

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

MEMORIA DE TÍTULO

**EVOLUCIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE UN SISTEMA  
AGROECOLÓGICO A TRAVÉS DE VEINTE AÑOS EN EL  
SECANO INTERIOR DE LA REGIÓN DEL BÍOBÍO**

**SEBASTIÁN ANDRÉS BÓRQUEZ CASTRO**

SANTIAGO - CHILE

2016

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EVOLUCIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE UN SISTEMA  
AGROECOLÓGICO A TRAVÉS DE VEINTE AÑOS EN EL SECANO  
INTERIOR DE LA REGIÓN DEL BÍOBÍO**

**SUSTAINABILITY EVOLUTION OF AGROECOLOGICAL SYSTEM THROUGH  
TWENTY YEARS IN THE INNER RAINFED OF BÍOBÍO REGION**

SEBASTIÁN ANDRÉS BÓRQUEZ CASTRO

SANTIAGO - CHILE

2016

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO

**EVOLUCIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE UN SISTEMA  
AGROECOLÓGICO A TRAVÉS DE VEINTE AÑOS EN EL SECANO  
INTERIOR DE LA REGIÓN DEL BÍO BÍO**

Memoria para optar al título profesional de  
Ingeniero Agrónomo

SEBASTIÁN ANDRÉS BÓRQUEZ CASTRO

<b>Profesores Guías</b>	<b>Calificación</b>
Jaime Rodríguez M. Ingeniero Agrónomo, MSc	6,9
Luis Morales S. Profesor de Ciencias Naturales y Física, Mg. Sc., Dr.	6,8
<b>Profesores Evaluadores</b>	
Juan Manuel Uribe M. Ingeniero Agrónomo	7,0
Ricardo Pertuzé C. Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	6,3

SANTIAGO - CHILE

2016

*El cultivo de la tierra y la purificación del espíritu humano son un mismo proceso y la agricultura natural es un tipo de vida por medio del cual puede tener lugar este proceso.*

**Masanobu Fukuoka**

## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
MATERIALES Y MÉTODOS .....	6
Materiales .....	6
Ubicación del estudio .....	6
Características edafoclimáticas .....	7
Presentación del Centro de Educación y Tecnología (CET) .....	8
Métodos.....	9
Objetivo 1 .....	10
Caracterización del sistema a evaluar .....	10
Identificación de los puntos críticos del agroecosistema.....	12
Determinación de los criterios de diagnóstico .....	12
Selección y medición de indicadores.....	12
Objetivo 2 .....	13
De la presentación e integración de resultados .....	13
Objetivo 3 .....	13
De las recomendaciones finales .....	13
Métodos de medición de indicadores e instrumentos de análisis .....	13
Indicadores agroambientales.....	14
Producción agrícola.....	14
Índice de diversidad biológica y agrícola.....	14
Cobertura vegetal del suelo.....	15
Pérdidas de suelo por erosión hídrica.....	15
Propiedades del suelo.....	17
Materia orgánica del suelo (MOS).....	17
Estabilidad de agregados (EA).....	18
Densidad de lombrices .....	19
Indicadores económicos.....	19
Ingresos netos anuales (\$/año) .....	19
Relación Beneficio-Costo (%) .....	20
Retorno de la tierra (RT).....	20
Número de especies de importancia económica (NEIE).....	20
Número de fuentes de ingreso predial.....	20
Índice de Herfindahl.....	20

Producción de abonos orgánicos .....	21
Independencia de Insumos Externos (IDIE) .....	21
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	22
Caracterización general del agroecosistema .....	22
Caracterización de subsistemas y unidades productivas .....	23
Subsistema agrícola .....	23
Rotación de cultivos.....	24
Producción bajo invernadero .....	25
Huerto frutal.....	25
Subsistema forestal .....	25
Bosquetes .....	25
Franjas forestales .....	26
Sistema Silvopastoral.....	26
Sistema Agroforestal.....	27
Subsistema ganadero .....	27
Identificación de los puntos críticos del agroecosistema .....	29
Determinación de los criterios de diagnóstico y selección de indicadores .....	32
Análisis de resultados e integración gráfica.....	33
Indicadores agroambientales .....	33
Producción agrícola .....	33
Índice de diversidad biológica .....	37
Índice de diversidad agrícola .....	38
Cobertura del suelo .....	39
Pérdidas de suelo por erosión hídrica .....	41
Propiedades del suelo .....	42
Materia orgánica del suelo (MOS).....	42
Estabilidad de agregados (EA) .....	45
Densidad de lombrices.....	47
Indicadores económicos .....	49
Ingresos netos anuales .....	49
Relación Beneficio-Costo .....	51
Retorno de la tierra .....	52
Número de especies de importancia económica (NEIE) .....	53
Número de fuentes de ingreso predial .....	54
Índice de Herfindahl .....	55
Producción de abonos orgánicos.....	56
Independencia de Insumos Externos (IDIE).....	57
Integración de resultados.....	58
Recomendaciones finales .....	61

