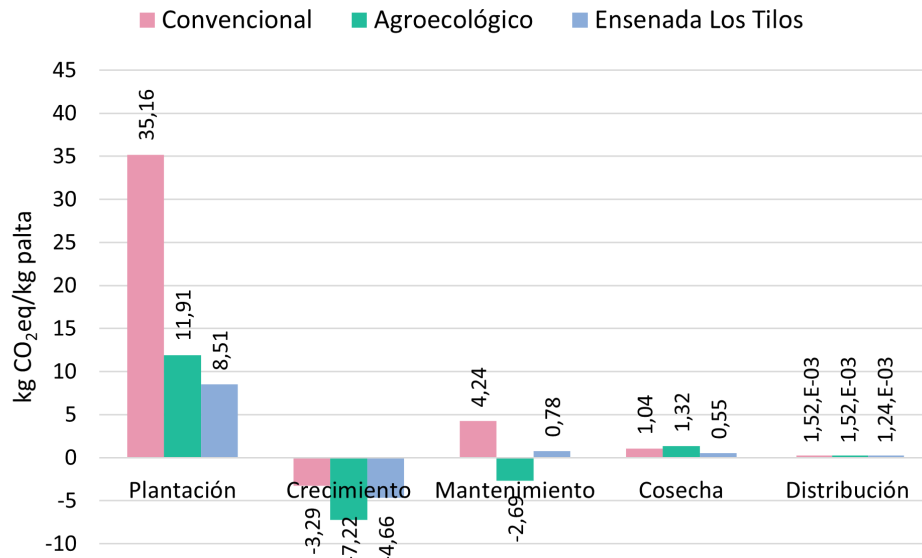


Figura 10.3: Comparación del Potencial de Calentamiento Global por etapas del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico siguiendo las directrices del IPCC.

del caso de estudio está entre los casos convencionales y agroecológicos. La conservación del bosque nativo le permite a Ensenada Los Tilos capturar más carbono que el caso convencional, sin embargo, el uso de fertilizantes sintéticos le confiere un mayor impacto en la aplicación y producción, tal como se observa en la Figura 10.4, así como un mayor rendimiento, que hace que la captura de carbono por kg de palta sea menor y no se alcancen a compensar las emisiones producto del manejo.

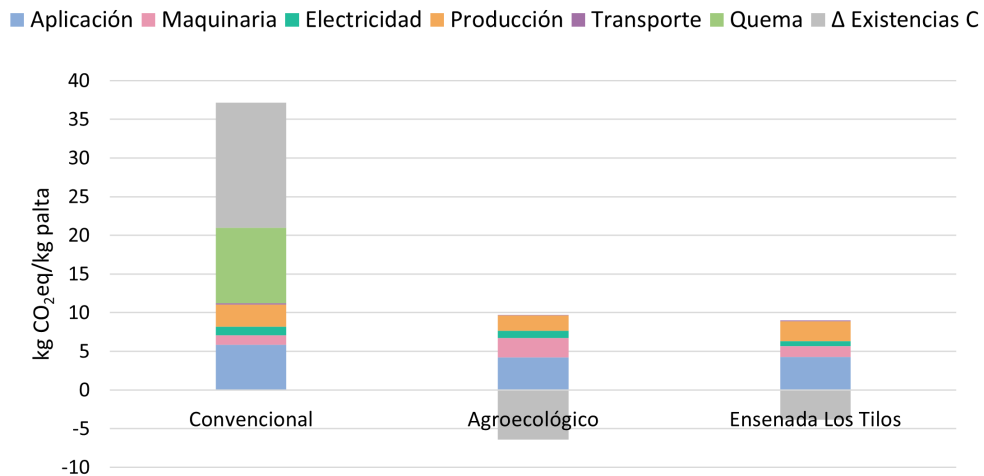


Figura 10.4: Resultados del Potencial de Calentamiento Global por actividad del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico, siguiendo las directrices del IPCC.

Por último, como se presenta en la Figura 10.4, el cambio de las existencias de carbono dista considerablemente del caso convencional, mientras que se acerca más al caso agroecológico,

lo que refleja la importancia de la preservación del bosque nativo.

10.2. Evaluación del uso de Agua

Los resultados generales por uso de agua se presentan en la Tabla 10.4, donde se aprecia que el impacto de Ensenada Los Tilos se encuentra entre el caso convencional y el agroecológico.

Tabla 10.4: Impacto ambiental total del caso de estudio bajo la categoría de impacto de uso de agua.

Caso	Valor [m ³ agua/kg palta]
Ensenada Los Tilos	21,59
Convencional	40,34
Agroecológico	15,25

El resultado del caso de estudio es menor al caso convencional es un 46,48 % y es mayor al caso agroecológico en un 41,57 %. En términos por kg de palta, el uso de agua de Ensenada Los Tilos, es más cercano al caso agroecológico que al caso convencional.

En la Figura 10.5 se observa que en las etapas de crecimiento y mantenimiento el uso de agua de Ensenada Los Tilos se encuentra entre el caso agroecológico y el caso convencional. Mientras que en las otras etapas es menor el uso de agua en el caso de estudio, producto principalmente del mayor rendimiento del predio, lo que disminuye el impacto por kg de palta.

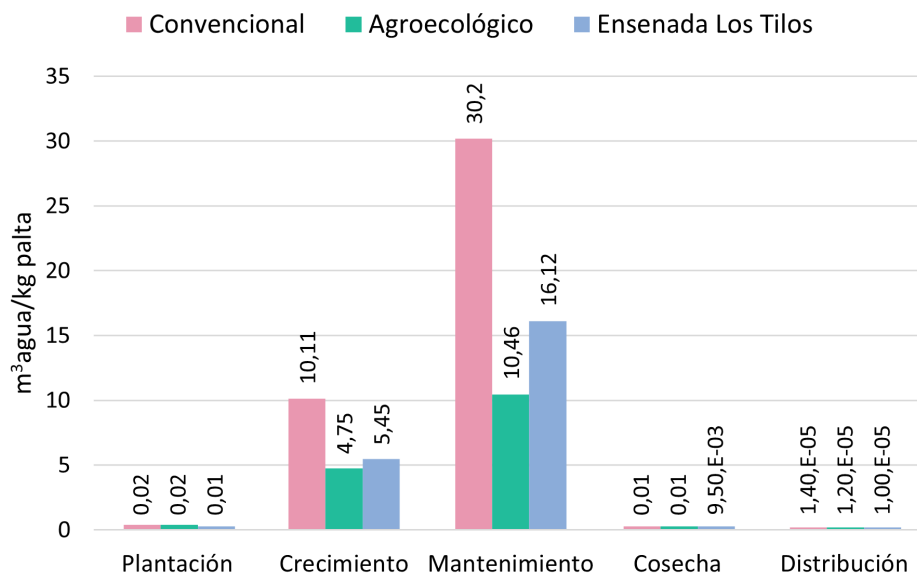


Figura 10.5: Comparación del uso de agua por etapas del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.

Revisando los resultados por huella presentados en la Figura 10.6, se observa que es la

huella gris la que predomina en el uso de agua en el caso de estudio. Esto es debido al uso de fertilizantes de origen sintético que contaminan las agua al lixiviar los nutrientes.

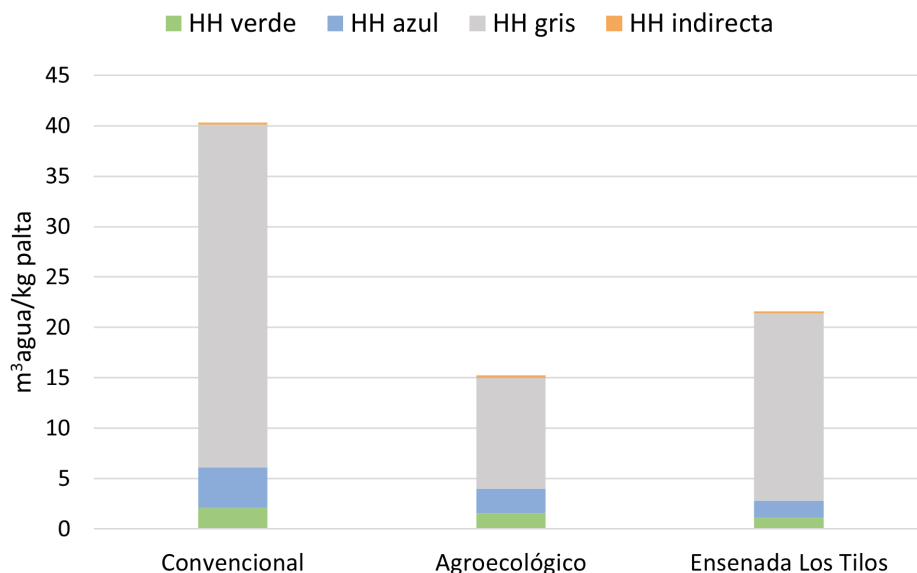


Figura 10.6: Resultados del uso de agua por tipo de huella del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.

En relación al agua azul, el impacto es similar al caso agroecológico pues en ambos cultivos se usa el riego por goteo. El impacto de Ensenada Los Tilos es de $1,74 \text{ m}^3$ por kg de palta, mientras que el del caso agroecológico es de $2,43 \text{ m}^3$ por kg de palta, ambos valores menores al caso convencional de $4,01 \text{ m}^3$ por kg de palta. Si bien las técnicas de ahorro de agua del caso de estudio y del agroecológico son iguales, la diferencia en la huella azul se debe principalmente a los rendimientos en cada caso, al utilizar fertilizantes sintéticos, el caso de estudio posee un mayor rendimiento lo que se refleja en un menor impacto. Este mismo efecto se observa en la huella verde, pues las condiciones climáticas de los casos son equivalentes.

Revisando los resultados por actividad presente en la Figura 10.7, se observa que al igual que en los otros casos, el caso de estudio presenta un mayor uso del agua en la aplicación, que incluye la aplicación directa de agua, más la asociada a la aplicación de fertilizantes. Es por ello que la aplicación tiene un mayor impacto que el caso agroecológico, pues al usar fertilizantes sintéticos se requiere más agua para compensar la contaminación asociada.

Ahora, revisando el impacto de los usos de agua menores a 1 m^3 por kg de palta, se tiene el uso de agua es menor en el caso de estudio. De estos usos, es mayor la producción de los insumos, al igual que en los demás casos. El gasto de agua en el cultivo no es significativamente diferente entre los casos, sin embargo, el mayor rendimiento del caso de estudio conlleva a que el impacto por kg de palta sea menor.

En síntesis, el caso de estudio presenta un uso de agua que se encuentra entre el caso convencional y agroecológico. El sistema de riego y la conservación del bosque nativo permiten disminuir el uso de agua azul y gris con respecto al caso convencional, pero los fertilizantes

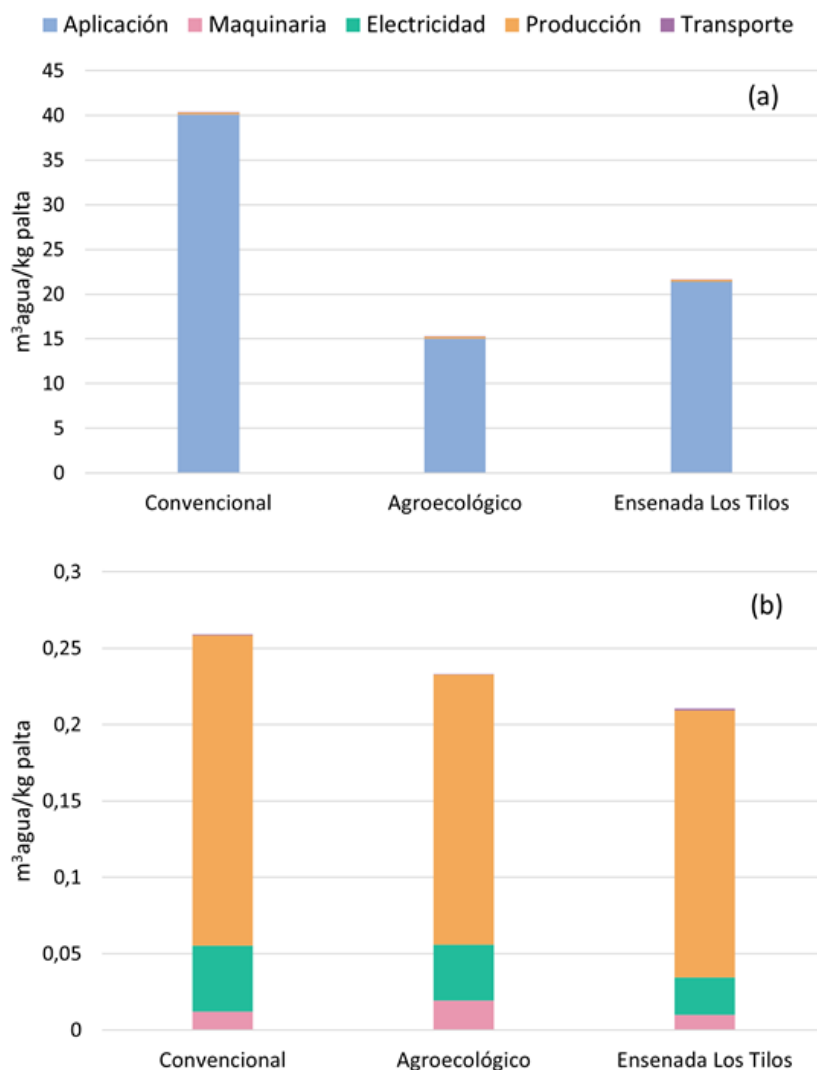


Figura 10.7: Comparación del uso de agua por actividad del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.

Los sintéticos contribuyen a contaminar las fuentes de agua provocando una mayor huella gris que el caso agroecológico.

10.3. Evaluación de la eutrofización acuática

En la eutrofización acuática, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 10.5. El impacto del caso de estudio se encuentra entre los casos convencional y agroecológico.

Tabla 10.5: Impacto ambiental total del caso de estudio bajo la categoría de impacto de eutrofización acuática.

Caso	Valor [kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]
Ensenada Los Tilos	9,40·10 ⁻³
Convencional	2,48·10 ⁻²
Agroecológico	4,10·10 ⁻³

Este resultado refleja que si bien se usan fertilizantes sintéticos, su impacto en términos de eutrofización acuática, se puede compensar con una buena salud del suelo proporcionada por el sistema de riego y el bosque nativo.

En la Figura 10.8 se presenta el impacto por etapa del cultivo, en donde se observa que el impacto de Ensenada Los Tilos es levemente superior al caso agroecológico en el crecimiento, con una diferencia del 0,78 %. Dicha diferencia no se mantiene en la etapa de mantenimiento, donde esta se exagera al 72,23 %.

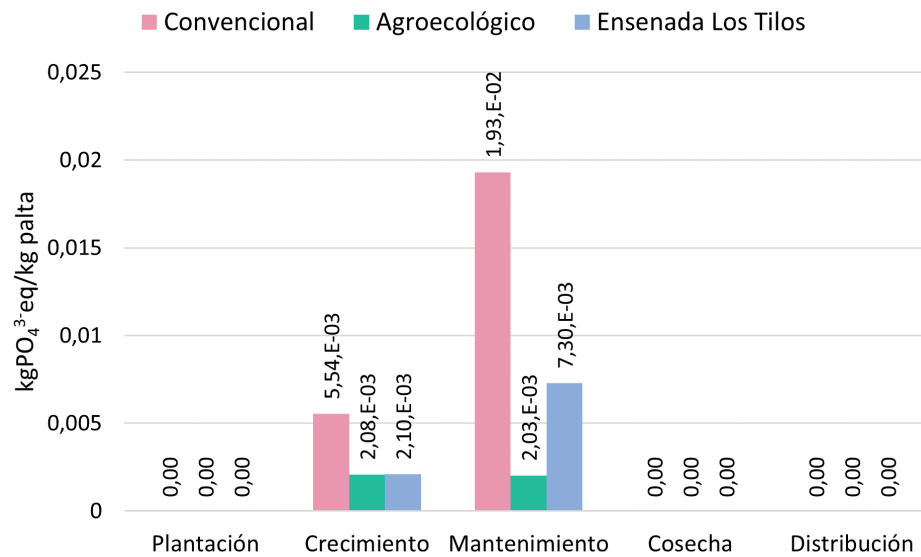


Figura 10.8: Comparación de la eutrofización acuática por etapas del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.

La diferencia entre el caso de estudio y el agroecológico es producto principalmente de la aplicación de nitrógeno, como se observa en la Figura 10.9. Esta mayor aplicación se debe al uso de fertilizantes sintéticos que son más concentrados que los orgánicos, por lo que el árbol asimila menos y queda más disponible para lixiviar y llegar a cuerpos de agua.

En el caso de la aplicación de fósforo, en el caso agroecológico esta es liberada de a poco desde los fertilizantes orgánicos, por lo que no alcanza a formar compuestos inorgánico que quedan atrapados en el suelo. Es por ello que el impacto del caso de estudio tiene un comportamiento más cercano al caso convencional, pero en menor intensidad producto de un

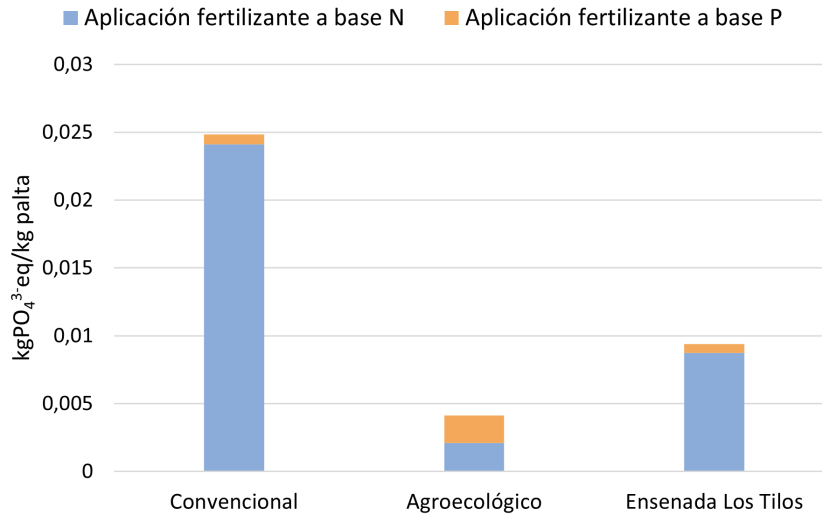


Figura 10.9: Resultados de la eutrofización acuática por aplicación del caso de estudio con el caso convencional y el caso agroecológico.

suelo más sano que permite disminuir la lixiviación de los nutrientes.

10.4. Normalización

Al igual que en secciones anteriores, se normalizan los resultados con tal de poder comparar el impacto neto de cada caso estudiado en este trabajo. El cálculo realizado es análogo al presentado en Anexos F y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 10.6.

Tabla 10.6: Impacto ambiental total del caso de estudio normalizada.

Caso	Valor [especies·año/kg palta]
Ensenada Los Tilos	$1,93 \cdot 10^{-9}$
Convencional	$5,10 \cdot 10^{-9}$
Agroecológico	$8,52 \cdot 10^{-10}$

De los resultados obtenidos, se obtiene que Ensenada Los Tilos tiene un impacto ambiental entre los casos convencional y agroecológico. Presentando una diferencia del 62 % con el caso convencional y del 56 %, con el caso agroecológico.

Revisando por etapas, en la Figura 10.10 se observa que la diferencia en el impacto entre el caso agroecológico y Ensenada Los Tilos no es significativa (menor al 1 %). Esta diferencia se hace más presente en el mantenimiento.

La mayor diferencia que se presenta entre el caso de estudio y el agroecológico se debe al uso de fertilizantes sintéticos y al rendimiento obtenido. Los fertilizantes sintéticos contaminan más los recursos hídricos (que los fertilizantes orgánicos), pero proporcionan un mayor rendimiento del cultivo, lo que se traduce en un menor impacto por kg de palta.

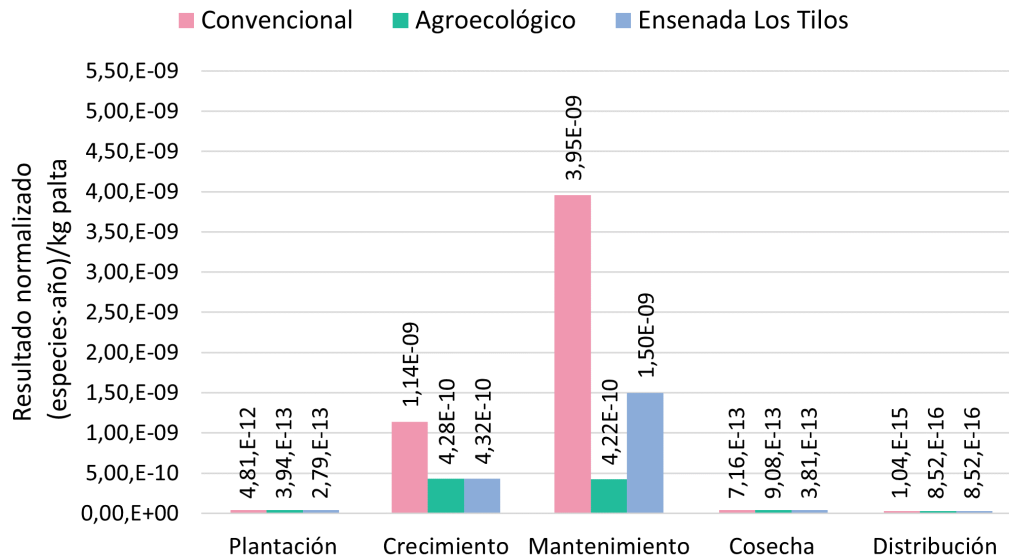


Figura 10.10: Resultados normalizados donde se compara el caso de estudio con el convencional y agroecológico.