CONCLUSIONES .....	62
BIBLIOGRAFÍA .....	64
ANEXOS .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la localidad de Yumbel y la central demostrativa del CET.....	6
<b>Figura 2.</b> Climograma de Yumbel .....	7
<b>Figura 3.</b> Flujo metodológico del MESMIS utilizado en la evaluación del predio demostrativo del CET.....	11
<b>Figura 4.</b> Esquema del funcionamiento predial del CET.....	22
<b>Figura 5.</b> Diagrama del subsistema agrícola del CET .....	24
<b>Figura 6.</b> Diagrama del subsistema forestal del CET .....	26
<b>Figura 7.</b> Diagrama del subsistema ganadero del CET.....	27
<b>Figura 8.</b> Niveles de producción del subsistema agrícola y sus unidades de manejo, obtenidos en los años considerados en el estudio.....	33
<b>Figura 9.</b> Aporte porcentual de las unidades de manejo respecto de la productividad total obtenida en los años considerados en el estudio.....	35
<b>Figura 10.</b> Rendimiento de los principales cultivos del subsistema agrícola .....	35
<b>Figura 11.</b> Valores del Índice de Shannon, indicando la diversidad biológica a nivel predial en cada año de evaluación .....	37
<b>Figura 12.</b> Valores del Índice de Shannon, indicando el nivel de diversidad agrícola en cada año de evaluación.....	38
<b>Figura 13.</b> Porcentaje de suelo cubierto obtenido en el sistema productivo del CET .....	39
<b>Figura 14.</b> Distribución mensual de la cobertura de suelo en agroecosistemas tradicionales y alternativos del Secano Interior de la Región del Bío-Bío .....	40
<b>Figura 15.</b> Pérdidas de suelo por erosión hídrica a nivel predial en los años considerados para el estudio.....	42
<b>Figura 16.</b> Niveles de materia orgánica observados en los años considerados en el estudio.....	43
<b>Figura 17.</b> Contenido de materia orgánica de dos suelos sin manejo y de cinco unidades productivas del CET, obtenidas durante la temporada 2012-2013 .....	44
<b>Figura 18.</b> Evolución de la estabilidad de agregados a nivel predial entre los años 1993, 2000, 2007 y 2013 .....	46
<b>Figura 19.</b> Niveles de estabilidad de agregados (EA), contenidos de arcilla y materia orgánica en las unidades evaluadas .....	47
<b>Figura 20.</b> Densidad de lombrices promedio, evaluada en los años 1993 y 2013.....	48
<b>Figura 21.</b> Ingresos netos anuales de las principales unidades productivas en los años considerados en el estudio .....	50
<b>Figura 22.</b> Relación Beneficio-Costo obtenida en los años considerados en el estudio.....	51
<b>Figura 23.</b> Retorno de la tierra (RT) en los años considerados en el estudio .....	53



<b>Figura 24.</b> Número de especies de importancia económica de las unidades de manejo en los años considerados en el estudio .....	53
<b>Figura 25.</b> Número de fuentes de ingreso predial aportados por las unidades de manejo en los años considerados en el estudio .....	54
<b>Figura 26.</b> Índice de Herfindahl en los años considerados en el estudio. ....	55
<b>Figura 27.</b> Niveles de producción intrapredial de compost, vermicompost y biofertilizantes líquidos en los años considerados en el estudio.....	57
<b>Figura 28.</b> Independencia de insumos externos (IDIE) en los años considerados en el estudio. ....	58
<b>Figura 29.</b> Presentación gráfica de los indicadores evaluados .....	60

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Clasificación general de los niveles de MO en suelos chilenos .....	18
<b>Cuadro 2.</b> Síntesis de características del sistema predial del CET, desde el punto de vista biofísico, tecnológico y de manejo. ....	28
<b>Cuadro 3.</b> Puntos críticos del sistema predial del CET, de acuerdo al contexto agroambiental del secano de la Región del Bío-bío.....	31
<b>Cuadro 4.</b> Indicadores agroambientales y económicos seleccionados .....	32
<b>Cuadro 5.</b> Variación porcentual de producción del subsistema agrícola entre los años considerados en el estudio. ....	34
<b>Cuadro 6.</b> Cobertura del suelo en los subsistemas agrícola y forestal, evaluada durante la temporada 2012-2013. ....	41
<b>Cuadro 7.</b> Costos operacionales en los años considerados en el estudio.....	52
<b>Cuadro 8.</b> Valores obtenidos, valores óptimos y criterios para su definición, en los cuatro años considerados en el estudio .....	59

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la evolución del sistema productivo del Centro de Educación y Tecnología (CET), ubicado en la comuna de Yumbel (Región del BíoBío), en función de las prácticas agroecológicas aplicadas por 20 años. Se analizó la sustentabilidad predial comparando 16 indicadores (8 agroambientales y 8 económicos) obtenidos mediante la metodología MESMIS, entre los años 1993 (inicio de la producción), 2000, 2007 y 2013. Los resultados de los indicadores reflejaron un progreso significativo en los atributos de productividad, estabilidad, resiliencia y autogestión a través del tiempo. El indicador de producción se incrementó sobre 100% debido al aumento de la biodiversidad agrícola (35,9%) y al manejo ecológico del suelo. Éste último se tradujo en un mayor contenido de materia orgánica (de 2,54 a 5,35%), un aumento de la estabilidad estructural (de 33,3 a 54,6) y una menor pérdida de suelo por erosión hídrica (de 8,04 a 0,22 t ha<sup>-1</sup>año). El mayor nivel de sustentabilidad logrado después de 20 años en este predio, demuestra que la estrategia de producción agroecológica es una alternativa apropiada para el desarrollo sustentable de la pequeña agricultura del Secano Interior de Chile.

**Palabras clave:** Indicadores, agroecología, MESMIS, CET.

## ABSTRACT

This research aimed to evaluate the productive system evolution of Centro de Educación y Tecnología (CET), located in Yumbel commune (Bíobío Region), based on agroecological practices applied for over 20 years. Farm sustainability was analyzed comparing 16 indicators (8 agrienvironmental and 8 economic), obtained by MESMIS methodology, between 1993 (start of production), 2000, 2007 and 2013. Indicators reflected significant progress in the productivity, stability, resilience and self-management attributes through the time. The production indicator increased over 100%, mainly due to the increase of agricultural biodiversity (35.9%) and ecological soil management. The latter achieved a higher content of (2.54 to 5.35%), greater structural stability (from 33.3 to 54.6) and reduced soil loss (from 8.04 to 0.22 t ha<sup>-1</sup>yr). The higher level of sustainability achieved after 20 years, demonstrate that agroecological production strategy is a suitable alternative for the sustainable development of small farmers in the inner rainfed of Chile.

**Keywords:** Indicators, agroecology, MESMIS, CET

## INTRODUCCIÓN

La agricultura del secano constituye una de las actividades productivas más importantes para el desarrollo de los sectores rurales del país. Entre las regiones del Maule y Bío-Bío, la zona del Secano Interior posee una superficie aproximada de 150.000 hectáreas de suelos arables, distribuidas entre 30.000 pequeños agricultores (Riquelme *et al.*, 2004). Considerada un área marginal, esta zona ha estado sumida por décadas en la pobreza producto de una fuerte degradación ambiental, donde la erosión del suelo y la pérdida de biodiversidad se presentan como los problemas más graves y difíciles de revertir (Infante, 2004).

El deterioro de los recursos naturales ha sido provocado, en gran medida, por una agricultura insustentable basada en prácticas no conservacionistas aplicadas durante decenios. Cabe recordar que, durante la segunda mitad del siglo XIX, el Secano Interior fue sometido a una intensa actividad agrícola orientada principalmente al monocultivo y exportación de trigo hacia California y Australia (Acevedo, 2007; González, 2011). En pocos años se talaron y quemaron cientos de hectáreas de bosque nativo y más de 600 km de suelos fértiles de la Cordillera de la Costa se erosionaron (Infante, 2013).

Por otra parte, el manejo agrícola convencional no ha tenido éxito en resolver los problemas que enfrentan los pequeños productores (Altieri, 1999). La baja fertilidad natural de los suelos, la dependencia de insumos sintéticos, la deforestación y la falta de recursos económicos, siguen siendo las principales causas que restringen la productividad y rentabilidad de los sistemas de subsistencia, reduciendo la calidad de vida de las familias campesinas del secano (PLADECO, 2013).

Los problemas anteriores se agudizan al considerar los efectos del cambio climático. Al respecto, Santibáñez *et al.* (2011) señalan que la temperatura media de los climas chilenos deberá aumentar entre 1 y 3°C durante la primera mitad de este siglo, lo que, junto a una disminución de la pluviometría cercana al 40%, podría aumentar la frecuencia y severidad de las sequías e intensificar los procesos erosivos en el Secano Interior. En consecuencia, se espera que los principales cultivos de esta zona, constituidos por rotaciones de trigo, praderas, papas y leguminosas, experimenten una reducción en los rendimientos de hasta un 30% (AGRIMED, 2008).

Frente a este complejo escenario, la agroecología ha surgido como una propuesta que apunta al desarrollo agrícola sustentable a través de estrategias que permiten en el largo plazo: a) mantener el nivel de productividad y rentabilidad a nivel predial; b) aumentar la eficiencia en el uso de los recursos localmente disponibles, minimizando los costos y los efectos ambientales negativos; c) regenerar y conservar la biodiversidad, la fertilidad de los suelos y la disponibilidad de agua; d) fortalecer la seguridad y soberanía alimentaria; y e) responder a las necesidades de las familias campesinas y comunidades rurales (nutrición, salud pública, educación, ingresos, etc.) (Altieri, 2009).

La aplicación de los principios agroecológicos por ONGs y algunas organizaciones campesinas se ha traducido en diversos programas de investigación sobre sistemas alternativos de producción, destinados a desarrollar tecnologías eficientes y de bajo impacto ambiental que responden a las necesidades específicas de las comunidades rurales (Infante, 2013). Sin embargo, una de las principales limitantes para determinar el nivel de éxito de estos sistemas, es la ausencia de herramientas apropiadas que permitan evaluar su sustentabilidad en términos de viabilidad, capacidad productiva y estabilidad. Existe una necesidad de establecer indicadores que midan el impacto de las prácticas agrícolas a nivel predial y señalen cuáles son las decisiones claves para reorientarlas y mejorarlas (Vega, 2009).

El concepto de sustentabilidad puede ser resumido en una serie de atributos generales de los agroecosistemas, los cuales se encuentran definidos en diversos marcos de evaluación (OECD, 1999a; Smith y Dumansky, 1995; Masera *et al.*, 1999; Vilain *et al.*, 2003; López-Ridaura *et al.*, 2005, Sarandón y Flores, 2009). Entre ellos, el marco MESMIS (Masera *et al.*, 1999) destaca por su amplia utilización, ya que presenta una estructura flexible, capaz de adaptarse a contextos locales específicos, especialmente a zonas rurales desfavorecidas o marginales (Speelman *et al.*, 2007; Toro *et al.*, 2010).

El MESMIS, como la mayoría de los marcos metodológicos, se basa en el uso de índices o indicadores de sustentabilidad para medir el efecto de las prácticas agrícolas a nivel predial (Gómez *et al.*, 1996; Van der Werf y Petit, 2002; Rasul y Thapa, 2004; Halberg *et al.*, 2005; Abbona *et al.*, 2007; Fernandes *et al.*, 2008; Funes-Monzote *et al.*, 2009, Di Felice *et al.*, 2012; Galán y Pérez, 2012). Los indicadores de sustentabilidad pueden ser definidos como parámetros o variables que conceden información sobre la condición, variación y/o tendencia de aquellos atributos clave en el agroecosistema, siendo útiles para describir su evolución o comportamiento en relación a metas u objetivos.

En este sentido, la selección de indicadores juega un rol fundamental en el proceso de evaluación de sustentabilidad (Moldan *et al.*, 2012). Según Astier *et al.* (2008) y Sarandón (2009), los indicadores dependen del contexto local, de la correcta comprensión del funcionamiento del agroecosistema, de la escala de evaluación y de los objetivos del estudio.