Este mayor rendimiento se ha de tomar con cautela, pues diversos estudios han encontrado que cada vez se ha de añadir más fertilizante de origen sintético para mantener el rendimiento pues se desgasta la salud del suelo [141][140], lo que tiene impactos directos en el ecosistema, como se ha podido comprobar en esta ocasión.

Capítulo 11

Discusiones generales

Los resultados obtenidos demuestran que un manejo agroecológico presenta un menor impacto ambiental que un manejo convencional en las categorías de Potencial de Calentamiento Global, uso de agua, eutrofización acuática, y en la categoría de impacto final de ecosistema de agua fresca, presentando una diferencia del 83 % con respecto al caso convencional. Esta diferencia se debe a múltiples factores que inciden en que el sistema agroecológico tenga una menor impacto que uno convencional.

En primer lugar se destaca el reemplazo de fertilizantes sintéticos por unos de origen orgánico que, como se demostró en este estudio, es el cambio dentro del manejo que produce una mayor disminución en las emisiones, cerca del 80 %, con respecto al caso convencional.

Esto se debe, por un lado, al uso excesivo de nutrientes por parte del caso convencional. Según Galleguilos (ver Anexo A), el uso de urea para el cultivo de palta ronda los 20 kg/ha, sin embargo, los datos proporcionados por Ensenada Los Tilos que se utilizaron para corregir los datos presentes en Allende (1995), demuestran que en el campo se agregan más nutrientes de los necesarios. Este comportamiento responde a la tendencia de añadir más nutrientes para producir más, que si bien funciona en los primeros años, a mediano plazo ya se ha de requerir más nutrientes para conservar el rendimiento [140].

Por otro lado, se tiene que el uso de fertilizantes a base de nitrógeno son propensos a lixiviar en forma de N_2O y NH_3 , que se acumulan en acuíferos provocando eutrofización [141], tal y como se observa en la Figura 7.2, donde el nivel de eutrofización del caso convencional es mayor al del caso agroecológico. Además, considerando que es la eutrofización la categoría que domina el impacto a las especies acuáticas (alrededor del 98 % del impacto) se ha de revisar el uso de fertilizantes a base de nitrógeno con el fin de disminuir el impacto en las especies acuáticas.

La alternativa que ofrece un manejo agroecológico es usar fertilizantes de origen orgánico como es el compost. Estos aportan nutrientes que son liberados paulatinamente, permitiendo que el cultivo tenga la disponibilidad necesaria en todo momento. El compost aumenta la materia orgánica del suelo lo que favorece el reciclaje de nutrientes, además, reducen la lixiviación y las emisiones de amoníaco [140]. Los biofertilizantes presentan una alternativa a bajo costo y que permite disminuir los efectos negativos de los fertilizantes sintéticos [141].

En segundo lugar, el uso de cubiertas vegetales o *mulch*, aumenta la biodisponibilidad de fósforo y disminuye los efectos tóxicos de agroquímicos, como pesticidas, sobre el suelo [103]. Además, elimina o limita el uso de herbicidas al impedir el crecimiento de maleza [103] lo que se refleja en la disminución del impacto medio ambiental con respecto a un cultivo tradicional, como se observa en el escenario 3 en la Figura 9.10.

Como tercer punto, el uso de *mulch* y compost, fomentan el crecimiento de microorganismos [103][107] que permiten el reciclaje de nutrientes [107] y fomentan la fijación biológica de nitrógeno, llegando a aportar la mitad del necesario por el cultivo [141].

En cuarto lugar, se destaca la preservación del bosque nativo mediante la implementación de un sistema agroforestal, que su implementación presenta una disminución del 48 % en las emisiones cuando se compara con un manejo convencional, tal y como se obtuvo del análisis de sensibilidad. La conservación de bosque nativo permite mitigar las emisiones de GEI [103] producto de las labores realizadas en el campo, como se observa en la Figura 9.4, donde la captura de carbono se incrementa gracias al bosque nativo; mientras que en un sistema agroecológico permite llegar a tener emisiones negativas, es decir, el cultivo absorbe más CO₂ del que libera en las etapas de crecimiento y mantenimiento, como se observa en la Figura 5.5.

Quinto, el cambio de sistema de riego de microaspersión a uno por goteo refleja un cambio significativo en el uso de agua destinada a riego disminuyendo el gasto de agua a la mitad.

Por último, se destaca que la quema de restos vegetales presenta consecuencias negativas en el medio ambiente por la liberación de GEI [103], como se aprecia en la Figura 9.2, donde la quema representa una de las prácticas que más contribuye al impacto del cultivo tradicional, mientras que la incorporación de estos restos como cubierta vegetal disminuye en un 30 % los impactos producidos por un manejo convencional del campo, como se obtuvo del análisis de sensibilidad de técnicas agrícolas.

La plantación intensiva, que está tomando protagonismo en la manera de plantar, se presenta como el escenario con mayor impacto, que si bien se reporta un ahorro en agua y fertilizantes nitrogenados [150], no es suficiente para compensar los efectos negativos sobre el medio ambiente, es más los amplifica. Esto se debe a que el ahorro en fertilizantes nitrogenados se asumió que era por árbol, pero debido a la cantidad de ejemplares por hectárea, la cantidad de insumos a utilizar aumenta con relación al caso convencional aun cuando el rendimiento es mayor, es decir, la mayor cantidad de árboles no produce lo suficiente para contrastar los impactos por kg de palta, esto principalmente por el tamaño de los árboles, que son más pequeños y llegan a producir cerca de 3 kg de palta cada uno.

Se debe ser responsable con el resultado presentado y corroborar los supuestos tomados, pues producto de la densidad de plantación puede existir una reducción en la evapotranspiración lo que permitiría un mayor ahorro de agua, y al tener más juntos los árboles, un mejor uso de los fertilizantes, lixiviado menos; dos factores que no fueron estudiados a profundidad en esta ocasión por la falta de información disponible al ser una técnica relativamente reciente de cultivo en nuestro país.

Con respecto al caso agroecológico, dependiendo de las técnicas agrícolas reportadas se

encuentran diferentes densidades de plantación y rendimientos, por lo que se debe tener particular cuidado cuando se estudian sus efectos sobre el medio ambiente y cuando se comparan dichos efectos con otros reportados en bibliografía.

Además se destaca que, bajo los resultados obtenidos, el único escenario que se puede denominar como “carbono positivo” es que está manejado bajo un cultivo agroecológico, a diferencia de lo declarado por el INIA. En este se considera la captura de CO₂ por parte de los árboles, pero no el efecto que tiene el despeje de bosque nativo en las laderas. Por lo que se debe tener particular cuidado con los resultados reportados y expuestos por los grandes agricultores, pues puede conllevar a una evasión de su responsabilidad para reducir las emisiones, a pesar de que el INIA indica que se deben hacer esfuerzos para disminuir el impacto en la producción de la palta, que es la fase que más contribuye a la huella, mediante “la elección de suministros con baja huella de carbono”.

El caso de estudio, Ensenada Los Tilos, presentó un impacto ambiental de $1,93 \cdot 10^{-9}$ especies al año por kg de palta, que se encuentra entre el impacto producido por el manejo convencional y el agroecológico. Este resultado responde a lo esperado al considerar que el predio ya ha implementado diversas técnicas relacionadas con lo agroecológico manteniendo como manejo convencional el uso de fertilizantes sintéticos, pesticidas y plaguicidas.

Ante esto, Ensenada Los Tilos tiene potencial para disminuir su impacto pues, como se vio en este estudio, en el cultivo de palta el cambio de fertilizantes sintéticos por unos de índole agroecológico provoca la mayor disminución en impacto ambiental al compararse con un manejo convencional.

El cambio en el uso de fertilizantes tiene impactos de manera transversal en la cadena de producción de palta. Por un lado, como se ve en las Figuras 9.2 y 9.7, se reducen las emisiones por efecto de la producción de fertilizantes [141]. Además, se reduce el impacto producto del transporte, pues los fertilizantes orgánicos se caracterizan por ser producidos localmente, en el mismo predio. Sobre todo, se reduce el impacto en la aplicación, ver Figuras 9.2 y 9.7, pues la incorporación de compost aporta materia orgánica al suelo que permite reducir la lixiviación de los nutrientes al mejorar la estructura del suelo, y al ser una fuente menos concentrada de nutrientes, quedan menos para lixiviar pues estos se van liberando de a poco y son mejor aprovechados por el cultivo.

Si Ensenada Los Tilos cambia el uso de fertilizantes podría disminuir su impacto ambiental en un 30% de acuerdo al análisis de sensibilidad realizado, y quedaría aún más cerca de ser un predio con manejo agroecológico. Dentro del análisis no se consideraron los estudios actuales del predio que consisten en control biológico de plagas, Manejo Holístico para el control de malezas, entre otras. Si bien el manejo de plagas, malezas y enfermedades, no fueron sensibilizadas en este estudio, representan un componente importante dentro del manejo agroecológico.

El trabajo realizado presentó dos resultados para el Potencial de Calentamiento Global lo que permite detectar las principales fuentes de emisiones de GEI sin que estas se vean disminuidas por la captura de carbono por parte del cultivo. De esta manera se evita la evasión de responsabilidades y permite que los encargados del cultivo busquen alternativas para reducir

sus impactos.

Los resultados obtenidos permiten dar una guía de como puede cambiar el cultivo de palta en la provincia de Quillota, donde se destaca que es posible el manejo agroecológico y que con cambios puntuales en ciertas técnicas dentro del manejo tradicional es posible disminuir el impacto medio ambiental. Sin embargo, para que los resultados sean atractivos para el agricultor y desee realizar el cambio, se necesita asegurar un rendimiento y calibre competitivo con el manejo convencional. En este estudio se utilizaron rendimientos obtenidos por literatura, lo que puede variar de caso en caso; y no se estudió como varia el calibre de las paltas bajo un manejo u otro, lo que puede determinar si la palta cumple o no con los estándares de exportación de ciertos mercados internacionales. Por lo que se recomienda realizar un Análisis de Costos de Ciclo de Vida (LCCA por sus siglas del ingles *Life Cycle Cost Analysis*) para evaluar la factibilidad del cambio en el manejo del campo.

El presente estudio es uno de los primeros a nivel nacional que cuantifica el impacto del cultivo de palta Hass bajo un manejo tradicional y agroecológico, logrando jerarquizar las técnicas más significativas en términos de impacto ambiental lo que permitirá tomar acciones en pos de una transición agroecológica. Asimismo, este trabajo puede constituir una herramienta de evaluación para otros predios lo que permitiría situarlos entre un manejo convencional y agroecológico, al igual que se hizo para Ensenada Los Tilos.

Capítulo 12

Conclusiones y proyecciones

En cuanto a lo realizado en este estudio y a los resultados analizados, se logró identificar y caracterizar las diferentes prácticas agrícola del cultivo de palta Hass. Además, se demuestra que un cultivo de palta Hass con manejo agroecológico tiene un menor efecto en términos de impacto ambiental para las categorías de potencial de calentamiento global, uso de agua y eutrofización acuática.

Se concluye que la técnica agroecológica que provoca una mayor disminución, en términos de impacto ambiental, es el cambio de fertilizantes sintéticos por unos de origen agroecológico, con una diferencia del 78,67%; seguido de la conservación del bosque nativo con un 48,36%; luego de la gestión de residuos que cambia la quema por la incorporación de los residuos como cubierta vegetal con un 27,92%; y finalmente, el cambio en el sistema de riego de microaspersión por uno por goteo con un 0,03%.

El cultivo intensivo aumenta en un 1.032,20% el impacto en comparación al caso convencional. Un cultivo bajo manejo agroecológico, al cuantificar las existencias de carbono, puede llegar a capturar más carbono que el que emite. Se deben tomar con cautela estos resultados, pues son diversas las técnicas que se pueden implementar y los resultados que se pueden encontrar en bibliografía.

En relación al caso de estudio Ensenada Los Tilos, se obtiene un impacto 62% menor al caso convencional y 56% mayor al caso agroecológico.

Los resultados obtenidos, al compararse con otros estudios y con las observaciones de expertos, demuestran que existe un uso excesivo de fertilizantes sintéticos en el cultivo de paltas, lo que eleva los impactos reportados. Estos pueden ser disminuidos incorporando técnicas agroecológicas como el uso de compost junto con el asesoramiento de expertos para corroborar que el cultivo reciba los nutrientes que necesita.

Se recomienda para un Análisis de Ciclo de Vida más minucioso, obtener datos de predios con manejo agroecológico y convencional. Aquellos datos deben incluir los rendimientos, las técnicas implementadas, los insumos (origen y uso), las condiciones climáticas, del suelo y de las fuentes de agua, con tal de poder estimar de manera más fiable las precipitaciones, la evapotranspiración y las fracciones de lixiviación.

Se propone estudiar todo el proceso local que ocurre en el campo, desde la etapa de invernadero hasta la distribución, con tal de obtener resultados más completos sobre el impacto del cultivo de palta. Además, se presenta la posibilidad de hacer el análisis hasta la tumba considerando aspectos como la venta de palta madura y verde cuantificando el impacto medio ambiental considerando las pérdidas que provoca vender en un estado u otro.

Por otro lado, para un futuro trabajo se plantea contrastar el impacto producto de las plantaciones en ladera versus en planicie bajo las categorías estudiadas, así como estudiar otras técnicas agroecológicas relacionadas a la poda de los árboles, el uso de sensores para mejorar las decisiones sobre el riego y el Manejo Holístico para el control de malezas.

Finalmente, se indica que se ha de estudiar como varía el rendimiento y calibre en cada caso estudiado y realizar un análisis de factibilidad económica con tal de evidenciar los retornos en cada caso.

Bibliografía

- [1] IPCC, «Summary for policymakers,» *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, págs. xxiii-xxxiii, 2014. DOI: [10.4324/9781315071961-11](https://doi.org/10.4324/9781315071961-11).
- [2] T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner y col., «IPCC: Glosario,» en *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, S. Planton y P. Midgley, eds., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América., 2013, págs. 57-71. dirección: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI%7B%5C_%7DAR5%7B%5C_%7Dglossary%7B%5C_%7DES.pdf.
- [3] C. UC, *Impactos y Adaptación al cambio climático en Chile*. dirección: <https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/impactos-y-adaptacion-al-cambio-climatico-en-chile> (visitado 14-04-2021).
- [4] F. Ramírez y F. De La Vega, *Cambio climático: ¿Cómo afecta a nuestro país y cómo nos podemos preparar?* Dirección: <https://www.uchile.cl/noticias/169946/como-afecta-a-chile-el-cambio-climatico-y-como-nos-podemos-preparar> (visitado 14-04-2021).
- [5] F. De La Vega, *Sequía: Los desafíos para Chile de un futuro con menos agua*, sep. de 2020. dirección: <https://www.uchile.cl/noticias/168766/sequia-los-desafios-para-chile-de-un-futuro-con-menos-agua>.
- [6] EFE, *Agencia EFE: La palta, el “oro verde” que seca la zona central de Chile*, ago. de 2020. dirección: <https://cooperativa.cl/noticias/pais/desastres-naturales/sequia/agencia-efe-la-palta-el-oro-verde-que-seca-la-zona-central-de-chile/2020-08-14/085040.html>.
- [7] M. Cabrera, *Déficit hídrico en región de Valparaíso se mantiene pese a aumento de lluvias en comparación a 2019*, sep. de 2020. dirección: <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-valparaiso/2020/09/15/deficit-hidrico-en-region-de-valparaiso-se-mantiene-pese-a-aumento-de-lluvias-en-comparacion-a-2019.shtml>.
- [8] M. V. Muñoz, «La palta chilena en los mercados internacionales,» *Odepa*, págs. 1-11, 2018. dirección: www.odepa.gob.cl.
- [9] M. Zúñiga, «Consumo de agua por la planta de siete especies frutales producidas en Chile,» *Anales de la Universidad de Chile*, 2013, ISSN: 0717-8883.
- [10] F. S. Agua, *Fundación Somos Agua*. dirección: <https://www.somosagua.cl/> (visitado 22-06-2021).

- [11] Centro de investigación Ensenada Los Tilos, *Ensenada Los Tilos*. dirección: <http://ensenadalostilos.cl/> (visitado 22-06-2021).
- [12] A. Martínez, J. P. Chargoy, M. Puerto, N. Suppen y D. Rojas, «Huella de Agua (ISO 14046) en América Latina Análisis y recomendaciones para una coherencia regional,» *Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable CADIS, Embajada de Suiza en Colombia, Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo COSUDE*, n.º Iso 14046, pág. 90, 2016. dirección: <https://www.shareweb.ch/site/Suiz-Agua-Colombia/Documents/Huella%20Agua%20ISO%2014046%20America%20Latina.pdf>.
- [13] M. Zolezzi y P. Abarca, «Manual del cultivo de palto,» *Manual del cultivo del palto*, vol. 13, págs. 24-39, 2017. dirección: <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/13%20Manual%20Palto.pdf>.
- [14] C. Juri, «Características generales de las paltas,» *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias*, 2009.
- [15] INTAGRI, «Requerimientos de Clima y Suelo en el Cultivo de Aguacate,» *Serie Frutales*, pág. 3, 2019.
- [16] Espasa-Calpe, *heterocigosis*, 2005. dirección: <https://www.wordreference.com/definicion/heterocigosis> (visitado 10-11-2021).
- [17] Agrobit, *Cultivo de Palta: Aspectos técnicos*. dirección: http://www.agrobit.com/Documentos/G%7B%5C_%7D2%7B%5C_%7DMicroemp/MI000002pa.htm (visitado 10-11-2021).
- [18] G. Lemus, R. Ferreyra, P. Gil y col., «El cultivo del palto,» *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 129, n.º INIA, pág. 80, 2010. DOI: [10.5962/bhl.title.156867](https://doi.org/10.5962/bhl.title.156867).
- [19] P. Luppichini, N. Olivares y J. Montenegro, «Guía de Campo Plagas del Palto y sus Enemigos Naturales,» *Boletín INIA N°239*, n.º 239, pág. 108, 2014.
- [20] BCN, *Clima y vegetación Región de Valparaíso*. dirección: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region5/clima.htm%7B%5C#%7D:%7B~%7D:text=Desde%20el%20punto%20de%20vista,%20de%20altura%20hacia%20la%20cordillera> (visitado 10-05-2021).
- [21] Delegación Presidencial Provincial de Quillota, *Conozca la Provincia*, 2020. dirección: <https://dppquillota.gob.cl/conozca-la-provincia/> (visitado 11-11-2021).
- [22] C. Cataldo, P. Herrera, C. Raggio e I. Navarrete, «Informe Consolidado Realidad Socioeconómica de la Provincia Quillota,» *CIDEP*, págs. 0–148, 2019.
- [23] Weather Spark, *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Quillota*, 2021. dirección: <https://es.weatherspark.com/y/25817/Clima-promedio-en-Quillota-Chile-durante-todo-el-a%7B%5C~%7Bn%7D%7Do> (visitado 11-11-2021).
- [24] Palta-hass, *Temporada 2019-2020: Más del 71 % de las exportaciones de paltas chilenas fueron exportadas a Europa*, 2020. dirección: <http://www.paltahass.cl/noticias-palta/07/07/2020/temporada-2019-2020-mas-del-71-de-las-exportaciones-de-paltas-chilenas-fueron-exportadas-a-europa/> (visitado 07-04-2021).
- [25] ODEPA y CIREN, «Catastro frutícola. Región de Valparaíso,» 2020.

- [26] F. Miranda, *Plantaciones de paltos: la carencia de una legislación para el uso del suelo*, 2018. dirección: <https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2018/06/20/plantaciones-de-paltos-la-carencia-de-una-legislacion-para-el-uso-del-suelo/> (visitado 10-11-2021).
- [27] R. Castro y M. Espinosa, «Evaluación ambiental de plantaciones de paltos en laderas. Cuenca del río Petorca. Región de Valparaíso. Chile,» págs. 1-170, 2008.
- [28] FONTAGRO, «Evaluación de los cambios en la productividad del agua, frente a diferentes escenarios climáticos, en distintas regiones del Cono Sur,» *PROCISUR*, pág. 155, 2017.
- [29] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y Servicios de Ingeniería DEUMAN Ltda., «Estudio “Huella De Carbono En Productos De Exportación Agropecuarios de Chile”,» *Fundación para la Innovación Agraria (FIA)*, vol. FIA EST-20, págs. 1-32, 2010.
- [30] S. González, «Huella de Carbono de Productos Agropecuarios Exportables,» *INIA*, págs. 66-71, 2011. dirección: <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/la-pucp-frente-al-cambio-climatico/medidas-dentro-del-campus/huella-de-carbono-pucp/>.
- [31] A. Infante y K. San Martín, «Manual de producción agroecológica,» *Centro de Educación y Tecnología*, págs. 1-204, 2016.
- [32] R. Montalba, A. Infante, A. Contreras y L. Vieli, «Agroecología En Chile: Precursores, Pioneros Y Su Legado,» *Agroecología*, vol. 11, n.º 2, págs. 69-76, 2016, ISSN: 1989-4686.
- [33] V. campesina, *Definición, principios y búsqueda dentro de la agroecología*. dirección: <https://bosquedeniebla.com.mx/que-hacemos/agroecologia/agroecologia-definiciones-principios/> (visitado 26-05-2021).
- [34] Servicio Agrícola Ganadero (SAG), «Agricultura orgánica nacional: Bases Técnicas y Situación Actual,» *Agricultura Orgánica Nacional*, pág. 156, 2013.
- [35] FAO, *¿Qué es la agricultura orgánica?* Dirección: <https://www.fao.org/organicag/oa-faq/oa-faq1/es/>.
- [36] Chile Huerta, *¿Qué es el Mulch?* Dirección: <https://chilehuerta.cl/2019/08/15/que-es-el-mulch/> (visitado 29-11-2021).
- [37] D. Chifarelli, E. Descalzi, L. Brusca y C. Gelabert, «Agroforestería y agroecología : experiencias,» *Leisa Revista de Agroecología*, vol. 35, n.º 4, págs. 27-20, 2019. dirección: <https://www.leisa-al.org/web/images/stories/revistapdf/vol35n4.pdf>.
- [38] Savory Institute, *WHAT IS HOLISTIC MANAGEMENT?* Dirección: <https://savory.global/holistic-management/> (visitado 11-11-2021).
- [39] A. regenerativa, *Manejo Holístico*. dirección: <https://www.agriculturaregenerativa.es/manejo-holistico-3/> (visitado 11-11-2021).
- [40] E. Nkonya, «Enfoques Agroecológicos sobre la Escasez de Agua,» en *Agroecología para la Seguridad Alimentaria y Nutrición. Actas del Simposio Internacional de la FAO 18 - 19 de Septiembre de 2014*, 2014, cap. 10, págs. 190-216.
- [41] A. Leu, «Enfoques Ecológicos para Reducir los Insumos Externos en la Actividad Agrícola,» en *Agroecología para la Seguridad Alimentaria y Nutrición. Actas del Simposio Internacional de la FAO 18 - 19 de Septiembre de 2014*, 2014, cap. 9, págs. 170-188.