En Chile, existen experiencias de evaluación de sustentabilidad a corto plazo en las que se comparan diferentes estilos de manejo agrícola. En el Secano Interior, Museau (2007) comparó sistemas tradicionales y alternativos utilizando la metodología MESMIS, para lo cual seleccionó 21 indicadores agroecológicos. Investigaciones similares se han realizado en sistemas de producción hortícola y frutícola bajo manejo orgánico, ubicados en el valle regado de las Regiones del Maule y Bío-bío (Pino *et al.*, 2012) y en sistemas polirubristas de la Región de los Ríos (Vega, 2009). Sin embargo, no se han reportado evaluaciones de sustentabilidad que estudien la evolución de un mismo sistema a través del tiempo.

En el Secano Interior de la Región del Bío-bío, el Centro de Educación y Tecnología (CET) ha desarrollado programas de fomento productivo para la agricultura familiar campesina por más de 20 años, mediante la transferencia e implementación de tecnologías con base agroecológica (Infante, 2013). Para realizar esta labor, el CET ha plasmado su propuesta en un predio experimental cuyo diseño y manejo productivo lo convierten en un referente para los sistemas agrarios del secano. Sin embargo, para demostrar que la propuesta es viable en esta zona, surge la necesidad de medir la sustentabilidad predial y estudiar su evolución a través del tiempo en función de las prácticas agroecológicas aplicadas. El presente trabajo aplica la metodología MESMIS como pauta de medición, monitoreo e integración de indicadores para representar la condición actual del predio y plantear recomendaciones que mejoren su sustentabilidad.

### **Objetivo General**

Evaluar la evolución del sistema de producción agroecológica del CET en el Secano Interior de la Región del Bío-bío.

### **Objetivos Específicos**

- 1) Definir indicadores de sustentabilidad adecuados para las condiciones de los sistemas agrarios minifundistas del Secano Interior de la Región del Bío-bío.
- 2) Estudiar la evolución del sistema productivo del CET a través de 20 años de manejo agroecológico.
- 3) Proponer medidas para fortalecer la sustentabilidad de la unidad agroecológica y optimizar sus futuras evaluaciones.

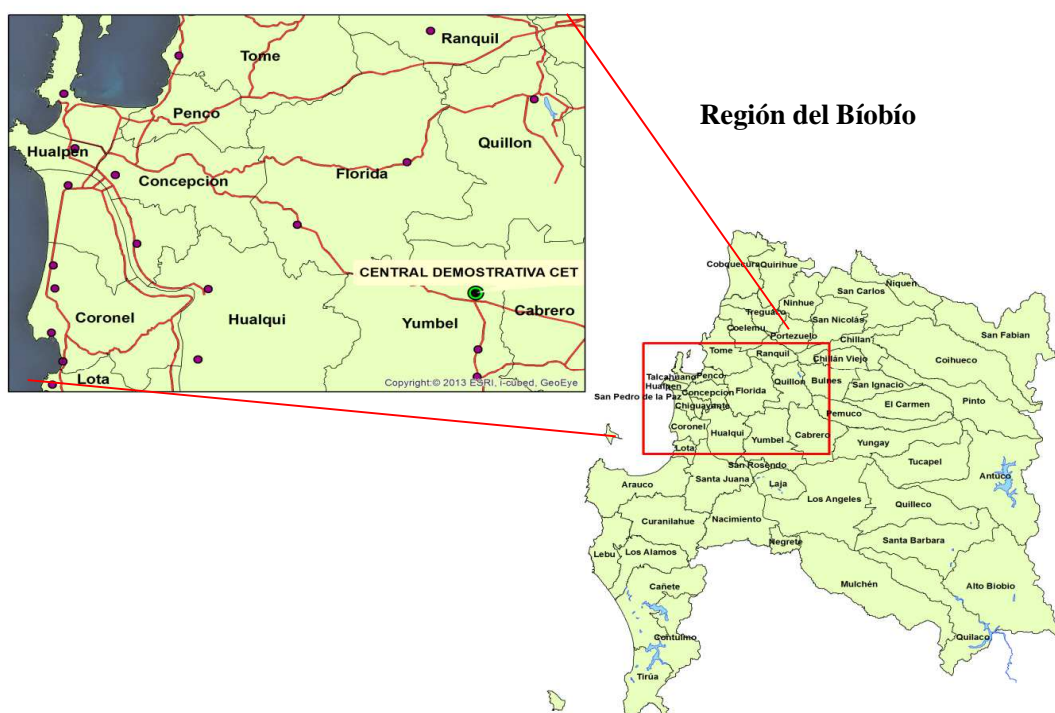
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

#### Ubicación del estudio

El estudio se realizó en la central demostrativa del CET, ubicada en la comuna de Yumbel, Región del Bío-bío (Figura 1), durante la temporada 2012-2013. El predio se encuentra a 10 km de la comuna de Yumbel, a 50 km de la ciudad de Concepción y a unos 18 km de la carretera 5 Sur. Los límites de la central demostrativa se muestran en el Anexo 1.

Con respecto a la ubicación geográfica de la comuna, ésta se localiza aproximadamente entre las coordenadas  $36^{\circ}55'$  de latitud sur y  $72^{\circ}26'$  y  $72^{\circ}34'$  de longitud oeste. Su emplazamiento corresponde a un sector de transición entre la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa y la franja occidental de la Depresión Intermedia, al norte del río Laja. Aproximadamente, el 60% de su territorio pertenece a la Cordillera de la Costa y un 40% a la Depresión Intermedia. Desde el punto de vista de la asociatividad funcional y productiva, esta comuna forma parte del territorio denominado “Secano Interior” de Concepción y Bío-bío (PLADECOC, 2013).



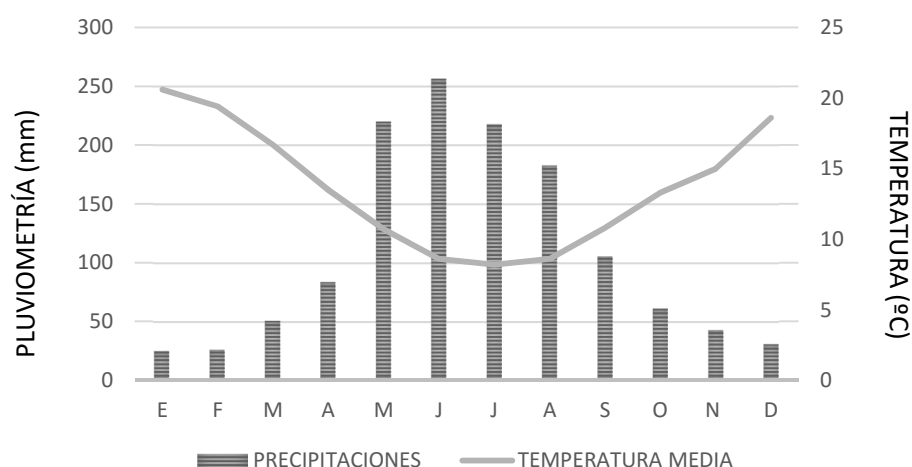
**Figura 1.** Ubicación de la localidad de Yumbel y la central demostrativa del CET.



### Características edafoclimáticas

Las condiciones climáticas de la comuna de Yumbel se encuentran fuertemente afectadas por el factor orográfico de la Cordillera de la Costa y la presencia cercana del valle del Biobío. Ambos factores ejercen influencia sobre las precipitaciones y temperaturas. Se ha definido el clima de esta zona como mediterráneo, con 6 meses secos (desde octubre hasta marzo). Las precipitaciones presentan niveles cercanos a los 1.100 mm anuales, concentrándose el 75% del agua caída entre mayo y septiembre (Maldonado, 2004), con una marcada época de sequía. El mes más seco es enero con 16 mm, mientras que el mes más lluvioso es junio con 256,4 mm. La temperatura media anual es de 13,7°C, siendo la media del mes más cálido (enero) de 20,6°C y la media del mes más frío (julio) de 8,2°C (Figura 2). Yumbel normalmente no presenta temperaturas bajas extremas, presentando heladas frecuentes en los meses de agosto y septiembre (PLADECO, 2013).

Además de las heladas que afectan a los cultivos de la zona, la concentración de las lluvias y los contrastes térmicos entre invierno y verano son algunos de los factores que influyen sobre el crecimiento vegetal y la degradación de los suelos en la Cordillera de la Costa (abundante presencia de canchales y cárcavas). Los valores de evaporación son elevados y generalmente exceden a las precipitaciones durante las etapas críticas de los cultivos, por lo que el déficit hídrico constituye una gran limitante. Con relación a la distribución de las lluvias, un 56% corresponde al invierno, 25% al otoño, 16% a la primavera y 3% al verano (Mellado, 1991) (Figura 2).



**Figura 2.** Climograma de Yumbel. Elaborado por el autor con datos obtenidos de CORFO (1965).

Los suelos predominantes corresponden a Alfisoles de la Serie Cauquenes (Anexo 3). Son suelos derivados de rocas graníticas que ocupan posiciones con pendientes muy abruptas o moderadas. Son moderadamente profundos, de textura franco arcillo arenosa, con bajos niveles de macronutrientes y materia orgánica. El pH es normalmente inferior a 6 y presentan una muy baja capacidad de retención de agua, aproximadamente de 8% (Del Pozo y Del Canto, 1999).

Estos suelos son altamente susceptibles a la erosión hídrica y actualmente se encuentran muy degradados. La intensa erosión hídrica ha producido un horizonte A delgado o superficial e incluso la pérdida de casi la totalidad del horizonte B o subsuelo (“suelos decapitados”). Esta situación ha dejado a la vista horizontes de texturas arcillosas, estructuras más pobres y coloración pardo rojiza (Stolpe, 2011). Los suelos pertenecen a la Clase VI y Clase VII de uso, ya que presentan serias limitaciones que restringen el establecimiento de cultivos. Sin embargo, los sectores de lomajes son aptos para el cultivo de algunos cereales (avena, trigo, centeno, cebada) y viñas en pendiente (Ovalle y Del Pozo, 1994).

### **Presentación del Centro de Educación y Tecnología (CET)**

El Centro de Educación y Tecnología (CET) es una corporación sin fines de lucro, dedicada al desarrollo de programas de agricultura sustentable en comunidades campesinas de diversas regiones del país. Su objetivo es el desarrollo rural y la formación de agentes de desarrollo desde una perspectiva humana y agroecológica.

Las acciones del CET se resumen en: creación, investigación y difusión de las ciencias, especialmente aquellas que tengan relación con la búsqueda, experimentación y desarrollo de nuevas tecnologías de bajo costo y fácil transmisión, destinadas fundamentalmente a la satisfacción de las necesidades básicas de la población rural (Museau, 2007).

El sistema agroecológico del CET contempla rotaciones de cultivos, huertos frutales, cultivo de hierbas medicinales, invernaderos familiares, sistemas de compostaje, sistemas de cosecha de agua, riego tecnificado, métodos de conservación de suelos, crianza de animales menores y mayores, apicultura y preparación de bioinsumos prediales.

La difusión de los principios y técnicas agroecológicas se realiza mediante diplomados, cursos y seminarios, a los cuales asiste un número creciente de personas cada año. Sólo durante el año 2011 la central fue visitada por más de 7.000 personas, entre las que se encuentran agricultores, técnicos, profesionales, estudiantes universitarios, grupos de escolares y preescolares. Los pequeños agricultores son quienes más visitan la central a través de los programas de INDAP (PRODESAL) y ONGs, donde conocen las distintas alternativas de producción y analizan sus perspectivas y posibilidades.