- [42] P. González, «Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes,» *Asesoría Técnica Parlamentaria*, págs. 1-5, 2019. dirección: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias%7B%5C_%7Dambientales%7B%5C_%7Dde%7B%5C_%7Dla%7B%5C_%7Daplicacion%7B%5C_%7Dde%7B%5C_%7Dfertilizantes.pdf.
- [43] P. Eguillor, «Agricultura orgánica chilena: estadísticas sectoriales 2019,» *Ministerio de Agricultura*, pág. 16, 2020.
- [44] Servicio Agrícola Ganadero (SAG), «Datos de Producción Orgánica: Temporada 2019,» *Ministerio de Agricultura*, págs. 1-7, 2019.
- [45] P. Rosset, «Organización Y Procesos Sociales Para Aplicar La Agroecología En Una Escala Mayor,» en *Agroecología para la Seguridad Alimentaria y Nutrición. Actas del Simposio Internacional de la FAO 18 - 19 de Septiembre de 2014*, 2014, cap. 16, págs. 324-335.
- [46] R. D'Annolfo, B. Graeub y B. Gemmill-Herren, «socioeconomía agroecológica: contribución de la agroecología a los ingresos agrícolas, la mano de obra y otras dimensiones socioeconómicas de los sistemas alimentarios,» en *Agroecología para la Seguridad Alimentaria y Nutrición. Actas del Simposio Internacional de la FAO 18 - 19 de Septiembre de 2014*, 2014, cap. 19, págs. 363-380.
- [47] Centro de investigación Ensenada Los Tilos, *Palta Regenerativa*. dirección: <http://ensenadalostilos.cl/palta-sustentable/> (visitado 22-06-2021).
- [48] C. de investigación Ensenada Los Tilos, *Bosque Nativo*. dirección: <http://ensenadalostilos.cl/bosque-nativo/> (visitado 22-06-2021).
- [49] Centro de investigación Ensenada Los Tilos, *Energía*. dirección: <http://ensenadalostilos.cl/energia/> (visitado 22-06-2021).
- [50] P. Fullana i Palmer, «Análisis del Ciclo de Vida,» *Facultad de Ingeniería*, págs. 1-14, 1999.
- [51] Ihobe S.A, «Análisis de ciclo de vida y huella de carbono,» *Gobierno Vasco*, págs. 1-53, 2009. dirección: http://www.comunidadism.es/wp-content/uploads/downloads/2012/10/PUB-2009-033-f-C-001%7B%5C_%7D analisis-ACV-y-huella-de-carbonoV2CAST.pdf.
- [52] J. Heijnen, «Life Cycle Assessment: Principles and Practice,» *National Risk Management Research Laboratory*, n.º april, págs. 1-9, 2006.
- [53] T. D. Gerarden, R. G. Newell y R. N. Stavins, *Assessing the Energy-*, January. 2015, ISBN: 9789188787354.
- [54] V. Strezov, X. Zhou y T. J. Evans, «Life cycle impact assessment of metal production industries in Australia,» *Scientific Reports*, vol. 11, n.º 1, págs. 1-9, 2021, ISSN: 20452322. DOI: [10.1038/s41598-021-89567-9](https://doi.org/10.1038/s41598-021-89567-9). dirección: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89567-9>.
- [55] V. Aymard y V. Botta-Genoulaz, «Normalisation in life-cycle assessment: consequences of new European factors on decision-making,» *Supply Chain Forum*, vol. 18, n.º 2, págs. 76-83, 2017, ISSN: 16246039. DOI: [10.1080/16258312.2017.1333385](https://doi.org/10.1080/16258312.2017.1333385).

- [56] A. Fedele, A. Mazzi, M. Niero, F. Zuliani y A. Scipioni, «Can the Life Cycle Assessment methodology be adopted to support a single farm on its environmental impacts forecast evaluation between conventional and organic production? An Italian case study,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 69, págs. 49-59, 2014, ISSN: 09596526. DOI: [10.1016/j.jclepro.2014.01.034](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.034). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.034>.
- [57] A. Arango Ramírez, L. G. Carmona y S. A. Romero, «Análisis de ciclo de vida en el sector agrícola:el caso del municipio de Viotá, Cundinamarca(Colombia),» *Ambiente y Desarrollo*, vol. 18, n.º 35, pág. 117, dic. de 2014, ISSN: 0121-7607. DOI: [10.11144/Javeriana.AyD18-35.acvs](https://doi.org/10.11144/Javeriana.AyD18-35.acvs). dirección: <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/ambienteydesarrollo/article/view/11814>.
- [58] G. Page, B. Ridoutt y B. Bellotti, «Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 32, págs. 219-226, 2012, ISSN: 09596526. DOI: [10.1016/j.jclepro.2012.03.036](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.036). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.036>.
- [59] R. Horne, T. Grant, K. Verghese y R. E. Horne, «Life cycle assessment: principles , practice and context,» *Life Cycle Assessment-Principles, Practice and Prospects*, págs. 1-8, 2009.
- [60] C. Cederberg y B. Mattsson, «Life cycle assessment of milk production - a comparison of conventional and organic farming,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 8, n.º 1, págs. 49-60, 2000, ISSN: 09596526. DOI: [10.1016/S0959-6526\(99\)00311-X](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(99)00311-X).
- [61] K. Mondelaers, J. Aertsens y G. van Huylenbroeck, «A meta-analysis of the differences in environmental impacts between organic and conventional farming,» *British Food Journal*, vol. 111, n.º 10, págs. 1098-1119, 2009, ISSN: 0007070X. DOI: [10.1108/00070700910992925](https://doi.org/10.1108/00070700910992925).
- [62] R. Eltun, «Comparisons of nitrogen leaching in ecological and conventional cropping systems,» *Biological Agriculture and Horticulture*, vol. 11, n.º 1-4, págs. 103-114, 1995, ISSN: 01448765. DOI: [10.1080/01448765.1995.9754697](https://doi.org/10.1080/01448765.1995.9754697).
- [63] G. Haas, M. Berg y U. Köpke, «Nitrate leaching: Comparing conventional, integrated and organic agricultural production systems,» *IAHS-AISH Publication*, n.º 273, págs. 131-136, 2002, ISSN: 01447815.
- [64] F. S. Matthias S. Meier, Christian Schader, «LCA in organic and conventional product comparison: a review,» en *Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector*, M. S. Corson y H. M. van der Werf, eds., 2012, págs. 777-778.
- [65] P. Hadjian, T. Bahmer y J. Egle, «Life Cycle Assessment of Three Tropical Fruits (Avocado, Banana, Pineapple),» *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 22, págs. 127-141, 2019.
- [66] F. Huiza, «Cálculo de la huella de carbono en producción de paltas.,» *Universidad de Chile*, 2014, ISSN: 0717-8883.
- [67] F. Santibañez, P. Santibañez, N. Gajardo y F. Huiza, «Región de Valparaíso: Normales climatológicas,» *INFODEP*, págs. 1-24, 2016. dirección: http://basedigitaldelclima.mma.gob.cl/pdf%7B%5C_%7Destudio%7B%5C_%7Ddos/6Valparaiso.pdf.
- [68] P. Gil M., «Situación Hídrica de las Plantaciones de Paltos en Chile,» *INIA*, vol. 41, págs. 39-53, 2007.

- [69] S. Allende, «Evaluación Técnico Económica del Palto, Variedad Hass,» *Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía*, 1995.
- [70] V. Alvear y Fundación Somos Agua, «Transición agroecológica,» inf. téc., 2021.
- [71] Fundación Somos Agua, «Proyectos Fundación Somos Agua,» *Entrevista personal*, 2021.
- [72] R. Mundaca, *Producción de Palta Orgánica en las Condiciones Agroecológicas de la Provincia de Petorca*, 2007.
- [73] A. Frohmann y X. Olmos, «Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático,» *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*, págs. 1-78, 2013. dirección: www10.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2013/13146.pdf<https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4101/S2013998rev1.pdf?sequence=6&DisAllowed=y>.
- [74] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, «Informe sobre la brecha en las emisiones del 2020,» págs. 1-16, 2020.
- [75] BBC News Mundo, *Cambio climático: ¿cuál es el medio de transporte que más contamina?* 2019. dirección: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49461967> (visitado 30-08-2021).
- [76] MundoMaritimo, *¿Cuál es la real huella de carbono del transporte marítimo?* 2020. dirección: <https://www.mundomaritimo.cl/noticias/cual-es-la-real-huella-de-carbono-del-transporte-maritimo> (visitado 30-08-2021).
- [77] Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, «Manual de implementación de Análisis de Ciclo de Vida en la construcción,» págs. 1-56, 2012. dirección: https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/manual%7B%5C_%7Dimplementacion%7B%5C_%7Dmetodologia%7B%5C_%7Dacv.pdf.
- [78] Ministerio del Medio Ambiente, «Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018,» pág. 534, 2020. dirección: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/7305681%7B%5C_%7DChile-BUR4-1-2020%7B%5C_%7DIIN%7B%5C_%7DCL.pdf.
- [79] Energía Abierta, *Factores de Emisión*, 2021. dirección: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/> (visitado 14-09-2021).
- [80] Ministerio para la Transición Ecológica, «Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización,» *Gobierno de España*, pág. 52, 2018. dirección: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia%7B%5C_%7Dhuella%7B%5C_%7Dcarbono%7B%5C_%7Dtc30-479093.pdf.
- [81] IPCC 2006, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, National Greenhouse Gas Inventories Programme, H. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe, eds. IGES, Japón, 2006.
- [82] Cepal, «Metodologías de cálculo de la Huella de Carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina,» pág. 51, 2012.
- [83] Institute Standards British, *Guide to PAS 2050 - How to Assess the Carbon Footprint of Goods and Services*. 2008, pág. 58, ISBN: 9780580646362. dirección: <http://www.fao.org/sustainable-food-value-chains/library/detalles/es/c/266040/>.

- [84] Fundación Chile, «Guía para la evaluación de la Huella Hídrica productiva a nivel cuenca en Chile,» *Dirección General de Aguas*, 2016. DOI: [10.5334/baw.84](https://doi.org/10.5334/baw.84).
- [85] A. G. Schmid, *Diferenciación espacial en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida: Desarrollo de factores regionales para la eutrofización acuática y terrestre*. 2008, vol. Doctorado, pág. 194, ISBN: 9788461288885. dirección: <http://www.usc.es/biogrup/sites/default/files/AlejandroGallego.pdf>.
- [86] E. Ortiz-Reyes y R. P. Anex, «A life cycle impact assessment method for freshwater eutrophication due to the transport of phosphorus from agricultural production,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 177, n.º June 2019, págs. 474-482, 2018, ISSN: 09596526. DOI: [10.1016/j.jclepro.2017.12.255](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.255).
- [87] AQUAE Fundación, *¿Qué es la eutrofización y cómo contamina el agua?* Dirección: <https://www.fundacionaquae.org/eutrofizacion/> (visitado 29-11-2021).
- [88] SKC, *New Holland T4.85F*.
- [89] R. Cabrero y H. Catalán, «Maquinaria. Objetivo: ahorro de combustible,» *Agricultura*, págs. 280-285, 2011.
- [90] R. Díaz, «Agricultura Organica,» *Academia*,
- [91] S. Wood y A. Cowie, «A Review of Greenhouse Gas Emission Factors for Fertiliser Production,» *Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting*, n.º June, 2004.
- [92] Sistema Español de Inventario de Emisiones, «Producción de compost,» *Metodologías de estimación de emisiones*, págs. 1-7, 2018.
- [93] Weihai Borui Chemical Machinery, *Reactor de hidrólisis de lote Industrial, con paleta agitadora, 3000L*, 2020. dirección: https://spanish.alibaba.com/product-detail/3000l-industrial-batch-hydrolysis-reactor-with-stirring-paddle-1600240370581.html?spm=a2700.7724857.topad%7B%5C_%7Dclassic.d%7B%5C_%7Dtitle.180023ce8B41k5 (visitado 29-10-2021).
- [94] J. Abrigo, V. Cifuentes, T. Molina y M. Moraga, «Plantas de tratamientos integral de residuos de piscicultura para una salmonera con sistema de recirculación,» *IQ6702 Taller de Proyectos*, vol. Memoria de, 2021.
- [95] R. Abín Rueda, «Impactos ambientales de la producción de huevos: Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono,» *Master En Biotecnología Alimentaria*, n.º 1, pág. 89, 2016.
- [96] R. Pazmiño, «Ingeniero En Medio Ambiente Tema : Avícola “ Siria ” Del Sitio Mochal De La Ciudad De Calceta,» 2018.
- [97] R. Lal, «Carbon emission from farm operations,» *Environment International*, vol. 30, n.º 7, págs. 981-990, 2004, ISSN: 18736750. DOI: [10.1016/j.envint.2004.03.005](https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005).
- [98] J. L. Porcuna, «Aceites Minerales, Ficha Práctica,» *Servicio de Sanidad Vegetal, Valencia*, pág. 2011, 2011.
- [99] A. Altuna, A. Lafarga, Ó. del Hierro y col., «Huella de carbono de los cereales,» *Navarra agraria*, n.º 194, págs. 31-38, 2012, ISSN: 0214-6401.
- [100] Escobar, Jaime; Bordones, Juan; Norambuena, Lincoln; Reinoso, Aliosha, *Guía Metodológica Inventario de Emisiones Atmosféricas*, 2011. dirección: http://www.sinia.cl/1292/articles-52667%7B%5C_%7DGuiaMInventarioEmisionesAtmosfericas2011.pdf.

- [101] N. García, «Matriz energética y eléctrica en Chile,» *BCN*, n.º Asesoría Técnica Parlamentaria, 2021.
- [102] C. Mota, M. I. Alcaraz-López, Martínez-Ballesta y M. Carvajal, «Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos,» *Consejo superior de Investigaciones Científicas*, vol. 1, pág. 43, 2010.
- [103] M. Robert, *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos No. 96*. París, 2002, pág. 61, ISBN: 9253046902. dirección: <http://books.google.es/books?hl=es%7B%5C%7Dlr=%7B%5C%7Ddid=OKZt9agfRksC%7B%5C%7Ddoi=fnd%7B%5C%7Dpg=PR3%7B%5C%7Ddq=CAPTURA+DE+CARBONO+EN+LOS+SUELOS+PARA+UN+MEJOR+MANEJO+DE+LA+TIERRA%7B%5C%7Ddots=5xOjDqvtWf%7B%5C%7Dsig=c9-6h5Q4W%7B%5C%7DqU0xBHudD4IqchYyc>.
- [104] N. Yandún, «Estimación De Impactos Ambientales Basado En El Análisis De Ciclo De Vida De La Fase Agrícola De La Cadena Agroalimentaria Convencional Y Agroecológica De La Papa (*Solanum Tuberosum*) En Las Juntas Parroquiales “La Esperanza”, Y “Tabacundo”, Cantón Pedro M,» Tesis doct., Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2018, pág. 88, ISBN: 1718812728. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.
- [105] D. Gavilanes, «Estimación De Impactos Ambientales Basado En El Análisis De Ciclo De Vida De La Fase Agrícola De La Cadena Agroalimentaria Convencional Y Agroecológica De La Zanahoria (*Daucus Carota*) En Las Juntas Parroquiales “La Esperanza” Y “Tabacundo”, Cantón Pedro M,» Tesis doct., Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2018, pág. 78, ISBN: 1718812728. dirección: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.
- [106] W. Álvarez, «Estimación De Impactos Ambientales Basado En El Análisis De Ciclo De Vida De La Fase Agrícola De La Cadena Agroalimentaria Convencional Y Agroecológica De La Frutilla (*Fragaria sp.*) En El Cantón Cayambe,» Tesis doct., Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2019, pág. 87, ISBN: 1718812728.
- [107] R. C. Khanal, «Climate Change and Organic Agriculture,» *Journal of Agriculture and Environment*, vol. 10, págs. 116-127, 2009, ISSN: 2091-1009. DOI: [10.3126/aej.v10i0.2136](https://doi.org/10.3126/aej.v10i0.2136).
- [108] F. Santibáñez, P. Santibáñez, C. Caroca y col., *Evapotranspiración de referencia para la determinación de las demandas de riego en Chile*, 2015. dirección: <http://www.agrimed.cl/images/ATLAS%7B%5C%7D2%7B%5C%7D20abr.swf>.
- [109] J. M. Uribe, R. Cabrera, A. De la Fuente y M. Paneque, «Atlas Bioclimático de Chile,» *Laboratorio de Bioenergía y Biotecnología Ambiental*, 2012.
- [110] A. (Osorio U., «Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos,» *Serie Actas INIA*, vol. 50, pág. 211, 2013. dirección: <http://biblioteca.inia.cl/link.cgi/Catalogo/Actas/38988.act>.
- [111] N. Quintana, «Fertilización en el Cultivo del Aguacate,» *XOBA*, vol. 2, págs. 125-128, 2006.
- [112] H. Gonzalez, S. Sadeghian y E. Arias, *Lixiviación de nutrientes en suelos de la zona cafetera. Prácticas que ayudan a reducirla*. 2015, pág. 36, ISBN: 9789588490168.

- [113] C. Bonilla, «Análisis del Riesgo de Lixiviación de Pesticidas en Suelos con Napas Superficiales,» *Ciencia e Investigación Agraria*, vol. 25, n.º 2, págs. 69-80, 1998.
- [114] Estación Experimental Agropecuaria, «Aspectos Ambientales del Uso de Glifosato,» *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, pág. 114, 2010, ISSN: 0378-5866. dirección: <http://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord%7B%5C%7Dfrom=export%7B%5C%7Ddid=L370505596%7B%5C%7D5Cnhttp://dx.doi.org/10.1159/000355709%7B%5C%7D5Cnhttp://sfxit.ugent.be/ugent?sid=EMBASE%7B%5C%7Dissn=03785866%7B%5C%7Ddid=doi:10.1159/000355709%7B%5C%7Datitle=Long-term+outcomes+of+developmental+exposure>.
- [115] M. C. Sasal, A. E. Andriulo, M. G. Wilson y S. I. Portela, «Pérdidas de glifosato por drenaje y escurrimiento en Molisoles bajo siembra directa,» *Informacion Tecnologica*, vol. 21, n.º 5, págs. 135-142, 2010, ISSN: 07168756. DOI: [10.1612/inf.tecnol.43741it.09](https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.43741it.09).
- [116] M. d. M. Ambiente, *Aprueba Anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales de la Cuenca del Río Aconcagua*, 2017.
- [117] División de Normas del Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial. NCh409/1.Of2005. Agua potable,» pág. 13, 2005.
- [118] L. Neumeister, *Riesgos del Herbicida 2,4 - D*, 2014.
- [119] Camposol, «Análisis de la huella hídrica en los campos de cultivo de espárrago de Camposol acorde a la norma iso 14046,» *Suiz Agua*, págs. 0-56, 2015. dirección: <http://doc.rero.ch/record/308810/files/>.
- [120] E. Audsley, S. Alber, R. Clift y col., «Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture,» *Agriculture and Agro-Industry, including Fisheries*, pág. 107, 2003. dirección: <http://randd.defra.gov.uk/Default.aspx?Menu=Menu%7B%5C%7DModule=More%7B%5C%7DLocation=None%7B%5C%7DCompleted=0%7B%5C%7DProjectID=11442>.
- [121] S. Pfister, D. Saner y A. Koehler, «The environmental relevance of freshwater consumption in global power production,» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, págs. 580-591, 2011. dirección: <https://esd.ifu.ethz.ch/downloads/water-inventory-data.html>.
- [122] SONAMI, «Informe Consumo De Agua En Minería 2018,» pág. 29, 2018. dirección: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2020/06/informe-de-agua-2018.pdf>.
- [123] CRU Consulting, «Roca Fosfórica,» 2018.
- [124] Water Footprint, *Gasolina*, 2017. dirección: <https://www.watercalculator.org/posts/gasolina/> (visitado 21-09-2021).
- [125] A. G. Larrambe, «Evaluación de la Huella Hídrica del Ciclo Integral del Agua de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona,» pág. 95, 2016.
- [126] E. Builes, «Cuantificación y Análisis de Sostenibilidad Ambiental de la Huella Hídrica Agrícola y Pecuaria de la Cuenca del Río Porce,» *Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente.*, pág. 90, 2013. dirección: <http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/cuantificacion%7B%5C%7Dy%7B%5C%7Danalisis.pdf>.