## Métodos

Para evaluar el grado de sustentabilidad predial, se utilizó el “Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de recursos naturales, incorporando Indicadores de Sustentabilidad” (MESMIS) descrito por Masera *et al.* (1999), que permite obtener y analizar indicadores de carácter agroambiental, económico y social. El MESMIS es una herramienta científica que permite diagnosticar las principales limitantes de los sistemas productivos y plantear recomendaciones que incrementen su sustentabilidad (Vega, 2009).

Previo al proceso de evaluación, se establecieron las siguientes premisas:

- i. El concepto de sustentabilidad se definió a partir de cuatro atributos generales de los agroecosistemas: (a) productividad, (b) estabilidad, (c) resiliencia y (d) autogestión, asociadas a las dimensiones agroambiental y económica.
  - a. El atributo de productividad se define como el producto obtenido por unidad de recurso empleado. Incluye la productividad física ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), el beneficio económico y la eficiencia.
  - b. Se entiende por estabilidad a la propiedad del agroecosistema de mantener un nivel de producción (equilibrio dinámico) a lo largo del tiempo bajo condiciones normales (Conway, 1987). Esta propiedad permite que el sistema sea capaz de compensar los rendimientos decrecientes sin necesidad de añadir cantidades crecientes de energía y nutrientes, sino más bien modificando el manejo de sus recursos: orden de rotaciones, abonos verdes, integración de agricultura y ganadería, etc.
  - c. La resiliencia es la capacidad del agroecosistema de retornar a un estado de equilibrio o nivel de producción después de haber sufrido perturbaciones graves, ya sea de tipo agroambiental o económica (Altieri, 2013). El estrés o perturbación puede ser frecuente, acumulativo y predecible (salinización, erosión, contaminación del suelo, etc.), o una circunstancia impredecible (inundación, incremento repentino del precio del petróleo, etc.) (Alonso y Guzmán, 2006).
  - d. La autogestión es la capacidad del sistema para ser regulado y controlar sus interacciones con el exterior (Modificado de Masera *et al.*, 1999).

- ii. La evaluación de sustentabilidad considera:
  - a. Una escala espacial de análisis “micro”, cuya unidad de estudio corresponde al predio minifundio (CET) compuesto por los subsistemas agrícola, ganadero y forestal.
  - b. Una escala temporal de 20 años bajo manejo agroecológico.
- iii. La investigación se basó en una estructura que analiza la evolución del sistema silvoagropecuario del CET entre los años 1993 ( $t_0$ ), 2000 ( $t_1$ ), 2007 ( $t_2$ ) y 2013 ( $t_3$ ).
- iv. La sustentabilidad es un proceso cíclico que tiene como objetivo central el fortalecimiento del sistema de manejo y el mejoramiento de procesos de evaluación posteriores.

Para hacer operativos los atributos de sustentabilidad, se definió una serie de puntos críticos que inciden en las áreas agroambiental y económica del sistema productivo. En cada área de evaluación, se determinaron criterios de diagnóstico e indicadores.

Finalmente, la información obtenida se integró utilizando una gráfica radial que permitió calificar el sistema productivo y plantear sugerencias que incrementen su sustentabilidad y mejoren los futuros procesos de evaluación. Para dar concreción a los objetivos específicos, se aplicó la siguiente secuencia metodológica (Figura 3):

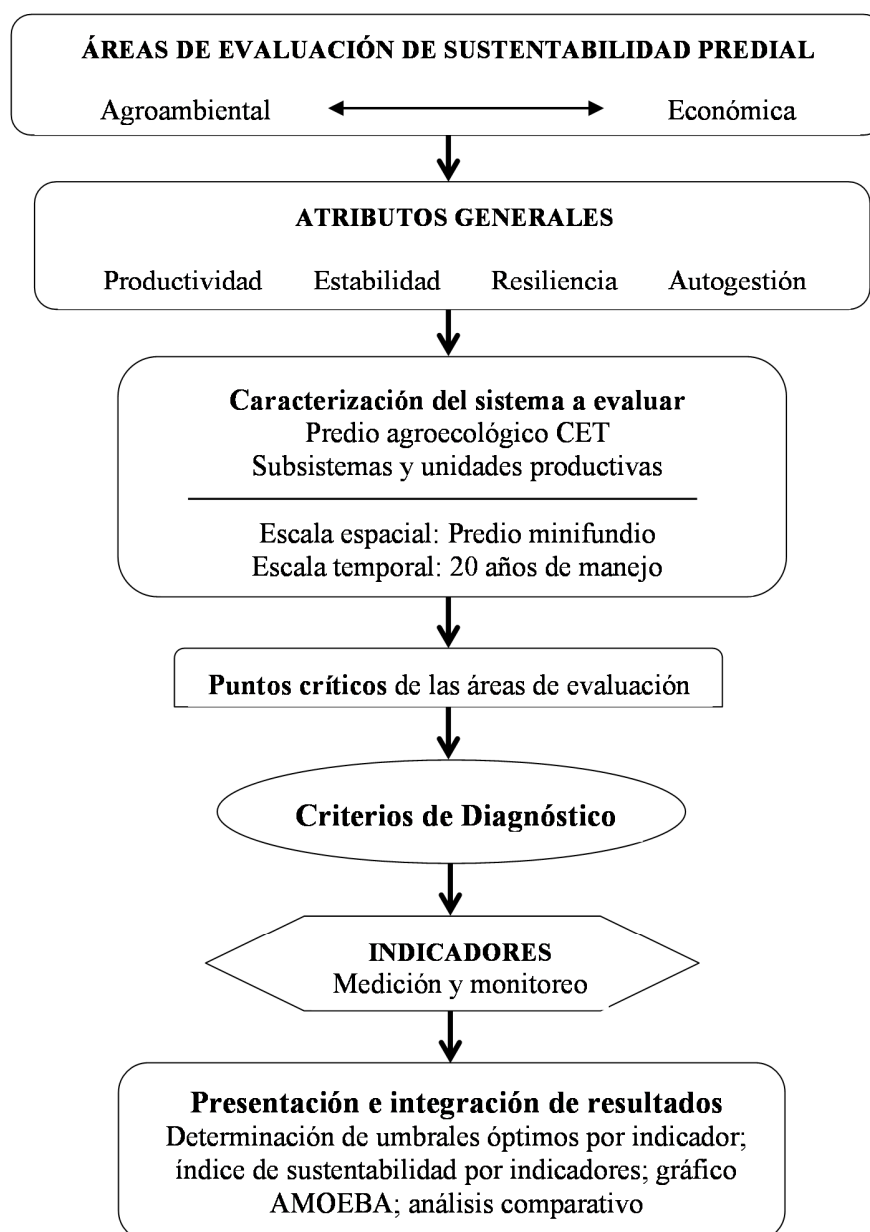
## Objetivo 1

**Caracterización del sistema a evaluar.** La caracterización del sistema de manejo se realizó mediante la recopilación de registros provenientes de la central experimental, revisión bibliográfica, recorridos por las unidades productivas y reuniones periódicas con el equipo técnico del CET. Primero se caracterizó el sistema de forma integral y luego se identificó y describió cada uno de los subsistemas y unidades productivas que constituyen cada subsistema.

Para apoyar la caracterización, se utilizó un mapa predial basado en información fotointerpretada por Rojas (datos no publicados) con el Sistema de Información Geográfico (SIG) Arc-View 3.2 y previsualizada con el software Google Earth 2012. Luego, se sintetizó la descripción del sistema productivo según determinantes biofísicas, tecnológicas y de manejo (Museau, 2007).

- a. Determinantes biofísicas. Se recopiló antecedentes bibliográficos acerca de las características agroclimáticas, edáficas, geomorfológicas y de vegetación.

- b. Determinantes tecnológicas y de manejo. La descripción consideró las especies manejadas, los sistemas de labranza, la fertilización, el control de malezas, el manejo de plagas y enfermedades, los sistemas de riego y las prácticas de conservación.



**Figura 3.** Flujo metodológico del MESMIS utilizado en la evaluación del predio demostrativo del CET (Adaptado de Masera *et al.*, 1999).

**Identificación de los puntos críticos del agroecosistema.** Una vez caracterizado el sistema y definidos el contexto y la escala de análisis, se determinaron los puntos críticos que inciden en la sustentabilidad del sistema productivo, es decir, aquellos aspectos que limitan o fortalecen los cuatro atributos de sustentabilidad propuestos. Para ello, se formularon las siguientes preguntas: ¿cuáles son los puntos donde el sistema es más vulnerable o presenta problemas? y ¿cuáles son los puntos donde es fuerte? Estos puntos pueden ser factores o procesos ambientales, técnicos y/o económicos que pueden jugar un rol clave en su permanencia y viabilidad (Vega, 2009).

La identificación de los puntos críticos se basó en antecedentes de evaluaciones y estudios regionales realizados en el Secano Interior del BíoBío, los cuales fueron analizados y discutidos junto al equipo técnico del CET.

**Determinación de los criterios de diagnóstico.** En este paso, se definieron los criterios que permiten describir los atributos generales de sustentabilidad y vincular coherentemente los puntos críticos con los indicadores.

**Selección y medición de indicadores.** Después de definir los criterios de diagnóstico, se elaboró una lista general de indicadores para cada criterio de diagnóstico. Para ello, se consultó en evaluaciones realizadas en sistemas alternativos de producción ubicados en el Secano Interior (Venegas, 1997; Peterson, 2002; Museau, 2007; Pino, 2009). Cabe señalar que esta evaluación consideró indicadores idénticos o similares a los utilizados en dichas investigaciones, a fin de comparar y analizar la evolución del sistema productivo a través del tiempo.

Posteriormente, se construyó un cuadro resumen que permitió observar la coherencia entre las áreas de evaluación, los atributos de sustentabilidad, los criterios de diagnóstico y los indicadores.

La selección de los indicadores tuvo en cuenta los siguientes criterios:

- Facilidad de medición
- Bajo costo de medición
- Indicadores de fácil interpretación
- Indicadores independientes del observador y recolector
- Brindar la posibilidad de determinar valores umbrales
- Ser robustos e integradores

La estimación de los indicadores se realizó a través del muestreo directo en terreno, de análisis en laboratorio y de revisión bibliográfica.

Con el propósito de lograr una mayor precisión y confiabilidad de los datos, se midieron algunos indicadores por separado en cada una de las unidades productivas (ej: indicadores de suelo, cobertura y diversidad vegetal). Sin embargo, para efectos comparativos, fue necesario promediar y ponderar los valores de estos indicadores para compatibilizarlos con los estados

anteriores del predio. Otros indicadores, en cambio, fueron medidos directamente y analizados a nivel predial.

El año 1993 ( $t_0$ ) se designó como testigo o situación base para estudiar la evolución de los indicadores, ya que corresponde al inicio de la actividad productiva. Sin embargo, debido a la escasa información disponible sobre características biofísicas en este año, se midió un conjunto de indicadores agroambientales (indicadores de suelo, cobertura y diversidad vegetal) en áreas del predio sin manejo agroecológico para simular los posibles niveles alcanzados por estos indicadores.

## **Objetivo 2**

**De la presentación e integración de resultados.** Considerando antecedentes bibliográficos y criterios técnicos sugeridos por el autor, se determinaron los valores de referencia u óptimos para cada indicador. Luego, se construyó un cuadro resumen con los resultados de los indicadores obtenidos y sus unidades de medida.

La integración de los resultados se efectuó mediante el uso de una gráfica radial o “Amoeba” (Ten Brink *et al.*, 1991), que no requiere la ponderación de los indicadores, por lo que es flexible, fácil de implementar y eficiente para comunicar los resultados de la evaluación.