- [127] A. Y. Hoekstra, A. K. Chapagain y M. M. Aldaya, *Manual de evaluación de la huella hídrica Establecimiento del estándar mundial*. 2021, ISBN: 9781849712798.
- [128] Ministerio de Agricultura y Riego, «Huella hídrica del Perú,» *Sector Agropecuario*, pág. 31, 2015. dirección: <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/197>.
- [129] S. Fathel, *Drip Irrigation can Save Energy and Money*, 2020. dirección: <https://extension.psu.edu/drip-irrigation-can-save-energy-and-money> (visitado 18-11-2021).
- [130] J. Chu, *New design cuts costs, energy needs for drip irrigation, bringing the systems within reach for more farmers*, 2017. dirección: <https://phys.org/news/2017-04-energy-needsfor-irrigation-systemswithin-farmers.html> (visitado 18-11-2021).
- [131] MOWBOT TEAM, *Organic Fertilizer Vs. Inorganic*, 2018. dirección: <https://www.mowbot.com/blog/organic-fertilizer-vs-inorganic/> (visitado 30-11-2021).
- [132] S. Frattini, *Fertilización: ¿Orgánica o sintética?* 2019. dirección: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2019/10/23/fertilizacion-organica-o-sintetica/> (visitado 30-11-2021).
- [133] C. Estrada, *Micorrizas - ¿Qué son?* 2019. dirección: <https://eficagua.cl/micorrizas-que-son/>.
- [134] Iquiquevision, *Proyecto de innovación arrojó primer estudio sobre el requerimiento hídrico en paltos*. 2020. dirección: <https://iquiquevision.cl/2020/03/10/proyecto-de-innovacion-arrojo-primer-estudio-sobre-el-requerimiento-hidrico-en-paltos/> (visitado 18-11-2021).
- [135] A. Pedrozo Acuña, «La huella hídrica gris y la sustentabilidad,» *Perspectivas IMTA*, vol. 1, n.º 15, págs. 1-3, ago. de 2020. DOI: [10.24850/b-imta-perspectivas-2020-15](https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2020-15). dirección: <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/la-huella-hidrica-gris-y-la-sustentabilidad?idiom=es>.
- [136] R. Miller, *Inorganic Fertilizer Vs. Organic Fertilizer*, 2018. dirección: <https://homeguides.sfgate.com/plant-fertilizers-work-best-storebought-homemade-105383.html> (visitado 30-11-2021).
- [137] Zamnesia, *Diferencia: Fertilizantes Sintéticos Vs Naturales*, 2018. dirección: <https://www.zamnesia.es/blog-diferencia-fertilizantes-sinteticos-vs-naturales-n537> (visitado 30-11-2021).
- [138] J. P. Abella G. y M. J. Martínez C., «Contribution of a tributary stream to eutrophication of lake tota (Boyacá, Colombia),» *Revista Colombiana de Química*, vol. 41, n.º 2, págs. 243-262, 2012, ISSN: 2357-3791.
- [139] K. Cusi y M. Vargas, *Revisión Sistemática: Disminución de Fosfatos en Cuerpos de Agua para Reducir la Eutrofización*. Lima, 2021, págs. 1-53, ISBN: 0000000344128. dirección: http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez%7B%5C_%7DRS-SD.pdf?sequence=1%7B%5C%7DisAllowed=y.
- [140] FAO, «Los Fertilizantes, en cuanto a contaminante del agua,» en *Lucha Contra La Contaminacion Agricola de Los Recursos Hidricos*, 1997, cap. 3.
- [141] R. Martínez, M. López, B. Dibut, C. Parra y J. Rodríguez, *La fijación biológica del nitrógeno atmosférico en condiciones tropicales*. 2006, pág. 172.
- [142] FAO, «Resumen y Recomendaciones,» en *Lucha Contra La Contaminacion Agricola de Los Recursos Hidricos*, 1997, cap. 5.

- [143] RIVM De zorg voor morgen begint vandaag, *ReCiPe 2016*, 2018. dirección: <https://www.rivm.nl/documenten/recipe2016cfsv1120180117> (visitado 26-11-2021).
- [144] A. D. Van Diepeningen, O. J. De Vos, G. W. Korthals y A. H. Van Bruggen, «Effects of organic versus conventional management on chemical and biological parameters in agricultural soils,» *Applied Soil Ecology*, vol. 31, n.º 1-2, págs. 120-135, 2006, ISSN: 09291393. DOI: [10.1016/j.apsoil.2005.03.003](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.03.003).
- [145] Portal Agro Chile, *Proyecto CONICYT I+D investiga lixiviación de nitrato con asociación de cultivos diversificados*, 2019. dirección: <https://www.portalagrochile.cl/2019/12/09/proyecto-conicyt-id-investiga-lixivacion-de-nitrato-con-asociacion-de-cultivos-diversificados/> (visitado 18-11-2021).
- [146] K. V. Hooker, C. E. Coxon, R. Hackett, L. E. Kirwan, E. O’Keeffe y K. Richards, «Evaluation of Cover Crop and Reduced Cultivation for Reducing Nitrate Leaching in Ireland,» *Journal of Environmental Quality*, vol. 37, n.º 1, págs. 138-145, 2008, ISSN: 1537-2537. DOI: [10.2134/jeq2006.0547](https://doi.org/10.2134/jeq2006.0547).
- [147] N. Bakr, T. A. Elbana, A. E. Arceneaux, Y. Zhu, D. C. Weindorf y H. M. Selim, «Runoff and water quality from highway hillsides: Influence compost/mulch,» *Soil and Tillage Research*, vol. 150, págs. 158-170, 2015, ISSN: 01671987. DOI: [10.1016/j.still.2015.01.014](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.014). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.01.014>.
- [148] A. I. Gårdenäs, J. W. Hopmans, B. R. Hanson y J. Šimůnek, «Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation,» *Agricultural Water Management*, vol. 74, n.º 3, págs. 219-242, 2005, ISSN: 03783774. DOI: [10.1016/j.agwat.2004.11.011](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.11.011).
- [149] M. Cunha, «Eficacia de los Sistema Agroforestaes en el Control de la Lixiviación de Nitrato,» *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, págs. 113-118, 2007.
- [150] J. Velasco, *Las Claves del Éxito de Jorge Schmidt*, 2021. dirección: <https://www.redagricola.com/cl/las-claves-del-exito-de-jorge-schmidt/> (visitado 28-01-2022).
- [151] E. Takele y G. Bender, «Avocado Sample Establishment and Production Costs and Profitability Analysis for San Diego and Riverside Counties , 2011,» *Establishment and Production Costs for Organic Avocados*, 2011.
- [152] J. P. Martínez, V. Mueña y R. Ruiz, «Nutrición y fertilidad en paltos,» *La Cruz: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 283, 2014.
- [153] Anasac, *Winspray. Ficha Técnica*.
- [154] Anasac S.A., *Winspray. Hoja de datos de seguridad*.
- [155] Monsanto, *Etiqueta Roundup SAG*.
- [156] ANLA, «Plan de Manejo Ambiental Erradicación de Cultivos Ilicitos,» *Plan de manejo ambiental*, vol. 0, págs. 3-4, 2000.
- [157] CENTA, «Microorganismos. Guía Técnica 4,» *PROPA-Oriente*, 2016, ISSN: 23812427. DOI: [10.1097/01.REO.0000000000000027](https://doi.org/10.1097/01.REO.0000000000000027).
- [158] J. Urrutia, *Diagnóstico Ambiental de la Producción de Bosque Nativo del Predio Los Tilos*, Hijuelas, 2005.

- [159] C. Barriga, «Acumulación y Secuestro de Carbono en Bosques Esclerófilos de la Reserva Nacional Roblería del Cobre de Loncha: Implicancias para su conservación,» *Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza*, 2012.
- [160] C. Dorronsoro, *Suelo Mineral y Suelo Orgánico*, 2021. dirección: http://www.edafologia.net/programas%7B%5C_%7Dsuelos/practclas/taxoil/comun/mineorg.htm (visitado 09-11-2021).
- [161] J. Sarasty, «Análisis de físico y químico de la interacción de palto con especies nativas en la región de Valparaíso,» 2021.
- [162] E. S. Gaspar-Santos, M. González-Espinosa, N. Ramírez-Marcial y J. D. Álvarez-Solís, «Acumulación y descomposición de hojarasca en bosques secundarios del sur de la Sierra Madre de Chiapas, México,» *Bosque*, vol. 36, n.º 3, págs. 467-480, 2015, ISSN: 07179200. DOI: [10.4067/S0717-92002015000300013](https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300013).
- [163] M. Stone, D. Lindenmayer, K. Nisbet y S. Seibold, *Decaying forest wood releases a whopping 10.9 billion tonnes of carbon each year. This will increase under climate change*, 2021. dirección: <https://theconversation.com/decaying-forest-wood-releases-a-whopping-10-9-billion-tonnes-of-carbon-each-year-this-will-increase-under-climate-change-164406> (visitado 27-10-2021).
- [164] Universidad de Talca - CITRA, *Visualizador de Mapa Evapotranspiracion de Referencia*, 2020. dirección: <http://www.eto.otalca.cl/webmap/> (visitado 15-09-2021).
- [165] O. María Jesús, «Estimación de la huella hídrica de cultivos con potencial bioenergético en la provincia de Limarí, Región de Coquimbo, Chile,» *Univrsidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas*, pág. 372 941, 2012.
- [166] Water Footprint, «Manual de Evaluación de la Huella Hídrica,» pág. 44, 2002. dirección: <http://waterfootprint.org/media/downloads/ManualEvaluacionHH.pdf>.
- [167] J. Ormeño, «Control de malezas perennes,» *INIATierra adentro*, págs. 20-23, 2008. dirección: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR34741.pdf>.

ANEXOS

Anexo A

Entrevistas

En el siguiente anexo se presenta un resumen de las entrevistas realizadas para este estudio, donde se declara con quien se habló y la información obtenida de dicha instancia.

1. Entrevista a Andrés Robles, co-fundador Fundación Somos Agua

Entrevista realizada de manera presencial durante una visita a terreno al centro de investigación Ensenada Los Tilos donde se comentaron las actividades que está realizando la fundación y los proyectos en los que está trabajando.

2. Entrevista a Javier Acevedo, agrónomo del centro de investigación Ensenada Los Tilos

La entrevista fue realizada por medio de la plataforma Zoom, junto con el co-fundador de la Fundación Somos Agua, Andrés Robles. En esta entrevista se determinaron las principales características del crecimiento del palto, la cantidad de agua necesaria para su desarrollo y los principales nutrientes que requeridos en los primeros años.

3. Entrevista con Fundación Eurochile

Entrevista realizada por medio de la plataforma Microsoft Teams junto a Javier Mora de la fundación Eurochile y Andrés Robles, co-fundador de la fundación Somos Agua. Se habló sobre bases de datos para el ACV y se realizaron recomendaciones sobre estas.

4. Entrevista a Jonathan Torres, técnico agrícola del centro de investigación Ensenada Los Tilos

Se realizó una entrevista telefónica con el técnico agrícola Jonathan Torres donde se determinaron varios aspectos del funcionamiento del predio, como es el uso del tractor para las aplicaciones de agroquímicos y la cosecha; la poda y que se hace con los residuos obtenidos; y las características del sistema de riego.

5. Entrevista a Jorge Galindo Rojo, agricultor

Para la determinación de la cantidad de *mulch* presente en los cultivos de palta, se contactó con un agricultor que posee diversos cultivos de hortalizas y cuenta con cultivos de paltas. Este sacó una muestra de 25x25 cm obteniendo 685 g de *mulch*.

6. Entrevista a Mauricio Galleguillos, ingeniero agrónomo

Se le consultó sobre los datos utilizados en el estudio, dando la indicación de que el uso de urea ronda los 200 kg/ha.

Anexo B

Supuestos y consideraciones generales

B.1. Proporción de riego

De acuerdo con el cuadro 3.3 del Manual de cultivo del palto, la proporción de riego viene regida de acuerdo a la Tabla B.1.

Tabla B.1: Porcentaje de cobertura según fase del cultivo de palta.

Fase del cultivo	% cobertura según fase
Establecimiento inicio	20
Desarrollo del cultivo	40
Media estación	60
Inicio madurez	80
Madurez fisiológica	100
Término del período productivo	20

Conociendo el total de agua a asignar para el riego del palto, se establece una proporción hacia atrás de la cantidad de agua que se debe suministrar, con ello se determina la cantidad de agua que debe recibir el árbol en las diversas etapas de cultivo. Para el caso de estudio, se tomaron los años ya establecidos y se categorizaron en las fases de cultivo, esto se presenta en la Tabla B.2.

Tabla B.2: Años establecidos para cada etapa y porcentaje de riego correspondiente.

Fase del cultivo	Años	% cobertura según fase
Establecimiento inicio	1	20
Desarrollo del cultivo	2-4	40
Media estación	5	60
Inicio madurez	6-7	80
Madurez fisiológica	8	100

B.2. Pesticida y herbicida

B.2.1. Pesticida

El pesticida utilizado para el estudio es Winspray® que es en base a aceite parafínico, los detalles de este producto se presentan en la Tabla B.3.

Tabla B.3: Datos Winspray®.

Dato	Valor	Referencia
Nombre comercial	Winspray ®	[153]
Uso	Pesticida	[153]
Composición	Aceite Parafínico 83,23 % p/v	[153]
Densidad	0,853 $g \cdot mL^{-1}$	[154]

Composición ingrediente activo

La composición del ingrediente activo viene dada por:

$$\text{Composición \% } p/p = \frac{\text{Composición}}{\text{Densidad}}$$

$$\text{Composición} = 83,23 \% p/v = 832,3 \left[\frac{g}{L} \right]$$

$$\text{Densidad} = 0,853 \left[\frac{g}{mL} \right] \cdot \frac{1.000 [mL]}{1 [L]} = 853 \left[\frac{g}{L} \right]$$

$$\text{Composición} = \frac{832,3 \left[\frac{g}{L} \right]}{853 \left[\frac{g}{L} \right]} = 0,9757 \left[\frac{g}{g} \right]$$

$$\text{Composición \% } p/p = 97,57 \% p/p$$

B.2.2. Herbicida

El herbicida utilizado en este trabajo es Roundup® el cual su compuesto activo es glifosato. Los detalles de este compuesto se presentan en la Tabla B.4.

Tabla B.4: Datos Roundup®.

Dato	Valor	Referencia
Nombre comercial	Roundup ®	[155]
Uso	Herbicida	[155]
Composición	Glifosato 48 % p/v	[155]
Densidad	1,17 $g \cdot mL^{-1}$	[156]

Composición ingrediente activo

La composición del ingrediente activo viene dada por:

$$\text{Composición \% } p/p = \frac{\text{Composición}}{\text{Densidad}}$$

$$\text{Composición} = 48 \% p/v = 480 \left[\frac{g}{L} \right]$$

$$\text{Densidad} = 1,17 \left[\frac{g}{mL} \right] \cdot \frac{1.000 [mL]}{1 [L]} = 1.170 \left[\frac{g}{L} \right]$$

$$\text{Composición} = \frac{480 \left[\frac{g}{L} \right]}{1.170 \left[\frac{g}{L} \right]} = 0,4102 \left[\frac{g}{g} \right]$$

$$\text{Composición \% } p/p = 41,02 \% p/p$$

B.3. Preparación microorganismos de montaña (MM) [157]

Los microorganismos de montaña (MM) son hongos, bacterias, micorrizas, entre otros microorganismos benéficos que se encuentra en el suelo de montañas, bosques, lugares donde no se han utilizado agroquímicos en los últimos 3 años. Estos cuentan con tres etapas de elaboración, en la primera se recolectan los MM; luego se prepara el MM sólido (MMS) donde se hace crecer y se conserva el MM; en la tercera etapa es donde se prepara el MM líquido (MML) que sirve para aplicarlo a los cultivos.

B.3.1. Recolección de MM

Se recomienda escoger una zona cercana a donde se utilizaran para asegurar una mayor efectividad al estar los MM adecuados a la materia orgánica, temperatura y humedad.

Para ello se aparta una capa de hojas de la superficie y se toma la hojarasca en descomposición y se coloca en bolsas o saco, es ahí donde están los microorganismos.

B.3.2. MM sólido (MMS)

Siguiendo lo declarado en la Guía Técnica (2016), lo requerido para preparar los MMS es: Los pasos a seguir consisten en:

- Limpiar y desmenuzar los microorganismos de montaña recolectados manualmente o usando un mazo.
- Agregar la harina de maíz a los MM mezclando con la pala hasta tener una mezcla homogénea.
- Diluir la melaza con el agua e incorporar a la mezcla utilizando una regadera.

Tabla B.5: Insumos para la elaboración de MMS

Insumos	Valor	Unidad
Microorganismos de montaña	300,00	kg
Agua	20,00	L
Melaza	7,57	L
Harina de maíz	200,00	kg
Barril 200 L	1	Cantidad
Pala	1	Cantidad
Regadera	1	Cantidad
Mazo de madera	1	Cantidad

- Colocar la mezcla en el barril haciendo capas de 15 cm compactando cada capa usando el mazo de madera. Se debe dejar un espacio de 10 cm vacío entre la tapa y el material compactado.
- Cerrar y sellar el barril con un aro metálico, hule o plástico. Se debe dejar en reposo entre 15 y 20 días en un lugar fresco y a la sombra.

B.3.3. MM líquido (MML)

Teniendo los MMS, se procede a preparar los MML que serán los que se utilizarán para aplicar los MM al campo. Los insumos que se necesitan se presentan en la Tabla B.6.

Tabla B.6: Insumos para la elaboración de MML

Insumos	Valor	Unidad
MM sólido	5,44	kg
Agua	180,00	L
Melaza	3,75	L
Barril 200 L	1	Cantidad
Saco	1	Cantidad

Los pasos a seguir para su preparación son:

- Colocar los MMS dentro del saco.
- Mezclar el agua con la melaza dentro del barril hasta tener una mezcla uniforme.
- Sumergir el saco de MMS en la mezcla.
- Cerrar y sellar el barril. Dejarlo en lugar fresco a la sombra.

Para el palto, se considera una dosis de 130,18 litros por hectárea al año para una planta joven, es decir, al año 1.

Anexo C

Potencial de calentamiento global

C.1. Uso agrícola

El uso de productos y técnicas agrícolas produce emisiones a la atmósfera. En esta sección se presentan las emisiones relacionadas al uso de urea y del tractor en el predio.

Como ejemplo de cálculo se presentan las emisiones de CO_2eq del año 1 para el caso convencional.

■ Aplicación de urea

La aplicación de urea tiene un factor de emisión de 0,73 kg CO_2 por kg de urea aplicada, por lo tanto:

$$CO_2eq = 0,73 \left[\frac{kg CO_2}{kg urea} \right] \cdot 204,42 \left[\frac{kg urea}{(ha \cdot año)} \right] \cdot 1,00 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CO_2} \right] = 149,23 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot año} \right]$$

En términos de unidad funcional:

$$CO_2eq = \frac{149,23 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot año} \right]}{11.000,00 \left[\frac{kg palta}{ha \cdot año} \right]} = 1,36 \cdot 10^{-2} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg palta} \right]$$

■ Uso tractor

El factor de emisión para el diésel es de CO_2 es de 74.100,00 kg CO_2 /TJ, donde TJ es la capacidad calorífica del combustible, que tiene un valor de $3,66 \cdot 10^{-5}$ TJ/litro. En el año analizado el tractor trabajó 9,2 horas. El rendimiento del tractor es de 6,1 litro/hora, entonces:

$$\text{Combustible} = 9,2 \left[\frac{hora}{ha \cdot año} \right] \cdot 6,1 \left[\frac{litro}{hora} \right] = 56,12 \left[\frac{litro}{ha \cdot año} \right]$$

Luego, para conocer las emisiones se procede como sigue:

$$3,66 \cdot 10^{-5} \left[\frac{TJ}{litro} \right] \cdot 56,12 \left[\frac{litro}{ha \cdot año} \right] = 205,40 \left[\frac{TJ}{ha \cdot año} \right]$$

$$CO_2 = 74.100,00 \left[\frac{kg CO_2}{TJ} \right] \cdot 205,40 \left[\frac{TJ}{ha \cdot año} \right] = 151,99 \left[\frac{kg CO_2}{ha \cdot año} \right]$$

$$CO_2eq = 151,99 \left[\frac{kg CO_2}{ha \cdot \tilde{a}no} \right] \cdot 1,00 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CO_2} \right] = 151,99 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot \tilde{a}no} \right]$$

En términos de unidad funcional:

$$CO_2eq = \frac{151,99 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot \tilde{a}no} \right]}{11.000,00 \left[\frac{kg palta}{ha \cdot \tilde{a}no} \right]} = 1,38 \cdot 10^{-2} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg palta} \right]$$

El procedimiento es análogo para los siguientes años del caso convencional, y para el caso agroecológico, al no tener uso de urea el procedimiento solo es válido para el caso del uso del tractor.

C.2. Transporte

Para el cálculo del potencial de calentamiento global para el transporte, se utilizó la ecuación C.1.

$$CO_{2eq} \text{ transporte} = \text{Consumo de combustible} \cdot FE \cdot PCG \quad (C.1)$$

Donde:

- CO_{2eq} corresponde a la cantidad de dióxido de carbono equivalente, en kg.
- Consumo de combustible es el consumo de combustible, en TJ. Este dependerá del tipo de combustible, de transporte y de la distancia recorrida, según la siguiente expresión:

$$\text{Consumo combustible} = \frac{\text{Distancia} \cdot \text{Capacidad calorífica}}{\text{Rendimiento}} \quad (C.2)$$

Donde:

- Rendimiento es el rendimiento del transporte, en km recorrido por kg o litro de combustible.
- Distancia es la distancia recorrida por el transporte, en km
- Capacidad calorífica corresponde a la capacidad calorífica del combustible, en TJ por kg o litro de combustible
- FE es el factor de emisión, en kg CO_2 /TJ. Depende del tipo de combustible
- PCG es el potencial de calentamiento global, en kg CO_{2eq} /(kg GEI)

Luego, se identifican tres tipos de transporte: marítimo internacional, terrestre internacional y terrestre nacional. Para cada uno se identifica la capacidad, el rendimiento y el combustible que usan dependiendo del caso de estudio. Lo obtenido se presenta en la Tabla C.1.

Para cada tipo de combustible, se identifica la capacidad calorífica y el factor de emisión, este se presenta en la Tabla C.2.

Tabla C.1: Caracterización del tipo de transporte.

Transporte	Capacidad [ton]	Rendimiento [km/L]	Combustible
Barco	10.850,00	$2,30 \cdot 10^{-2}$	Fuelóleo
Camión Tráiler	24,00	3,34	Diesel
Camión Liviano	5,00	5,00	Diesel

Tabla C.2: Caracterización del tipo de combustible.

Combustible	Capacidad calorífica [TJ/L]	FE [kg CO ₂ /TJ]
Fuelóleo	$4,00 \cdot 10^{-5}$	77.400,00
Diesel	$3,66 \cdot 10^{-5}$	74.100,00

Para el caso convencional, los insumos agrícolas que se estudian son Urea (fertilizante), Fosfimax 40-20 (fertilizante), Glifosato (herbicida) y Winspray (pesticida); se considera además el transporte de la distribución de las paltas hacia el centro de distribución. El transporte relacionado a cada uno de estos insumos y actividades, junto con el trayecto y la distancia recorrida, se presentan en la Tabla C.3. Para el caso agroecológico se considera el transporte de los fertilizantes orgánicos y los insumos para preparar otros compuestos de índole agroecológica tal como melaza y harina de maíz, el detalle de estos transportes, junto con la distribución de las paltas, se presenta en la Tabla C.4. Se asume que cada recorrido ocurre una vez por temporada, es decir, una vez al año.

Para determinar el potencial de calentamiento global, primero se utiliza la expresión C.2 para determinar el consumo de combustible. A modo de ejemplo de cálculo se presenta el caso de Fosfimax 40-20 para el año 1 del caso convencional.

$$\text{Consumo combustible} = \frac{2,40 \left[\frac{km}{año} \right] \cdot 3,66 \cdot 10^{-5} \left[\frac{TJ}{L} \right]}{5,00 \left[\frac{km}{L} \right]} = 1,76 \cdot 10^{-5} \left[\frac{TJ}{año} \right]$$

Luego, se utiliza la expresión C.1:

$$CO_{2eq} = 1,76 \cdot 10^{-5} \left[\frac{TJ}{año} \right] \cdot 74.000,00 \left[\frac{kg CO_2}{TJ} \right] \cdot 1,00 \left[\frac{kg CO_{2eq}}{kg CO_2} \right] = 1,30 \left[\frac{kg CO_{2eq}}{año} \right]$$

Debido a que el camión transporta más cosas que las necesarias, se seguirá lo establecido por la norma ISO 14040 para la asignación de cargas que, según el Manual de Implementación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en la construcción (2012), establece:

1. Que el uso de asignaciones subdividiendo los procesos debe evitarse o minimizarse en la medida de lo posible, redefiniendo la unidad funcional (incluyendo los co-productos) o expandiendo el sistema. Esta última opción requiere disponer de los datos de un ACV del co-producto.
2. Cuando no se puede evitar la asignación, se deberá basar en criterios de causalidad física entre el producto de interés y el co-producto.
3. Si no es posible establecer criterios de causalidad, se deben escoger criterios basados en

Tabla C.3: Transporte de insumos y distribución caso Convencional.

Transporte	Desde	Hasta	Distancia [km]
Urea (Fertilizante)			
Camión Tráiler	Potchefstroom ^a	Durban ^b	674,96
Barco	Durban ^b	San Antonio ^c	10.397,28
Camión Tráiler	San Antonio ^c	Providencia	112,46
Camión Liviano	Providencia	Quillota	135,00
Fosfimax 40-20 (Fertilizante)			
Camión Liviano	Quillota	Quillota	2,40
Glifosato (Herbicida)			
Camión Liviano	Lampa	Providencia	32,00
Camión Liviano	Providencia	Quillota	135,00
Winspray (Pesticida)			
Camión Tráiler	Buenos Aires ^d	Quilicura	1.459,00
Camión Liviano	Quilicura	Providencia	19,40
Camión Liviano	Providencia	Quillota	135,00
Sistema riego			
Camión Liviano	Ñuñoa	Quillota	133,00
Distribución			
Camión Tráiler	Quillota	Propal	18,80

^a Sudáfrica

^b Puerto de Durban, Sudáfrica

^c Puerto de San Antonio, Chile

^d Argentina

el valor económico, másico, volumétrico, entre otros. de los productos y co-productos. En esta asignación, las emisiones de cada producto se determina por proporción al criterio utilizado. Este tipo de asignaciones se utiliza en el transporte de múltiples productos en un mismo medio, como camión o barco, donde las emisiones van asociadas a una característica física del producto.

Por lo tanto, siguiendo lo establecido en el punto 3, para el año 1 donde se utilizó 32,30 kg del producto por hectárea y la capacidad del camión es de 5 toneladas:

$$CO_2eq = 1,30 \left[\frac{kg \ CO_2eq}{año} \right] \cdot \frac{32,30 \left[\frac{kg}{ha \cdot año} \right]}{5.000,00 \left[\frac{kg}{año} \right]} = 0,01 \left[\frac{kg \ CO_2eq}{ha \cdot año} \right]$$

En términos de unidad funcional:

$$CO_2eq = \frac{0,01 \left[\frac{kg \ CO_2eq}{ha \cdot año} \right]}{11.000,00 \left[\frac{kg \ palta}{ha \cdot año} \right]} = 9,09 \cdot 10^{-7} \left[\frac{kg \ CO_2eq}{kg \ palta} \right]$$

Tabla C.4: Transporte de insumos y distribución caso Agroecológico.

Transporte	Desde	Hasta	Distancia [km]
N orgánico (Fertilizante)			
Camión Liviano	Providencia	Hijuelas	110,00
P orgánico (Fertilizante)			
Camión Liviano	Limache	Hijuelas	37,30
Melaza			
Camión Liviano	La Florida	Hijuelas	126,00
Harina de maíz			
Camión Liviano	Puente Alto	Hijuelas	132,00
Sistema de riego			
Camión Liviano	Ñuñoa	Hijuelas	133,00
Distribución			
Camión Tráiler	Hijuelas	Propal	15,40

De manera análoga, se obtiene la cantidad de CO_2eq producto de las emisiones de CH_4 y N_2O , considerando sus potenciales de calentamiento global, obteniendo, para este caso, una emisión total de $1,04 \cdot 10^{-6}$ kg $CO_2eq/(kg$ palta).

Para determinar las emisiones del transporte de los demás insumos tanto para el caso convencional como agroecológico, se debe proceder de la misma manera a la ilustrada en esta sección.

C.3. Producción de insumos

La producción de insumos conlleva ciertas emisiones. Los factores de emisiones de la producción de insumos se presentan en la Sección 5 del Capítulo 4 para el caso convencional y agroecológico.

A modo de ejemplo de cálculo se presenta el desarrollo para la producción de urea para el año 1 del caso convencional.

El factor de emisión de la producción de urea es de 1,85 kg CO_2 por kg de urea producida, por lo tanto, lo liberado por producir lo utilizado en el año 1 es:

$$CO_2eq = 1,85 \left[\frac{kg CO_2}{kg urea} \right] \cdot 204,42 \left[\frac{kg urea}{ha \cdot año} \right] \cdot 1,00 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CO_2} \right] = 378,18 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot año} \right]$$

En términos de unidad funcional:

$$CO_2eq = \frac{378,18 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot año} \right]}{11.000 \left[\frac{kg palta}{ha \cdot año} \right]} = 0,03 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg palta} \right]$$

El método es análogo para los demás insumos de los casos de estudio.

C.4. Emisiones de N₂O directas

Las emisiones directas de N₂O de suelos gestionados viene dada por la expresión C.3 [81].

$$N_2O_{Directa} - N = N_2O - N_{Naportes} + N_2O - N_{OS} + N_2O - N_{PRP} \quad (C.3)$$

Donde:

- $N_2O - N_{Naportes}$ son las emisiones anuales de N₂O-N producidas por aportes de N a suelos gestionados en kg N₂O-N/año
- $N_2O - N_{OS}$ son las emisiones directas anuales de N₂O-N de suelos orgánicos gestionados en kg N₂O-N/año
- $N_2O - N_{PRP}$ son las emisiones directas anuales de N₂O-N de aportes de orina y estiércol a tierras de pastoreo en kg N₂O-N/año

Debido que no hay aportes de emisiones por orina y estiércol, la expresión a utilizar es:

$$N_2O_{Directa} - N = N_2O - N_{Naportes} + N_2O - N_{OS} \quad (C.4)$$

Donde:

$$N_2O - N_{Naportes} = (F_{SN} + F_{ON}) \cdot EF_1 \quad (C.5)$$

$$N_2O - N_{OS} = F_{OS,T} \cdot EF_2 \quad (C.6)$$

Donde:

- F_{SN} es la cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintética en kg N/año
- F_{ON} es la cantidad anual de compost aplicado a los suelos en kg N/año.
- $F_{OS,T}$ es la superficie anual de suelos orgánicos gestionados/drenados pertenecientes a tierras templadas (subíndice T)
- EF_1 es el factor de emisión para emisiones de N₂O de aportes de N en kg N₂O-N/(kg aporte de N)
- EF_2 es el factor de emisiones de N₂O de suelos orgánicos drenados/gestionados en kg N₂O-N/(ha · año)

Para ambos casos de estudio, EF_1 toma el valor de 0,01 kg N₂O-N/(kg aporte de N) y EF_2 de 8,00 kg N₂O-N/(ha · año) de acuerdo a los valores por defecto reportados por el IPCC. Como ejemplo de cálculo se presenta el desarrollo para el año 1 del caso convencional.

Primero se debe terminar la cantidad de nitrógeno que aporta el fertilizante sintético en este caso urea, este tiene un 46 % de nitrógeno por lo tanto:

$$N_{urea} = 204,42 \left[\frac{kg \text{ urea}}{ha \cdot \text{año}} \right] \cdot 0,46 \left[\frac{kg N}{kg \text{ urea}} \right] = 94,03 \left[\frac{kg N}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

Luego, se aplica la ecuación C.5, donde F_{ON} es 0 debido a que en este caso no existe aplicación de compost:

$$N_2O - N_{aporte} = 94,03 \left[\frac{kg N}{ha \cdot \text{año}} \right] \cdot 0,01 \left[\frac{kg N_2O - N}{kg N} \right] = 0,94 \left[\frac{kg N_2O - N}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

Ahora, para la segunda parte de la expresión, se tiene:

$$N_2O - N_{OS} = 1,00 [ha] \cdot 8,00 \left[\frac{kg N_2O - N}{ha \cdot \text{año}} \right] = 8,00 \left[\frac{kg N_2O - N}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

Entonces, el aporte directo de N_2O es:

$$N_2O_{Directa} - N = (0,94 + 8,00) \left[\frac{kg N_2O - N}{ha \cdot \text{año}} \right] = 8,94 \left[\frac{kg N_2O - N}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

Para convertir el valor en CO_2eq se debe utilizar primero la conversión de N_2O-N a N_2O que corresponde a:

$$N_2O = N_2O - N \cdot \frac{44}{28}$$

Luego, usando el potencial de calentamiento global del N_2O igual a 298,00 $kg CO_2eq/(kg N_2O)$, entonces:

$$CO_2eq = 8,94 \left[\frac{kg N_2O - N}{ha \cdot \text{año}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[\frac{kg N_2O}{kg N_2O - N} \right] \cdot 298,00 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg N_2O} \right] = 4.186,47 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

Finalmente, en términos de unidad funcional:

$$CO_2eq = \frac{4.186,47 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot \text{año}} \right]}{11.000,00 \left[\frac{kg palta}{ha \cdot \text{año}} \right]} = 0,38 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg palta} \right]$$

El procedimiento es análogo para los siguientes años y para el caso agroecológico haciendo los cambios correspondientes a la ecuación presentada.

C.5. Emisiones de N_2O indirectas

Las emisiones indirectas de N_2O de suelos gestionados ocurren por dos vías: i) por la volatilización de NH_3 y NO_x de los suelos gestionados; y ii) por la lixiviación y escurrimiento de N de los suelos gestionados [81]. Las ecuaciones para calcular ambas vías se presentan a continuación.

C.5.1. Volatilización

Las emisiones indirectas de N₂O producto de la volatilización de N, se estiman de acuerdo a la ecuación C.7.

$$N_2O_{(ATD)} - N = [(F_{SN} \cdot Frac_{GASF}) + F_{ON} \cdot Frac_{GASM}] \cdot EF_4 \quad (C.7)$$

Donde:

- F_{SN} es la cantidad anual de N de fertilizante sintético aplicado a los suelos en kg N/año
- $Frac_{GASF}$ es la fracción de N de fertilizantes sintéticos que se volatiliza como NH₃ y NO_x en kg N volatilizado/(kg de N aplicado)
- F_{ON} es la cantidad anual de compost aplicada a los suelos en kg N/año
- $Frac_{GASM}$ es la fracción de materiales fertilizantes de N orgánico (F_{ON}) que volatiliza como NH₃ y NO_x en kg N volatilizado/(kg de N aplicado o depositado)
- EF_4 es el factor de emisión correspondiente a las emisiones de N₂O de la deposición atmosférica de N en los suelos y en las superficies del agua en kg N₂O-N/(kg NH₃-N + NO_x-N volatilizado)

El valor que toma $Frac_{GASF}$ y EF_4 para ambos casos es de 0,10 kg N volatilizado/(kg de N aplicado) y 0,01 kg N-N₂O/(kg NH₃-N + NO_x-N volatilizado), respectivamente [81]. En el caso agroecológico la fracción $Frac_{GASM}$ toma el valor de 0,20 kg N volatilizado/(kg de N aplicado o depositado) [81].

A modo de ejemplo de cálculo se muestra el año 1 para el caso convencional. Como se vio en el cálculo de N₂O directo, la cantidad de nitrógeno aportado por urea el primer año es de 94,03 kg N por hectárea al año, entonces aplicando la expresión C.7:

$$N_2O_{(ATD)} - N = 94,03 \left[\frac{kg N}{ha \cdot año} \right] \cdot 0,10 \left[\frac{kg N_{vol}}{kg N} \right] \cdot 0,01 \left[\frac{kg N_2O - N}{kg N_{vol}} \right] = 0,09 \left[\frac{kg N_2O - N}{ha \cdot año} \right]$$

De manera análoga a lo expuesto en la sección de emisión directa de N₂O, se transforma el resultado a CO₂eq obteniendo 4,00·10⁻³ kg CO₂eq/(kg palta).

C.5.2. Lixiviación/Escurrimiento

Las emisiones de N₂O producto de la lixiviación y el escurrimiento viene dada por la expresión C.8.

$$N_2O_{(L)} = (F_{SN} + F_{ON}) \cdot Frac_{lix} \cdot EF_5 \quad (C.8)$$

Donde:

- F_{SN} es la cantidad anual de N de fertilizante sintético aplicado a los suelos en kg N/año
- F_{ON} es la cantidad anual de compost aplicada a los suelos en kg N/año
- $Frac_{lix}$ es la fracción de todo el N agregado en suelos gestionados en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento en kg N/(kg de agregados de N)

- EF_5 es el factor de emisión para emisiones de N_2O por lixiviación y escurrimiento de N en $kg\ N_2O-N/(kg\ N\ por\ lixiviación\ y\ escurrimiento)$

Para ambos casos, los valores de $Frac_{lix}$ y EF_5 son iguales a $0,30\ kg\ N / (kg\ de\ agregados\ de\ N)$ y $7,50 \cdot 10^{-3}\ kg\ N_2O-N/(kg\ N)$, respectivamente [81].

A modo de ejemplo de ejemplo de cálculo se muestra el año 1 para el caso convencional. Como se vio en el cálculo de N_2O directo, la cantidad de nitrógeno aportado por urea el primer año es de $94,03\ kgN$ por hectárea al año, entonces aplicando la expresión C.8 teniendo en cuenta que F_{ON} es 0 debido a que no se aplica compost en este caso:

$$N_{2O(L)-N} = 94,03 \left[\frac{kg\ N}{ha \cdot año} \right] \cdot 0,30 \left[\frac{kg\ N}{kg\ N} \right] \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \left[\frac{kg\ N_2O - N}{kg\ N} \right] = 0,21 \left[\frac{kg\ N_2O - N}{ha \cdot año} \right]$$

De manera análoga a lo expuesto en la sección de emisión directa de N_2O , se transforma el resultado a CO_2eq obteniendo $9,01 \cdot 10^{-3}\ kg\ CO_2eq/(kg\ palta)$.

C.6. Cambio en las existencias de carbono

El análisis para el cambio de C se realizará en dos periodos, el primero a revisar es “Tierras convertidas a tierras de cultivo” donde el cambio de uso de suelo es de forestal a cultivo en la etapa de plantación; luego, el segundo es “Tierras de cultivo permanecen como tal” que comprenderá las etapas de crecimiento y mantención. La metodología utilizada en esa sección se rige por el Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra de las directrices del IPCC [81].

C.6.1. Tierras convertidas a tierras de cultivo

Los cambios en uso de tierra conllevan cuantificar el cambio de C en la **Biomasa**, **Materia orgánica muerta** y **Carbono del suelo**. Las emisiones de GEI no CO_2 serán evaluadas en la Sección C.7. Las principales diferencias entre los casos a estudiar son:

- Convencional: Se despeja todo el terreno, quemando lo retirado.
- Agroecológico: Se mantienen especies nativas como Peumo y no existe quema del material retirado.

Bajo estas consideraciones se destaca que el cálculo para los cambios de C establecidos son iguales en cada caso diferenciándose en la quema (ver Sección C.7).

C.6.1.1. Biomasa

La ecuación que describe el cambio de C en la biomasa viene dado por:

$$\Delta C_B = \Delta C_G + \Delta C_{Conversión} - \Delta C_L \quad (C.9)$$

Donde:

- ΔC_B es el cambio anual de existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas, en ton C/año

- ΔC_G es el incremento anual en las existencias de carbono de la biomasa debido a crecimiento en tierras convertidas, en ton C/año
- $\Delta C_{Conversión}$ es el cambio inicial en las existencias de carbono de las biomasa en tierras convertidas, en ton C/año
- ΔC_L es la reducción en las existencias de carbono de la biomasa debido a pérdidas por cosechas, recogida de madera combustible y perturbaciones en tierras convertidas, en ton C/año

Luego, se procede a calcular los componentes de la expresión C.9. El cálculo de ΔC_G está dado por la expresión:

$$\Delta C_G = G_{Total} \cdot CF \quad (C.10)$$

Donde:

- G_{Total} es el crecimiento anual de la biomasa, en ton d.m.^e/(ha · año)
- CF es la fracción de carbono de materia seca, en ton C/ton d.m.

El término G_{Total} viene dado por:

$$G_{Total} = G_W \cdot (1 + R) \quad (C.11)$$

Donde:

- G_W es el promedio de crecimiento anual de la biomasa aérea, en ton d.m./ha · año)
- R es la relación entre la biomasa subterránea y la aérea, en ton d.m. de biomasa subterránea/(ton d.m. de biomasa aérea)

De acuerdo con las directrices del IPCC para un bosque continental templado el valor de G_W es de 4,00 ton d.m./ha · año), mientras que para una biomasa aérea de hoja ancha en clima templado para un bosque con una biomasa entre 75 y 120 ton d.m./ha (B_{antes}) el valor de R es 0,23 ton d.m. de biomasa subterránea/(ton d.m. de biomasa aérea). Luego:

$$G_{Total} = 4,00 \left[\frac{\text{ton d.m.}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right] \cdot (1 + 0,23) \left[\frac{\text{ton d.m. biom.sub}}{\text{ton d.m. biom.aérea}} \right] = 4,92 \left[\frac{\text{ton d.m.}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

Ahora, utilizando la ecuación C.10 y el valor de CF para clima templado determinado por el IPCC de 0,47 ton C/(ton d.m.) se determina ΔC_G .

$$\Delta C_G = 4,92 \left[\frac{\text{ton d.m.}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right] \cdot 0,47 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ton d.m.}} \right] = 2,31 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

Obtenido ΔC_G , se procede a calcular $\Delta C_{Conversión}$ siguiendo la expresión:

$$\Delta C_{Conversión} = \frac{(B_{Después} - B_{Antes})}{T} \cdot CF \quad (C.12)$$

Donde:

^e d.m.: Materia muerta, del ingles *dead matter*

- $B_{Después}$ son las existencias de biomasa inmediatamente después de la conversión, en ton d.m./ha
- B_{Antes} son las existencias de biomasa antes de la conversión, en ton d.m./ha
- T es el tiempo de la conversión, en años
- CF es la fracción de carbono de materia seca, en ton C/(ton d.m.)

Siguiendo el supuesto del Nivel 1 del IPCC, se establece que $B_{Después}$ es 0 debido a que se retira toda la vegetación; mientras que para un bosque natural en un clima continental templado el valor de B_{Antes} 120 ton d.m./ha, entonces:

$$\Delta C_{Conversión} = \frac{(0 - 120) \left[\frac{\text{ton d.m.}}{\text{ha}} \right]}{1 [\text{año}]} \cdot 0,47 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ton d.m.}} \right] = -56,40 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

Con respecto ΔC_L se asume que todas las perturbaciones quedan contabilizadas dentro del parámetro $\Delta C_{Conversión}$, por lo que el término queda anulado. Luego el cambio anual de existencias de carbono en biomasa viene dado por:

$$\Delta C_B = (2,31 + (-56,40)) \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right] = -54,09 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

Se destaca que cuando el valor es negativo, significa que hay pérdidas de las existencias, es decir, son liberadas al ambiente. Para convertir las existencias de C en CO_2 se utiliza la relación de los pesos moleculares, es decir 44/12:

$$\Delta C_B = -54,09 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right] \cdot \frac{44 [\text{ton } CO_2]}{12 [\text{ton C}]} = -198,33 \left[\frac{\text{ton } CO_2}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

Para el caso agroecológico, el valor de $B_{despues}$ corresponde a 80,73 ton d.m./ha, debido a que no se elimina todo el bosque nativo si no solo lo correspondiente a matorral, preservando cerca del 70 % de estas [158] [159]. Los demás valores y pasos son análogos al caso convencional.

C.6.1.2. Materia orgánica muerta

El cambio de existencia de C en la materia orgánica muerta (DOM del inglés “dead organic matter”) viene dada por la ecuación

$$\Delta C_{DOM} = \frac{C_n - C_0}{T_{0n}} \quad (C.13)$$

Donde:

- C_0 son las existencias de madera muerta/hojarasca de la categoría anterior de uso de tierra, en ton C/ha
- C_n son las existencias de madera muerta/hojarasca de la nueva categoría de uso de suelo, en ton C/ha

- T_{0n} corresponde al lapso en el que se produce la transición de la vieja a la nueva categoría de uso de tierra, en año

Debido a que se asume que se elimina toda la madera muerta y la hojarasca durante la conversión en el Nivel 1, C_n es 0. El valor de C_0 es 20,3 ton C/ha que corresponde al valor de la hojarasca acumulada en un clima templado cálido seco para una vegetación perenne acicular. Se asume que solo existe hojarasca pues no existen datos que evidencien la cantidad de materia muerta disponible. El lapso de tiempo, T_{0n} , a evaluar corresponde a 1 año. Luego:

$$\Delta C_{DOM} = \frac{(0 - 20,3) \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha}} \right]}{1 \text{ año}} = -20,3 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

De manera análoga con el cambio de C en biomasa, se transforma el valor en CO₂ obteniendo -74,43 ton CO₂/(ha · año).

C.6.1.3. Carbono del suelo

El suelo en análisis se toma como orgánico por tener un porcentaje superior al 12% de materia orgánica [160] según estudios realizados en Ensenada Los Tilos [161], por lo que la ecuación que cuantifica este cambio viene dada por:

$$\Delta C_{Suelos} = -L_{Orgánicos} \quad (C.14)$$

Debido a la conversión, existe una pérdida de C ($L_{Orgánicos}$), que viene dada por:

$$L_{Orgánicos} = EF \quad (C.15)$$

Donde:

- EF es el factor de emisión para el tipo de clima, en ton C/(ha · año)

Para el clima templado cálido, según lo declarado por el IPCC, su valor corresponde a 10 ton C/(ha · año). Luego:

$$\Delta C_{Suelos} = -10 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

De manera análoga a las secciones anteriores, se obtiene un valor de -36,6 ton CO₂/(ha · año).

C.6.2. Tierras de cultivo permanecen como tal

Al igual que en el caso de “Tierras convertidas en tierras de cultivo”, la cuantificación de las existencias viene dada por el cambio en la **Biomasa**, **Materia orgánica muerta** y **Carbono del suelo**. Como esta categoría se extiende por los 8 años de estudio, se mostrará como ejemplo de cálculo lo que ocurre en el año 8, donde el árbol es adulto. Los cambios a los años anteriores responden a la proporción de riego, presentadas en la Sección B.1.

C.6.2.1. Biomasa

Debido a que no hay pérdidas por conversión de tierras, la ecuación C.9 pasa a ser:

$$\Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L \quad (C.16)$$

Donde:

- ΔC_B es el cambio anual de existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas, en ton C/año
- ΔC_G es el incremento anual en las existencias de carbono de la biomasa debido a crecimiento en tierras convertidas, en ton C/año
- ΔC_L es la reducción en las existencias de carbono de la biomasa debido a pérdidas por cosechas, recogida de madera combustible y perturbaciones en tierras convertidas, en ton C/año

Entonces, siguiendo la ecuación C.10 para calcular ΔC_G se utiliza el valor reportado por Mota, Alcaraz-López, Martínez-Ballesta y col. (2010) para la tasa de crecimiento que es de 12,50 g/(m²·d), es decir, 45,63 ton d.m./(ha · año). Luego:

$$\Delta C_G = 45,63 \left[\frac{\text{ton d.m.}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right] \cdot 0,47 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ton d.m.}} \right] = 21,45 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

La reducción de existencias por pérdidas de biomasa (ΔC_L) viene dada por:

$$\Delta C_L = L_{\text{remoción-bosques}} + L_{\text{madera-combustible}} + L_{\text{perturbación}} \quad (\text{C.17})$$

Donde:

- $L_{\text{remoción-bosques}}$ son las pérdidas anuales de carbono debido a remoción de bosques, en ton C/año
- $L_{\text{madera-combustible}}$ son las pérdidas anuales de carbono en la biomasa debido a remoción de madera combustible, en ton C/año
- $L_{\text{perturbación}}$ son las pérdidas anuales de carbono en la biomasa debido a perturbaciones, en ton C/año

Se asume que no hay pérdidas por remoción de bosques pues no se remueven especímenes, y que no hay pérdidas por perturbaciones pues no son posibles de cuantificar. Entonces, las pérdidas por madera combustible está dada por:

$$L_{\text{madera-combustible}} = [FG_{\text{árboles}} \cdot BCEF_R \cdot (1 + R) + FG_{\text{parte}} \cdot D] \cdot CF \quad (\text{C.18})$$

Donde:

- $FG_{\text{árboles}}$ es el volumen anual de remoción de madera combustible de árboles enteros, en m³/año
- FG_{parte} es el volumen anual de remoción de madera combustible como parte de árboles, en m³/año
- R es la relación entre la biomasa subterránea y la aérea, en ton d.m. de biomasa subterránea/(ton d.m. de biomasa aérea)
- CF es la fracción de carbono de materia seca, en ton C/(ton d.m.)

- D es la densidad básica de la madera, en ton d.m./m³
- $BCEF_R$ es el factor de conversión y expansión de biomasa para la conversión de remociones en volumen venable a remociones totales de biomasa (incluida la corteza), en toneladas de remoción de biomasa/(m³ de remociones)

Como se asume que no hay pérdidas de árboles, el valor de $FG_{\text{árboles}}$ es 0. Las pérdidas de existencia por parte de árboles viene dado por la poda, por lo que solo está presente en la etapa de mantenimiento. Por lo que el valor de $FG_{\text{parte}} \cdot D$ corresponde a la poda, en el año 8 sería 19,46 ton d.m./(ha · año). Entonces:

$$L_{\text{madera-combustible}} = 19,46 \left[\frac{\text{ton d.m.}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right] \cdot 0,47 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ton d.m.}} \right] = 9,15 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

Entonces, reemplazando en la ecuación C.17 se tiene:

$$\Delta C_L = 9,15 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

Finalmente, utilizando la ecuación C.16 se obtiene el cambio de C en la biomasa:

$$\Delta C_B = (21,45 - 9,15) \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right] = 12,30 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

De manera análoga a lo mostrado en la Sección C.6.1, se obtiene un cambio de 45,10 ton CO₂/(ha · año).

C.6.2.2. Materia orgánica muerta

El cálculo de la pérdida de materia orgánica muerta se divide entre madera muerta y hojarasca, y se realiza por el método de diferencia de existencias, que se muestra a continuación:

$$\Delta C_{DOM} = \frac{DOM_{t_2} - DOM_{t_1}}{T} \cdot CF \quad (C.19)$$

Donde:

- DOM_{t_1} son las existencias de madera muerta/hojarasca en el momento t_1 , en ton d.m./ha
- DOM_{t_2} son las existencias de madera muerta/hojarasca en el momento t_2 , en ton d.m./ha
- $T = (t_2 - t_1)$ es el lapso transcurrido entre las estimaciones, en año
- CF es la fracción de carbono de materia seca, en ton C/(ton d.m.)

En el caso convencional solo se contabiliza la hojarasca pues la madera retirada por poda se quema; mientras que en el caso agroecológico se contabiliza la hojarasca y la madera muerta que queda luego de ser chipeada. A continuación se muestra como ejemplo de cálculo el caso convencional, para el agroecológico se procede de manera análoga.

A raíz de una entrevista a un agricultor de paltas, ver Anexo A, se determinó que una superficie de 25x25 cm se tienen 685 g, por lo que en 1 hectárea, suponiendo que cubre un 80 % de la superficie se obtiene finalmente 730 kg/ha (0,73 ton d.m./ha) para el año 8 que corresponde a DOM_{t1} .

La tasa de descomposición de la hojarasca es de 30 % al año [162] (para la madera muerta es de 10 % al año [163]) por lo que DOM_{t2} es 0,51 ton d.m./ha.

La fracción de carbono para la hojarasca es de 0,37 ton C/(ton d.m.) (y para la madera muerta es de 0,50 ton C/(ton d.m.)). Entonces, usando la ecuación C.19 se tiene:

$$\Delta C_{DOM} = \frac{(0,51 - 0,73) \left[\frac{\text{ton d.m.}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]}{1 [\text{año}]} \cdot 0,37 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ton d.m.}} \right] = -0,08 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

De manera análoga a las secciones anteriores, el cambio de C de la materia orgánica muerta es de -0,29 ton CO₂/(ha · año).

C.6.2.3. Carbono del suelo

El carbono en el suelo se calcula de manera análoga a la de la Sección C.6.1. El IPCC describe esta categoría como el cambio de carbono del suelo producto de la intensidad de la gestión del cultivo, el manejo de fertilizantes y la elección del cultivo. Los valores por defecto del IPCC para los suelos orgánicos representan la pérdida de C de suelos drenados producto del manejo de estos (arado, cosechas donde se elimina la especie plantada, por nombrar algunos), por lo tanto para esta sección donde la tierra de cultivo perenne permanece como tal se utilizará el valor reportado por la FAO [103] donde la absorción del suelo para el año 8 del cultivo convencional es de 1,80 ton C/(ha · año), valor ajustado al reportado de 3,10 ton C/(ha · año) que se asumió que corresponde a una densidad de árboles igual a la del caso agroecológico (480 árboles/ha). Para los años anteriores se utilizó la proporción de riego, ligada a la etapa de crecimiento del árbol, para obtener la tasa de absorción de C.

Con esto en consideración, se tiene para el caso convencional en el año 8, lo siguiente:

$$\Delta C_{Suelos} = 1,80 \left[\frac{\text{ton C}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

De manera análoga a las otras secciones el valor en CO₂ es de 6,60 ton CO₂/(ha · año).

Para el caso agroecológico se considera el aporte de la interacción con árboles nativos donde la cantidad de materia orgánica en el suelo es 30 % mayor a la del monocultivo de paltos [161], por lo que el valor de cambio de C en el suelo para el año 8 corresponde a 4,06 ton C/(ha · año). Los pasos para determinar los demás valores es análogo al caso convencional.

C.7. Quema de residuos agrícolas

La quema de residuos agrícolas solo está presente en el caso convencional, en las etapas de plantación, con la quema de residuos del pespeje del terreno, y en el crecimiento, con la poda. Los factores de emisión correspondientes a esta sección se presentan en la Sección

5.1.3. Como ejemplo de cálculo, se presentará el desarrollo para el año 0 (plantación) y el año 8 del caso convencional.

En el año 0, la ecuación para determinar el impacto provocado por la quema del cambio de suelo, se presenta a continuación:

$$L_{fuego} = M_B \cdot Cf \cdot G_{ef} \cdot PCG \quad (C.20)$$

Donde:

- M_B es la masa de combustible disponible para la combustión, en kg/(ha · año)
- Cf es el factor de combustión, sin dimensiones
- G_{ef} es el factor de emisión, en kg/(kg de materia seca quemada)
- PCG es el potencial de calentamiento global del GEI, en kg CO₂eq/(kg GEI)

De las directrices del IPCC se desprende que para bosques en zonas templadas, la tala y quema tiene un valor de $M_B \cdot Cf$ de 48,4 ton/(ha · año), que corresponde a 48.400,00 kg/(ha · año), por lo tanto, para el caso del GEI CH₄ se tiene:

$$L_{fuego} = 48.400,00 \left[\frac{kg}{ha \cdot año} \right] \cdot 2,04 \cdot 10^{-3} \left[\frac{kg CH_4}{kg} \right] \cdot 25 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CH_4} \right] = 2.468,40 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot año} \right]$$

En términos de unidad funcional:

$$L_{fuego} = \frac{2468,40 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot año} \right]}{11.000 \left[\frac{kg palta}{ha \cdot año} \right]} = 0,22 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg palta} \right]$$

De manera análoga se procede con lo demás GEI.

Para el caso del año 8, M_B corresponde a la masa podada y Cf vale 0,45 según las directrices del IPCC para un bosque en clima templado, se destaca que se corrige el valor de la poda con la relación peso seco/peso húmedo de 0,5. Entonces, usando la ecuación C.20 para el CH₄ se tiene:

$$M_B = 19.460,00 \left[\frac{kg húmedo}{ha \cdot año} \right] \cdot 0,5 \left[\frac{kg seco}{kg húmedo} \right] = 9.730,00 \left[\frac{kg seco}{ha \cdot año} \right]$$

$$L_{fuego} = 9.730,00 \left[\frac{kg seco}{ha \cdot año} \right] \cdot 0,45 \cdot 2,04 \cdot 10^{-3} \left[\frac{kg CH_4}{kg} \right] \cdot 25 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg CH_4} \right] = 307,66 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot año} \right]$$

En términos de unidad funcional:

$$L_{fuego} = \frac{307,66 \left[\frac{kg CO_2eq}{ha \cdot año} \right]}{11.000 \left[\frac{kg palta}{ha \cdot año} \right]} = 2,80 \cdot 10^{-2} \left[\frac{kg CO_2eq}{kg palta} \right]$$

Se procede de manera análoga para lo demás GEI y para el resto de los años.

C.8. Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas C.5 y C.6 para el caso convencional y agroecológico, respectivamente.

Tabla C.5: Resultados del potencial de calentamiento global por etapas para el caso convencional. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

Etapas	[kgCO ₂ eq/kg palta]				
	P	Cr	M	Co	D
Urea	0,00	0,51	1,76	0,00	0,00
Fosfimax®	0,00	5,70·10 ⁻³	1,97·10 ⁻²	0,00	0,00
Winspray®	0,00	1,64·10 ⁻³	3,13·10 ⁻³	0,00	0,00
Roundup®	0,00	0,54	0,61	0,00	0,00
Transporte	9,30·10 ⁻⁵	5,93·10 ⁻²	0,12	0,00	1,52·10 ⁻³
Maquinaria	4,51·10 ⁻²	6,00·10 ⁻²	6,61·10 ⁻²	1,04	0,00
Electricidad	0,00	0,24	0,89	0,00	0,00
Emisión N ₂ O	0,00	1,92	3,31	0,00	0,00
Quema	6,98	0,00	2,78	0,00	0,00
Total	7,03	3,33	9,59	1,04	1,52·10⁻³
Δ C	28,13	-6,62	-5,35	0,00	0,00
Total Δ C	35,16	-3,29	4,24	1,04	1,52·10⁻³

Tabla C.6: Resultados del potencial de calentamiento global por etapas para el caso agroecológico. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

Etapas	[kgCO ₂ eq/kg palta]				
	P	Cr	M	Co	D
Compost	0,00	1,20	0,96	0,00	0,00
Fert. N orgánico	0,00	1,40·10 ⁻⁵	9,00·10 ⁻⁵	0,00	0,00
Fert. P orgánico	0,00	0,00	5,50·10 ⁻²	0,00	0,00
Melaza	0,00	6,67·10 ⁻⁴	1,09·10 ⁻³	0,00	0,00
Harina de maíz	0,00	7,49·10 ⁻³	0,00	0,00	0,00
Transporte	6,80·10 ⁻⁵	0,24	0,31	0,00	1,24·10 ⁻³
Maquinaria	0,55	6,00·10 ⁻²	0,61	1,32	0,00
Electricidad	0,00	0,20	0,75	0,00	0,00
Emisión N ₂ O	0,00	1,46	2,34	0,00	0,00
Total	0,56	2,89	4,93	1,32	1,24·10⁻³
Δ C	11,35	-10,12	-7,63	0,00	0,00
Total Δ C	11,91	-7,22	-2,69	1,32	1,24·10⁻³

Anexo D

Uso de agua

D.1. Huella Azul y Huella Verde

Para determinar la huella azul y verde, se debe conocer el requerimiento hídrico de la plantación y la precipitación efectiva de la zona [84]. El requerimiento hídrico o evapotranspiración se determina según la expresión D.1.

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (D.1)$$

Donde:

- ET_c es la evapotranspiración del cultivo, en mm/ha
- ET_0 es la evapotranspiración de referencia, en mm/ha
- K_c es el coeficiente de cultivo, que depende de cada cultivo, sin dimensiones

La evapotranspiración de referencia (ET_0) es, según Fundación Chile (2016), un parámetro relacionado con el clima que denota la capacidad que tiene la atmósfera para evaporar el agua presente en el suelo.

Para los casos de estudio, se tomaron los valores reportados por Santibañez et. al. (2015) donde se reportan valores anuales de evapotranspiración de referencia anuales para Quillota y La Calera (tomado como referencia para Hijuelas debido a su cercanía geográfica). Como estos valores son anuales referentes al año de estudio, se procedió a variarlos aleatoriamente de manera que cada año del estudio este valor rondara al reportado.

Por otro lado, el valor del coeficiente de cultivo (K_c) fue descrito en el Manual del Palto (2017) en relación a la fase de cultivo, los valores tomados para el estudio se presentan en la Tabla D.1.

Ahora, la precipitación efectiva (P_{pef}) corresponde a la precipitación que es infiltrada en el suelo [84], esta está dada por la expresión D.2.

$$P_{pef} = P_p \cdot \text{Factor de corrección} \quad (D.2)$$

Donde:

Tabla D.1: Fase del cultivo y coeficiente del cultivo del palto (K_c).

Fase del cultivo	K_c referencia	K_c tomado
Establecimiento inicio	0,6-0,7	0,6
Desarrollo del cultivo	0,6-0,7	0,7
Media estación	0,8-0,9	0,8
Inicio madurez	0,8-0,9	0,9
Madurez fisiológica	0,6-0,7	0,7

- P_{pef} es la precipitación efectiva, en mm/año
- P_p es la precipitación, en mm/año
- Factor de corrección depende de las ET_c mensuales según:
 - ET_c menor a 3: Factor de corrección igual a 0,65
 - ET_c entre 3 y 5: Factor de corrección igual a 0,76
 - ET_c entre 5 y 7: Factor de corrección igual a 0,90
 - ET_c mayor a 7: Factor de corrección igual a 0,98

Los valores de P_p son reportados para la región de Valparaíso y se tomará como válido para ambos casos de estudio [109]. Con respecto al valor mensual de ET_c , fue estimado utilizando el Visualizador de Mapa Evapotranspiración de Referencia implementado por la Universidad de Talca [164] obteniendo valores menores a 3 para ambos casos, por lo que el Factor de corrección para la expresión D.2 toma el valor de 0,65.

Los valores utilizados de ET_0 y P_p para cada caso se presentan en la Tabla D.2.

Tabla D.2: Valores de ET_0 y P_p utilizados en el estudio.

Parámetro	Valor	Valor [mm/año]	Referencia
ET_0	Quillota	1.129,00	[108]
ET_0	Calera	1.173,00	[108]
P_p	Valparaíso	462,00	[109]

Luego, la huella azul y la huella verde se determinan dependiendo del requerimiento hídrico de la plantación y de las precipitaciones de la zona, donde la huella azul viene dada por la expresión D.3 [84] que representa el requerimiento hídrico no satisfecho por las precipitaciones y la Huella Verde por la expresión D.4 [84] que representa el aporte de las precipitaciones al requerimiento hídrico [84].

$$HH_{Azul} = \text{Max}(0, ET_c - P_{pef}) \quad (\text{D.3})$$

$$HH_{Verde} = \text{Min}(ET_c, P_{pef}) \quad (\text{D.4})$$

Estas expresiones toman el supuesto que el requerimiento hídrico es totalmente cubierto por la precipitaciones más el riego, sin embargo, este supuesto no considera uso de agua para

la aplicación de agroquímicos y no refleja la fluctuación de la precipitación ni el requerimiento periódico de agua de un cultivo, por lo que en esta ocasión se tomará como válida la expresión D.4 mientras que la expresión D.3 será reemplazada por la expresión D.5 que contempla el agua utilizada para el riego y las aplicaciones extras como de agroquímicos.

$$HH_{Azul} = \text{Riego} + \text{Aplicaciones} \quad (\text{D.5})$$

Luego, se presenta un ejemplo de cálculo para la obtención de los valores de ET_c y P_{pef} para el año 1 del caso convencional.

$$ET_c = 1.131,42 \left[\frac{mm}{año} \right] \cdot 0,60 = 679,45 \left[\frac{mm}{año} \right]$$

$$P_{pef} = 460,60 \left[\frac{mm}{año} \right] \cdot 0,65 = 299,39 \left[\frac{mm}{año} \right]$$

En las Tablas D.3 y D.4 se presentan los valores obtenidos de ET_c y P_{pef} para el caso convencional en los años que comprenden el crecimiento y mantención del palto, respectivamente. Para el caso agroecológico, se presentan en las Tablas D.5 y D.6 para el crecimiento y mantención, respectivamente.

Tabla D.3: Valores de ET_c y P_{pef} para la etapa de crecimiento del caso convencional.

Parámetro	Unidad	Valor			
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
ET_0	mm/año	1.132,42	1.181,06	1.153,15	1.206,33
K_c	-	0,60	0,70	0,70	0,70
ET_c	mm/año	679,45	826,74	807,21	844,43
P_p	mm/año	460,60	440,70	452,12	430,36
Factor de corrección	-	0,65	0,65	0,65	0,65
P_{pef}	mm/año	299,39	286,46	293,88	279,73

Tabla D.4: Valores de ET_c y P_{pef} para la etapa de mantención del caso convencional.

Parámetro	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
ET_0	mm/año	1.139,23	1.169,89	1.214,00	1.204,58
K_c	-	0,80	0,90	0,90	0,70
ET_c	mm/año	911,38	1.052,90	1.092,60	843,21
P_p	mm/año	457,81	445,27	427,22	431,07
Factor de corrección	-	0,65	0,65	0,65	0,65
P_{pef}	mm/año	297,58	289,43	277,69	280,20

Tabla D.5: Valores de ET_c y P_{pef} para la etapa de crecimiento del caso agroecológico.

Parámetro	Unidad	Valor			
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
ET_0	mm/año	1.169,44	1.118,91	1.147,91	1.092,66
K_c	-	0,60	0,70	0,70	0,70
ET_c	mm/año	701,66	783,24	803,54	764,86
P_p	mm/año	460,60	440,70	452,12	430,36
Factor de corrección	-	0,65	0,65	0,65	0,65
P_{pef}	mm/año	299,39	286,46	293,88	279,73

Tabla D.6: Valores de ET_c y P_{pef} para la etapa de mantención del caso agroecológico.

Parámetro	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
ET_0	mm/año	1.162,37	1.130,51	1.084,69	1.094,47
K_c	-	0,80	0,90	0,90	0,70
ET_c	mm/año	929,90	1.017,46	976,22	766,13
P_p	mm/año	457,81	445,27	427,22	431,07
Factor de corrección	-	0,65	0,65	0,65	0,65
P_{pef}	mm/año	297,58	289,43	277,69	280,20

Para el cálculo de la huella hídrica verde se utiliza la expresión D.4, como ejemplo de cálculo se presenta el desarrollo para el año 1 del caso convencional en términos de la unidad funcional.

$$HH_{Verde} = \text{Min}(679, 45; 299, 39) = 299, 39 \left[\frac{mm}{año} \right]$$

$$HH_{Verde} = 299, 39 \left[\frac{mm}{año} \right] \cdot \frac{10 \left[\frac{m^3}{ha} \right]}{1 [mm]} = 2.993, 90 \left[\frac{m^3}{ha \cdot año} \right]$$

$$HH_{Verde} = \frac{2.993, 90 \left[\frac{m^3}{ha \cdot año} \right]}{11.000, 00 \left[\frac{kg\ palta}{ha \cdot año} \right]} = 0, 27 \left[\frac{m^3}{kg\ palta} \right]$$

Para el cálculo de la Huella Hídrica Azul se utilizan los datos de riego presentados en Capítulo 4. Para calcular las aplicaciones se considera los detalles de aplicación de cada compuesto, para el caso de los agroquímicos en el caso convencional, el herbicida (Roundup®) y el pesticida (Winspray®) son aquellos que se disuelven y se aplican de manera manual, los fertilizantes como urea y fósforo (Fosfimax®) se aplican por fertirriego, por lo que no se considera un gasto extra de agua en su aplicación.

La dosis para el herbicida es de 2 litros por 100 litros de agua, mientras que para el

pesticida es de 7 mililitros por un litro de agua. Luego la cantidad de agua requerida se calcula como se muestra a continuación para el caso del pesticida para el año 2 del caso convencional.

$$\text{Aplicación agua} = \text{Fracción agua} \cdot \text{Aplicación total}$$

Fracción herbicida:

$$\text{Fracción herbicida} = \frac{2 [L]}{100 [L]} = 0,02$$

Fracción agua:

$$\text{Fracción agua} = 1 - 0,02 = 0,98$$

Luego:

$$\text{Aplicación agua} = 0,98 \cdot 6.129,51 \left[\frac{L}{ha \cdot \text{año}} \right] = 6.006,92 \left[\frac{L}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

$$\text{Aplicación agua} = 6.006,92 \left[\frac{L}{ha \cdot \text{año}} \right] \cdot \frac{1,00 [m^3]}{1.000,00 [L]} = 6,01 \left[\frac{m^3}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

Entonces, para el año 2 del caso convencional, la Huella Hídrica Azul viene dada por:

$$HH_{Azul} = 3.840,00 \left[\frac{m^3}{ha \cdot \text{año}} \right] + 6,01 \left[\frac{m^3}{ha \cdot \text{año}} \right] + 0,22 \left[\frac{m^3}{ha \cdot \text{año}} \right] = 3.846,23 \left[\frac{m^3}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

El resultado obtenido debe ser transformado en término de unidad funcional, es decir, en kg de palta, por lo tanto se procede por dividir el resultado obtenido en el rendimiento del caso convencional:

$$HH_{Azul} = \frac{3.846,23 \left[\frac{m^3}{ha \cdot \text{año}} \right]}{11.000,00 \left[\frac{kg \text{ palta}}{ha \cdot \text{año}} \right]} = 0,35 \left[\frac{m^3}{kg \text{ palta}} \right]$$

Procediendo de manera análoga, se obtienen los valores de Huella Hídrica Verde y Azul para las etapas de crecimiento y mantenimiento del caso convencional, los cuales se presentan en las Tablas D.7 y D.8, respectivamente.

Tabla D.7: Valores de Huella Hídrica Verde y Azul para la etapa de crecimiento del caso convencional.

Parámetro	Valor			
	[m ³ /kg palta]			
	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
HH_{Verde}	0,27	0,26	0,27	0,25
HH_{Azul}	0,17	0,35	0,35	0,35

Tabla D.8: Valores de Huella Hídrica Verde y Azul para la etapa de mantención del caso convencional.

Parámetro	Valor			
	[m ³ /kg palta]			
	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
HH_{Verde}	0,27	0,26	0,25	0,25
HH_{Azul}	0,52	0,70	0,70	0,87

Para el caso agroecológico, las aplicaciones vienen asociadas al agua utilizada para preparar los microorganismos de montaña (MM), el cual cuenta de dos etapas: la preparación de MM sólido y la preparación de MM líquido. La primera etapa se realiza una sola vez y durante el año 1, luego cada año solo se hace la etapa dos. Las características de cada etapa se encuentran detalladas en el Anexo B.3. Por lo tanto, para el año 1 del caso agroecológico se tiene:

$$HH_{Azul} = 1.592,80 \left[\frac{m^3}{ha \cdot año} \right] + 0,15 \left[\frac{m^3}{ha \cdot año} \right] = 1.592,95 \left[\frac{m^3}{ha \cdot año} \right]$$

$$HH_{Azul} = \frac{1.592,95 \left[\frac{m^3}{ha \cdot año} \right]}{15.000,00 \left[\frac{kg \text{ palta}}{ha \cdot año} \right]} = 0,11 \left[\frac{m^3}{kg \text{ palta}} \right]$$

Como en el caso convencional, se procede de manera análoga y se obtienen los valores de huella hídrica verde y azul para las etapas de crecimiento y mantención del caso agroecológico, los cuales se presentan en las Tablas D.9 y D.10, respectivamente.

Tabla D.9: Valores de Huella Hídrica Verde y Azul para la etapa de crecimiento del caso agroecológico por hectárea al año.

Parámetro	Valor			
	[m ³ /kg palta]			
	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
HH_{Verde}	0,20	0,19	0,20	0,19
HH_{Azul}	0,11	0,21	0,21	0,21

Tabla D.10: Valores de Huella Hídrica Verde y Azul para la etapa de mantención del caso agroecológico por hectárea al año.

Parámetro	Valor			
	[m ³ /kg palta]			
	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
HH_{Verde}	0,20	0,19	0,19	0,19
HH_{Azul}	0,32	0,42	0,42	0,53

D.2. Huella Hídrica Gris

Para determinar la huella hídrica gris, se hace uso de la expresión simplificada presentada por María Jesús (2012) siguiendo las directrices de Fundación Chile (2016), obteniendo la ecuación D.6.

$$HH_{Gris} = \frac{\alpha \cdot AR}{C_{m\acute{a}x}} \quad (D.6)$$

Donde:

- α es la fracción de lixiviación, sin dimensiones
- AR es la aplicación de productos químicos, en kg/ha
- $C_{m\acute{a}x}$ es la concentración máxima aceptable de contaminantes, en kg/m^{-3}

A modo de ejemplo de cálculo, se presenta el desarrollo para el uso de Urea en el año 1 del caso convencional en términos de unidad funcional:

$$HH_{Gris} = \frac{0,10 \cdot 204,42 \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]}{1,50 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} = 13.628,00 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]$$

$$HH_{Gris} = \frac{13.628,00 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]}{11.000,00 \left[\frac{\text{kg palta}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \right]} = 1,24 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg palta}} \right]$$

Entonces, para el caso convencional en la Tabla D.11 se presentan los resultados por etapas.

Tabla D.11: Valores de Huella Hídrica Gris para el caso convencional. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

Parámetro	Valor				
	[m ³ /kg palta]				
	P	Cr	M	Co	D
Urea	0,00	6,02	20,97	0,00	0,00
Fósforo	0,00	1,38	4,77	0,00	0,00
Winspray®	0,00	3,64 · 10 ⁻⁵	1,09 · 10 ⁻⁵	0,00	0,00
Roundup®	0,00	0,39	0,43	0,00	0,00
<i>HH_{Gris}</i>	0,00	7,79	26,21	0,00	0,00

En relación al caso agroecológico, los resultados de la huella gris se presentan en la Tabla D.12. Se destaca que el rendimiento de este caso es de 15.000 kg de palta por hectárea al año.

Tabla D.12: Valores de Huella Hídrica Gris para el caso agroecológico. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

Parámetro	Valor				
	[m ³ /kg palta]				
	P	Cr	M	Co	D
Compost N	0,00	1,10	0,88	0,00	0,00
Compost P	0,00	1,19	0,96	0,00	0,00
Fert. N orgánico	0,00	0,90	5,53	0,00	0,00
Fert. P orgánico	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00
<i>HH_{Gris}</i>	0,00	3,18	7,85	0,00	0,00

D.3. Huella Hídrica Indirecta

La Huella Hídrica Indirecta se calcula siguiendo la expresión D.7 [166].

$$HH_{Indirecta} = \sum(C_p \cdot HH_{prod}) \quad (D.7)$$

Donde:

- C_p es la cantidad de productos consumidos, en unidad/tiempo
- HH_{prod} es la Huella Hídrica equivalente del producto, en volumen/unidad

Se utilizan los datos presentados en la sección 6.1.3 del capítulo 4. Se presenta el desarrollo para el año 1 del uso de urea para el caso convencional en términos de unidad funcional a modo de ejemplo de cálculo.

$$HH_{Indirecta} = 204,42 \left[\frac{kg}{ha \cdot año} \right] \cdot 0,18 \left[\frac{m^3}{kg} \right] = 36,80 \left[\frac{m^3}{ha \cdot año} \right]$$

$$HH_{Indirecta} = \frac{36,80 \left[\frac{m^3}{ha \cdot año} \right]}{11.000,00 \left[\frac{kg \text{ palta}}{ha \cdot año} \right]} = 3,35 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m^3}{kg \text{ palta}} \right]$$

De manera análoga se realiza para los demás insumos. Se presenta en las Tablas D.13 los resultados de la Huella Hídrica Indirecta para las etapas del caso convencional.

Tabla D.13: Valores de Huella Hídrica Indirecta para el caso convencional.
 Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D:
 Distribución.

Parámetro	Valor [m ³ /kg palta]				
	P	Cr	M	Co	D
Material riego	$2,31 \cdot 10^{-2}$	0,00	0,00	0,00	0,00
Urea	0,00	0,04	0,12	0,00	0,00
Fosfimax®	0,00	$6,81 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	0,00	0,00
Winspray®	0,00	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$3,45 \cdot 10^{-5}$	0,00	0,00
Roundup®	0,00	$8,61 \cdot 10^{-3}$	$9,76 \cdot 10^{-3}$	0,00	0,00
Transporte	$9,09 \cdot 10^{-7}$	$3,17 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	0,00	$1,40 \cdot 10^{-5}$
Maquinaria	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$6,05 \cdot 10^{-4}$	$6,66 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	0,00
Electricidad	0,00	$9,11 \cdot 10^{-3}$	$3,39 \cdot 10^{-2}$	0,00	0,00
<i>HH</i> _{Indirecta}	$2,35 \cdot 10^{-2}$	0,05	0,17	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$

Para el caso agroecológico, los resultados se presentan en la Tabla D.14, donde el rendimiento es de 15.000 kg de palta al año por hectárea.

Tabla D.14: Valores de Huella Hídrica Indirecta para el caso agroecológico.
 Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D:
 Distribución.

Parámetro	Valor [m ³ /kg palta]				
	P	Cr	M	Co	D
Material riego	$1,69 \cdot 10^{-2}$	0,00	0,00	0,00	0,00
Compost	0,00	$1,83 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	0,00	0,00
Fert. N orgánico	0,00	$5,80 \cdot 10^{-7}$	$3,55 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,00
Fert. P orgánico	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00
Melaza	0,00	$2,97 \cdot 10^{-4}$	$4,86 \cdot 10^{-4}$	0,00	0,00
Harina de maíz	0,00	$4,07 \cdot 10^{-2}$	0,00	0,00	0,00
Transporte	$6,67 \cdot 10^{-7}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	0,00	$1,20 \cdot 10^{-5}$
Maquinaria	$5,56 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$6,20 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$	0,00
Electricidad	0,00	$7,69 \cdot 10^{-3}$	$2,86 \cdot 10^{-2}$	0,00	0,00
<i>HH</i> _{Indirecta}	$2,25 \cdot 10^{-2}$	0,05	0,15	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$

Anexo E

Eutrofización Acuática

Para el cálculo de la eutrofización acuática se consideran los factores de emisión detallados en la Tabla 7.1. Para el caso del transporte la metodología es análoga a lo detallado en la categoría de impacto de Potencial de calentamiento global. Para ejemplificar el cálculo de la eutrofización, se presenta el caso de la aplicación de urea para el año 1 del caso convencional.

La cantidad de nitrógeno presente en la urea es el 46 % p/p:

$$C_N = 204,42 \left[\frac{kg \text{ urea}}{ha \cdot \text{año}} \right] \cdot 0,46 \left[\frac{kg \text{ N}}{kg \text{ urea}} \right] = 94,03 \left[\frac{kg \text{ N}}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

Luego, la eutrofización del uso de urea en términos de unidad funcional está dada por:

$$EP = 94,03 \left[\frac{kg \text{ N}}{ha \cdot \text{año}} \right] \cdot 0,17 \left[\frac{kg \text{ NH}_3}{kg \text{ N}} \right] \cdot 0,35 \left[\frac{kg \text{ PO}_4^{3-} \text{ eq}}{kg \text{ NH}_3} \right] = 5,59 \left[\frac{kg \text{ PO}_4^{3-} \text{ eq}}{ha \cdot \text{año}} \right]$$

$$EP = \frac{5,59 \left[\frac{kg \text{ PO}_4^{3-} \text{ eq}}{ha \cdot \text{año}} \right]}{11.000,00 \left[\frac{kg \text{ palta}}{ha \cdot \text{año}} \right]} = 5,08 \cdot 10^{-4} \left[\frac{kg \text{ PO}_4^{3-} \text{ eq}}{kg \text{ palta}} \right]$$

Realizando el cálculo de manera análoga para las demás etapas y los otros casos, se obtienen los resultados presentados en las Tablas F.2 y E.2 para el caso convencional y el caso agroecológico, respectivamente.

Tabla E.1: Valores de Eutrofización acuática del caso convencional. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

Parámetro	Valor				
	[kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]				
	P	Cr	M	Co	D
Urea	0,00	5,37·10 ⁻³	1,66·10 ⁻⁴	0,00	0,00
Fosfimax®	0,00	1,87·10 ⁻²	5,76·10 ⁻⁴	0,00	0,00
Eut. acuática	0,00	5,54·10⁻³	1,93·10⁻²	0,00	0,00

Tabla E.2: Valores de Eutrofización acuática del caso agroecológico. Donde P: Plantación, Cr: Crecimiento, M: Mantenimiento, Co: Cosecha, D: Distribución.

Parámetro	Valor				
	[kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]				
	P	Cr	M	Co	D
Compost N	0,00	1,88·10 ⁻³	1,50·10 ⁻³	0,00	0,00
Compost P	0,00	1,43·10 ⁻⁴	1,15·10 ⁻⁴	0,00	0,00
Fert. N orgánico	0,00	5,67·10 ⁻⁵	3,49·10 ⁻⁴	0,00	0,00
Fert. P orgánico	0,00	0,00	5,87·10 ⁻⁵	0,00	0,00
Eut. acuática	0,00	2,08·10⁻³	2,03·10⁻³	0,00	0,00

Anexo F

Normalización

La normalización es un paso no obligatorio dentro del ACV pero sirve para apoyar la etapa de interpretación. Esta se rige siguiendo la ecuación F.1.

$$Norm = \sum_i I_i \cdot F_{norm} \quad (F.1)$$

Donde:

- I_i es el impacto de la categoría de impacto i , donde i corresponde a potencial de calentamiento global, uso de agua y eutrofización acuática, en unidad impacto/kg palta.
- F_{norm} es el factor de normalización para los ecosistemas de agua fresca según la metodología ReCiPe que se presentan a continuación:

Tabla F.1: Factores de normalización para el ecosistemas de agua fresca según ReCiPe 2016 v1.1 [143].

Ítem	Factor	
	Valor	Unidad
Potencial de calentamiento global	$6,82 \cdot 10^{-13}$	especies·año/kg CO ₂ eq
Uso de agua	$6,04 \cdot 10^{-13}$	especies·año/m ³ agua
Eutrofización acuática	$6,17 \cdot 10^{-7}$	especies·año/kg Peq

Como ejemplo de cálculo se presenta el caso convencional. Los cálculos para el caso agroecológico, los escenarios a sensibilizar y el caso de estudio, son análogos.

Se destaca que los resultados de la normalización son sin considerar el impacto considerando el cambio de las existencias de carbono, esto debido a que resulta más evidente contabilizar el impacto solo considerando las emisiones al medio ambiente, sin perjuicio de lo anterior, cabe aclarar que el cambio en los resultados al considerar el cambio de carbono significa menos del 1% de los presentados.

El resultado de la plantación para el caso convencional corresponde a 7,03 kg CO₂eq/kg

de palta, entonces siguiendo la expresión F.1:

$$Norm = 7,03 \left[\frac{kg CO_2eq}{kg palta} \right] \cdot 6,82 \cdot 10^{-13} \left[\frac{especies \cdot año}{kg CO_2eq} \right] = 4,79 \cdot 10^{-12} \left[\frac{especies \cdot año}{kg palta} \right]$$

De manera análoga se realiza para los otros impactos obteniendo un resultado final para la plantación de $4,81 \cdot 10^{-12}$ especies·año/kg palta y para el caso convencional de $5,10 \cdot 10^{-9}$ especies·año/kg palta como se observa en la Tabla F.2.

Tabla F.2: Valores de Eutrofización acuática del caso convencional y agroecológico.

Etapa	Valor [especies·año/kg palta]	
	Convencional	Agroecológico
Plantación	$4,81 \cdot 10^{-12}$	$3,94 \cdot 10^{-13}$
Crecimiento	$1,14 \cdot 10^{-9}$	$4,28 \cdot 10^{-10}$
Mantenimiento	$3,95 \cdot 10^{-9}$	$4,22 \cdot 10^{-10}$
Cosecha	$7,16 \cdot 10^{-13}$	$9,08 \cdot 10^{-13}$
Distribución	$1,04 \cdot 10^{-15}$	$8,52 \cdot 10^{-16}$
Normalización	$5,10 \cdot 10^{-9}$	$8,52 \cdot 10^{-10}$

Los resultados también fueron analizados por actividad. La representación de cada categoría por actividad en los resultados totales normalizados se presentan en las Figuras F.1 y F.2 para el caso convencional y agroecológico, respectivamente. El cálculo realizado es análogo al presentado en esta sección.

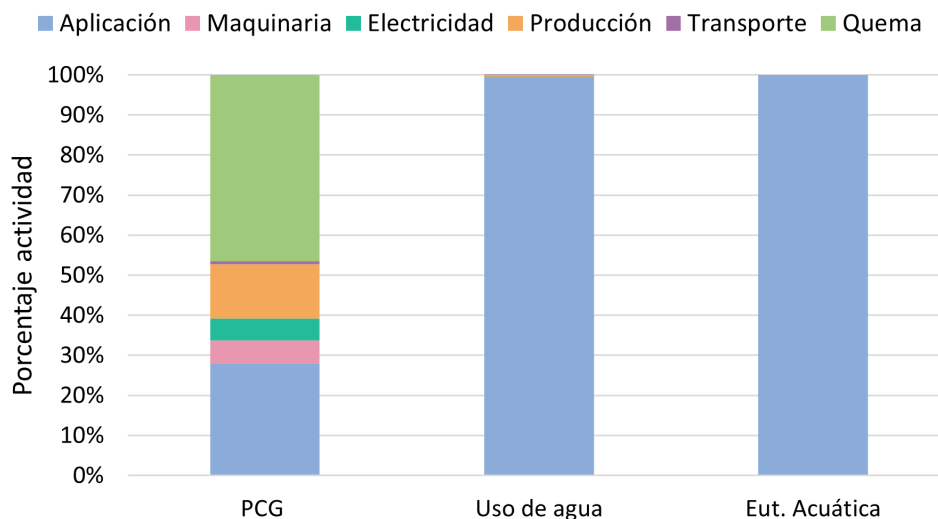


Figura F.1: Desglose del impacto normalizado por categoría de impacto y actividad para el caso convencional.

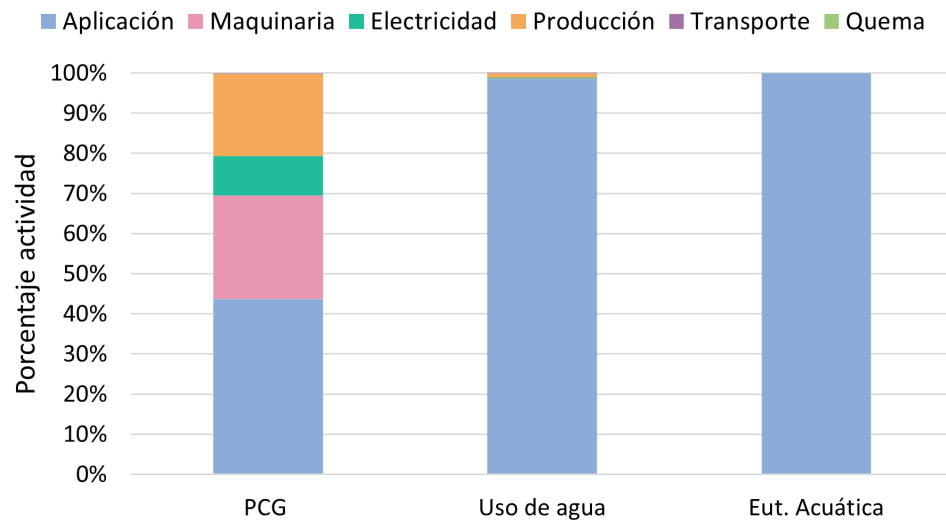


Figura F.2: Desglose del impacto normalizado por categoría de impacto y actividad para el caso agroecológico.

Anexo G

Análisis de sensibilidad: Técnicas agrícolas

Para el análisis de sensibilidad se sensibilizan 4 técnicas que se detallan a continuación:

- **Medida 1: Fertilizantes**

Cambio en los fertilizantes sintéticos por fertilizantes agroecológicos, es decir, cambio de urea y fertilizante P sintético por compost, fertilizante N orgánico y fertilizante P orgánico. Este cambio implica un cambio en el nutriente disponible para ser lixiviado por el aporte de materia orgánica del compost [90][145].

- **Medida 2: Gestión residuos**

Cambio en la gestión de residuos, reemplazo de la quema por la trituración de los residuos producto de la plantación y la poda. La trituración de los residuos de la poda son incorporados al suelo lo que conlleva a una disminución en el riego (pues la cubierta vegetal retiene la humedad) [134] y en el uso de herbicida (la cubierta vegetal impide el crecimiento de maleza) [146][147].

- **Medida 3: Riego**

Cambio del sistema de riego por microaspersión a riego por goteo. Lo que lleva a una disminución en el uso de agua, en la electricidad [129][130] y en la pérdida de nutrientes por escorrentía [148].

- **Medida 4: Bosque nativo**

Cambio en la preservación del bosque nativo, se retira solo la cantidad de árboles necesarios para permitir el cultivo de patos. La interacción con el bosque nativo conlleva a que los nutrientes sean mejor aprovechados quedando menos disponible para lixiviar [149].

Para cada técnica a sensibilizar se realizan los mismos cálculos presentados en los Anexos C, D y E para las categorías de impacto Potencial de Calentamiento Global, Uso de Agua y Eutrofización Acuática, respectivamente; considerando los cambios que se detallan en las siguientes secciones.

G.1. M1: Fertilizantes

El cambio en los datos se refleja en las entradas de los fertilizantes en las etapas de crecimiento y mantenimiento, quedando como se muestran en las Tablas G.1 y G.2 de las etapas correspondientes.

Tabla G.1: Datos caso convencional etapa crecimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Compost	kg	10.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Fertilizante N orgánico	kg	0,00	0,00	105,94	549,50
Fertilizante P orgánico	kg	0,00	0,00	0,00	0,00
Winspray®	kg	0,94	1,34	1,74	2,00
Roundup®	kg	0,00	143,44	143,44	143,44
Uso tractor	h	9,20	9,60	10,00	10,40
Riego	m ³	1.920,00	3.840,00	3.840,00	3.840,00
Agua aplicaciones	m ³	0,16	6,23	6,30	6,34
Electricidad	kWh	739,63	898,12	1.056,61	1.320,77
Poda	kg	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla G.2: Datos caso convencional etapa mantenimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Compost	kg	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Fertilizante N orgánico	kg	1.152,94	1.756,38	2.391,81	2.391,81
Fertilizante P orgánico	kg	0,00	0,00	13,33	13,33
Winspray®	kg	2,41	2,68	3,08	3,34
Roundup®	kg	143,44	114,75	114,75	114,75
Uso tractor	h	10,90	10,30	10,80	11,20
Riego	m ³	5.760,00	7.680,00	7.680,00	9.600,00
Agua aplicaciones	m ³	6,41	5,25	5,32	5,36
Electricidad	kWh	1.743,41	2.641,54	5.283,07	5.283,07
Poda	kg	11.676,00	15.568,00	15.568,00	19.460,00

Los cambios en los fertilizantes se reflejan en el transporte y producción de insumos, y en la lixiviación de nutrientes. Los cálculos en esta categoría son análogos a los realizados en el caso agroecológico. En la Tabla G.3 se presentan los resultados para la medida 1 por etapa.

Tabla G.3: Resultados por categoría de impacto y etapa para la medida 1 de cambio de fertilizantes.

Etapa	PCG	Uso de agua	Eut. acuática
	[kgCO ₂ eq/kg palta]	[m ³ agua/kg palta]	[kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]
Plantación	7,03	2,35·10 ⁻²	0,00
Crecimiento	3,86	6,50	2,78·10 ⁻³
Mantenimiento	7,71	10,86	2,44·10 ⁻³
Cosecha	1,04	1,05·10 ⁻²	0,00
Distribución	1,52·10 ⁻³	1,40·10 ⁻⁵	0,00
Total	19,64	17,39	0,01

G.2. M2: Gestión de residuos

El cambio de la quema por el chipeado se refleja en la etapa de plantación al no quemar los restos producidos por el despeje del terreno; y en la etapa de mantenimiento al chipear y transformar en capa vegetal (*mulch*) los restos de poda. Al incluir esta materia orgánica al suelo, cambian las existencias de carbono en relación al caso convencional. Además, la inclusión de la poda como *mulch* conlleva a una disminución del riego en un 15 % [134] y del uso de herbicida a un 10 % [167], pues la cubierta vegetal impide que crezca maleza, por lo tanto el requerimiento de este insumo disminuye y, por ende, el de agua de aplicaciones. Con esto, los cambios se reflejan en la etapa de mantenimiento, que se presentan en la Tabla G.4.

Tabla G.4: Datos caso convencional etapa mantenimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Urea	kg	1.345,52	1.765,3	2.207,32	2.207,32
Fosfimax®40-20	kg	211,28	278,00	347,50	347,50
Winspray®	kg	2,41	2,68	3,08	3,34
Roundup®	kg	14,34	11,48	11,48	11,48
Uso tractor	h	10,90	10,30	10,80	11,20
Riego	m ³	4.896,00	6.528,00	6.528,00	8.160,00
Agua aplicaciones	m ³	1,00	0,93	0,99	1,04
Electricidad	kWh	1.743,41	2.641,54	5.283,07	5.283,07
Poda	kg	11.676,00	15.568,00	15.568,00	19.460,00
Chipeado	L	350,28	467,04	467,04	583,30

Los resultados obtenidos para esta medida se presentan en la Tabla G.5.

Tabla G.5: Resultados por categoría de impacto y etapa para la medida 2 de cambio de gestión de residuos.

Etapa	PCG [kgCO ₂ eq/kg palta]	Uso de agua [m ³ agua/kg palta]	Eut. acuática [kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]
Plantación	5,32·10 ⁻²	2,35·10 ⁻²	0,00
Crecimiento	3,33	10,11	3,99·10 ⁻³
Mantenimiento	6,87	29,39	1,39·10 ⁻²
Cosecha	1,04	1,05·10 ⁻²	0,00
Distribución	1,52·10 ⁻³	1,40·10 ⁻⁵	0,00
Total	11,29	39,53	0,02

G.3. M3: Riego

Se cambia el riego por microaspersión a uno por goteo, donde cambia el agua requerida y la electricidad usada [129][130], reflejando el cambio en las etapas de crecimiento y mantenimiento quedando como se presenta en las Tablas G.6 y G.7, respectivamente.

Tabla G.6: Datos caso convencional etapa crecimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Urea	kg	197,38	419,78	617,16	925,74
Fosfimax®40-20	kg	30,58	66,72	97,30	147,34
Winspray®	kg	0,94	1,34	1,74	2,00
Roundup®	kg	0,00	143,44	143,44	143,44
Uso tractor	h	9,20	9,60	10,00	10,40
Riego	m ³	922,50	1.844,99	1.844,99	1.844,99
Agua aplicaciones	m ³	0,16	6,23	6,30	6,34
Electricidad	kWh	739,63	898,12	1.056,61	1.320,77
Poda	kg	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla G.7: Datos caso convencional etapa mantenimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Urea	kg	1.345,52	1.765,30	2.207,37	2.207,32
Fosfimax®40-20	kg	211,28	278,00	347,50	347,50
Winspray®	kg	2,41	2,68	3,08	3,34
Roundup®	kg	143,44	114,75	114,75	114,75
Uso tractor	h	10,90	10,30	10,80	11,20
Riego	m ³	2.767,49	3.689,98	3.689,98	4.612,48
Agua aplicaciones	m ³	6,41	5,25	5,32	5,36
Electricidad	kWh	1.743,41	2.641,54	5.283,07	5.283,07
Poda	kg	11.676,00	15.568,00	15.568,00	19.460,00

Los resultados obtenidos para esta medida se presentan en la Tabla G.8.

Tabla G.8: Resultados por categoría de impacto y etapa para la medida 3 de cambio de sistema de riego.

Etapa	PCG	Uso de agua	Eut. acuática
	[kgCO ₂ eq/kg palta]	[m ³ agua/kg palta]	[kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]
Plantación	7,03	$2,35 \cdot 10^{-2}$	0,00
Crecimiento	3,25	9,48	$5,54 \cdot 10^{-3}$
Mantenimiento	9,29	28,75	$1,93 \cdot 10^{-2}$
Cosecha	1,04	$1,05 \cdot 10^{-2}$	0,00
Distribución	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$	0,00
Total	20,61	38,26	0,02

G.4. M4: Bosque nativo

La preservación del bosque nativo se refleja en el cambio de las existencias de carbono en las etapas de plantación al no eliminar todo el bosque nativo presente en la zona; y en las etapas de crecimiento y mantenimiento al existir absorción de CO₂ por parte del bosque nativo.

Los cálculos son análogos a los presentados para el caso agroecológico presentados en el Anexo C. Los resultados obtenidos para este escenario se presentan en la Tabla G.9.

Tabla G.9: Resultados por categoría de impacto y etapa para la medida 4 de preservación de bosque nativo.

Etapa	PCG [kgCO ₂ eq/kg palta]	Uso de agua [m ³ agua/kg palta]	Eut. acuática [kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]
Plantación	2,33	2,35·10 ⁻²	0,00
Crecimiento	3,33	7,11	2,85·10 ⁻³
Mantenimiento	9,59	19,72	9,94·10 ⁻³
Cosecha	1,04	1,05·10 ⁻²	0,00
Distribución	1,52·10 ⁻³	1,40·10 ⁻⁵	0,00
Total	16,29	26,86	0,02

G.5. Normalización

La normalización de esta sección se calcula de la misma forma que la presentada en el Anexo F. Los resultados para la sensibilización se presentan en la Tabla G.10.

Tabla G.10: Resultados normalizados para las medidas sensibilizados.

Etapa	[especie·año/kg palta]			
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4
Plantación	4,81·10 ⁻¹²	5,05·10 ⁻¹⁴	4,81·10 ⁻¹²	1,60·10 ⁻¹²
Crecimiento	5,72·10 ⁻¹⁰	8,21·10 ⁻¹⁰	1,14·10 ⁻⁰⁹	5,88·10 ⁻¹⁰
Mantenimiento	5,09·10 ⁻¹⁰	2,85·10 ⁻⁰⁹	3,95·10 ⁻⁰⁹	2,04·10 ⁻⁰⁹
Cosecha	7,16·10 ⁻¹³	7,16·10 ⁻¹³	7,16·10 ⁻¹³	7,16·10 ⁻¹³
Distribución	1,04·10 ⁻¹⁵	1,04·10 ⁻¹⁵	1,04·10 ⁻¹⁵	1,04·10 ⁻¹⁵
Total	1,09·10⁻⁰⁹	3,67·10⁻⁰⁹	5,10·10⁻⁰⁹	2,63·10⁻⁰⁹

Anexo H

Análisis de sensibilidad: Rendimientos y densidades de plantación

Se evalúan cuatro escenarios en donde se varia el rendimiento y densidad de plantación. Se construye un escenario para el caso convencional y uno para el caso agroecológico que se proceden a describir a continuación:

- **Escenario 1: R1D1**

Cambio en el rendimiento del caso convencional a 18 ton/ha contemplando un cambio a una plantación intensiva (1,25 x 1,25 m) con una densidad 6.400 plantas/ha. Este escenario referencia a las prácticas de plantación actualmente llevadas a cabo en Chile [150].

- **Escenario 2: R2D2**

Cambio en el rendimiento del caso agroecológico a 8,87 ton/ha con cambio en la densidad a 360 plantas/ha según los resultados reportados por un estudio en California, Estados Unidos [151].

Para cada técnica a sensibilizar se realizan los mismos cálculos presentados en los Anexos C, D y E para las categorías de impacto Potencial de Calentamiento Global, Uso de Agua y Eutrofización Acuática, respectivamente; considerando los cambios detallados.

H.1. E1: R1D1

Implementando el cambio en el rendimiento y densidad, se obtienen los resultados presentados en la Tabla H.1. El cambio en el rendimiento y densidad afectan los recursos utilizados y el impacto por kg de palta reportado.

Tabla H.1: Resultados por categoría de impacto y etapa para el escenario 1 de cambio de rendimiento y densidad del caso convencional.

Etapa	PCG [kgCO ₂ eq/kg palta]	Uso de agua [m ³ agua/kg palta]	Eut. acuática [kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]
Plantación	4,30	1,44·10 ⁻²	0,00
Crecimiento	24,35	94,69	6,28·10 ⁻²
Mantenimiento	104,79	313,85	2,19·10 ⁻¹
Cosecha	14,66	1,48·10 ⁻¹	0,00
Distribución	9,28·10 ⁻⁴	9,00·10 ⁻⁶	0,00
Total	12,84	408,70	0,28

H.2. E2: R2D2

Los resultados obtenidos del cambio en el rendimiento y densidad del caso agroecológico se presentan en la Tabla H.2. El cambio en la densidad provoca cambios en la cantidad de recursos que se requiere por hectárea.

Tabla H.2: Resultados por categoría de impacto y etapa para el escenario 2 de cambio de rendimiento y densidad del caso agroecológico.

Etapa	PCG [kgCO ₂ eq/kg palta]	Uso de agua [m ³ agua/kg palta]	Eut. acuática [kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]
Plantación	0,95	3,83·10 ⁻²	0,00
Crecimiento	4,86	7,80	3,52·10 ⁻³
Mantenimiento	7,63	17,07	3,28·10 ⁻³
Cosecha	2,25	2,27·10 ⁻²	0,00
Distribución	2,11·10 ⁻³	2,10·10 ⁻⁵	0,00
Total	16,53	24,93	6,80·10⁻³

Anexo I

Caso de Estudio: Ensenada Los Tilos

Para el caso de estudio de Ensenada los Tilos, los datos utilizados son los presentados a continuación donde en la Tabla I.1 se presentan los datos correspondientes a la etapa de plantación.

Tabla I.1: Datos caso de estudio etapa plantación.

Labor/insumo	Unidad	Valor
		Año 0
Uso tractor	h	180,00
Material riego	m	1.080,00

En las Tablas I.2 y I.3 se presentan los datos de las etapas de crecimiento y mantenimiento, respectivamente. Se destaca el uso de fertilizante sintético y agroquímicos, así como el riego por goteo.

Tabla I.2: Datos caso de estudio etapa crecimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Urea	kg	342,80	723,69	1.066,48	1.599,73
Fosfimax®40-20	kg	54,17	114,36	168,54	252,81
Winspray®	kg	1,62	2,31	3,00	3,46
Roundup®	kg	0,00	247,65	247,65	247,65
Uso tractor	h	4,10	4,30	4,45	4,65
Riego	m ³	2.750,16	5.500,32	5.500,32	5.500,32
Agua aplicaciones	m ³	0,27	10,76	10,87	10,95
Electricidad	kWh	1.277,06	1.550,71	1.824,37	2.280,46
Poda	kg	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla I.3: Datos caso de estudio etapa mantenimiento.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Urea	kg	2.323,41	3.047,10	3.808,87	3.808,87
Fosfimax®40-20	kg	367,17	481,54	601,92	601,92
Winspray®	kg	4,15	4,61	5,31	5,77
Roundup®	kg	247,65	198,12	198,12	198,12
Uso tractor	h	4,85	4,60	4,80	5,00
Riego	m ³	8.250,47	11.000,63	11.000,63	13.750,79
Agua aplicaciones	m ³	11,06	9,07	9,18	9,26
Electricidad	kWh	2.615,12	3.962,30	7.924,60	9.121,84
Poda	kg	20.160,00	26.880,00	26.880,00	33.600,00

Finalmente, en las Tablas I.4 y I.5 se presentan los datos de las etapas de cosecha y distribución, respectivamente.

Tabla I.4: Datos caso estudio etapa cosecha.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Uso tractor	h	123,2	246,40	246,40	560,00

Tabla I.5: Datos caso estudio etapa distribución.

Labor/insumo	Unidad	Valor			
		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Uso camión	km	15,40	15,40	15,40	15,40

Los transportes correspondientes a este caso de estudio se presentan en la Tabla I.6.

Los cálculos para obtener el impacto en términos de Potencial de Calentamiento Global son análogos a los realizados para el caso convencional y agroecológico. Revisar Anexo C.

De la misma forma, para el cálculo del Uso de Agua y de la Eutrofización Acuática, revisar Anexos D y E, respectivamente para conocer los cálculos análogos.

Los resultados obtenidos para Ensenada Los Tilos en cada etapa, se presentan en la Tabla I.7.

Tabla I.6: Transporte de insumos y distribución caso de estudio.

Transporte	Desde	Hasta	Distancia [km]
Urea (Fertilizante)			
Camión Tráiler	Potchefstroom ^a	Durban ^b	674,96
Barco	Durban ^b	San Antonio ^c	10.397,28
Camión Tráiler	San Antonio ^c	Providencia	112,46
Camión Liviano	Providencia	Hijuelas	135,00
Fosfimax®40-20 (Fertilizante)			
Camión Liviano	Quillota	Hijuelas	17,30
Roundup®(Herbicida)			
Camión Liviano	Lampa	Providencia	32,00
Camión Liviano	Providencia	Hijuelas	114,00
Winspray®(Pesticida)			
Camión Tráiler	Buenos Aires ^d	Quilicura	1.459,00
Camión Liviano	Quilicura	Providencia	19,40
Camión Liviano	Providencia	Hijuelas	135,00
Sistema riego			
Camión Liviano	Ñuñoa	Hijuelas	133,00
Distribución			
Camión Tráiler	Hijuelas	Propal	15,40

^a Sudáfrica

^b Puerto de Durban, Sudáfrica

^c Puerto de San Antonio, Chile

^d Argentina

Tabla I.7: Resultados por categoría de impacto y etapa para el caso de estudio: Ensenada Los Tilos.

Etapa	PCG [kgCO ₂ eq/kg palta]	Uso de agua [m ³ agua/kg palta]	Eut. acuática [kg PO ₄ ³⁻ eq/kg palta]
Plantación	0,40	1,23·10 ⁻²	0,00
Crecimiento	2,37	5,45	2,10·10 ⁻³
Mantenimiento	5,70	16,12	7,30·10 ⁻³
Cosecha	0,55	9,50·10 ⁻³	0,00
Distribución	1,24·10 ⁻³	1,00·10 ⁻⁵	0,00
Total	9,02	21,59	0,01