La gráfica incorporó los indicadores mediante índices que poseen una escala numérica. Cada eje del gráfico representa un indicador y en estos ejes se muestran los valores obtenidos de los índices (Vega, 2009). Así, cada año fue representado por un diagrama, comparándose la sustentabilidad predial al superponer los cuatro diagramas.

## **Objetivo 3**

**De las recomendaciones finales.** En este paso, se sugirieron medidas tanto para fortalecer la sustentabilidad del sistema de manejo, como para mejorar el proceso de evaluación.

## **Métodos de medición de indicadores e instrumentos de análisis**

A continuación, se describen los métodos e instrumentos de análisis utilizados para medir los 16 indicadores de sustentabilidad. También se justifican los criterios considerados para establecer los valores umbrales u óptimos de cada indicador.

## Indicadores agroambientales

**Producción agrícola.** La producción agrícola estuvo representada por el rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ ) de todos los cultivos de la temporada 2012-2013, obtenido a partir de 3 a 5 muestras de  $1\ m^2$  provenientes de cada cultivo. Se determinó el peso fresco de las muestras ( $kg/m^2$ ) y se convirtió la unidad de medida ( $1\ t = 1.000\ kg$ ;  $1\ ha = 10.000\ m^2$ ) considerando la superficie ocupada por cada cultivo. En el subsistema animal, se contabilizó el número de unidades animales y subproductos, mientras que en el subsistema forestal se obtuvo el número de estacas y el volumen de leña extraído.

Puesto que el sistema productivo del CET corresponde a un predio demostrativo, se asumió su nivel de producción como óptimo o potencial, por ser el más alto alcanzado entre los sistemas de producción alternativos de la zona. Así, a la mayor sumatoria resultante se le asignó el valor 100 (valor de referencia o umbral), siendo el de los años restantes el porcentaje sobre este valor.

**Índice de diversidad biológica y agrícola.** Los índices de diversidad biológica y diversidad agrícola fueron determinados mediante el Índice de Shannon-Weaver ( $H_s$ ) (1949), el cual se expresa como:

$$H_s = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \times \ln \frac{n_i}{N}$$

donde, en el caso de la diversidad biológica,  $S$  corresponde al número total de especies (riqueza);  $N$  al número total de individuos; y  $n_i$  al número de individuos por especie (abundancia relativa). Cabe indicar que el índice se calculó aplicando el logaritmo base 10 ( $\log_{10}$ ).

En el caso de la diversidad agrícola,  $S$  corresponde al número de especies vegetales de importancia económica (NEIE);  $N$  a la producción agrícola total; y  $n_i$  al rendimiento de cada especie.

Los datos necesarios para calcular el índice de diversidad biológica se recogieron en terreno a inicios de primavera 2013, período del año más apropiado de acuerdo a la recomendación planteada por NEIKER (2011), pues es cuando los procesos biológicos de germinación, brotación y crecimiento de las especies comienzan a mostrar mayor actividad.

El método consistió en arrojar al azar un cuadrante de  $0,5\ m^2$  al menos 5 veces en cada unidad productiva, para identificar y contabilizar las diferentes especies dentro de él. En el caso de los cultivos hilerados, se efectuaron repeticiones tanto entre las hileras como sobre las hileras, distribuyendo uniformemente los puntos de medición en el área bajo estudio. Se calculó  $H_s$  para cada unidad productiva y se ponderó según la superficie para obtener un índice de diversidad biológica general.



El valor óptimo o potencial correspondió a la máxima diversidad que es posible obtener, la cual se alcanza cuando todas las especies identificadas en la muestra están equitativamente presentes. Para determinar este valor, se utilizó la siguiente fórmula descrita por Pla (2006):

$$H_{max} = \ln(S) ,$$

donde  $H_{max}$  es la diversidad potencial; y S es el número de especies de la muestra.

**Cobertura del suelo.** Para estimar este indicador, se lanzó un cuadrante de 1 m<sup>2</sup> dividido en 100 cuadrados pequeños al menos 4 veces en cada unidad productiva, para contabilizar los cuadrados sin cobertura vegetal o mulch (Pino *et al.*, 2012). De esta manera, se obtuvo un porcentaje promedio de suelo cubierto en cada unidad productiva.

La toma de datos se realizó a inicios de primavera de 2013 en los subsistemas agrícola y forestal. El número de repeticiones por unidad productiva se determinó de acuerdo a la magnitud de la superficie que éstas ocupan y al grado de homogeneidad de suelo cubierto (Anexo 7). A partir de las repeticiones, se obtuvieron valores promedio por unidad, los que, se ponderaron según la superficie para obtener un índice general de cobertura.

Con el objetivo de simular las condiciones del año 1993 ( $t_0$ ), se incluyó la medición de cobertura vegetal en sectores sin manejo cercanos a las unidades productivas evaluadas. Puesto que no se han realizado estimaciones de cobertura vegetal en el año 2007 que permitan la comparación con la condición actual, se consideró la estimación de Museau (2007) como valor de referencia para este año.

Se asignó el valor 100 (de referencia u óptimo) al 100% de cobertura vegetal, correspondiendo el de los años de evaluación a sus respectivos porcentajes de cobertura.

**Pérdidas de suelo por erosión hídrica.** Debido a que no se contaba con los instrumentos experimentales adecuados para la estimación directa de las pérdidas de suelo, se recurrió al modelo de simulación de erosión USLE (Wischmeier y Smith, 1978), especialmente diseñado para predecir las pérdidas de suelo por erosión laminar y de canalículos. La USLE ha sido una de las ecuaciones más aceptadas y utilizadas, dada su alta fidelidad y aplicabilidad demostrada en una gran cantidad de trabajos realizados en todo el mundo con fines científicos y de planificación (Honorato *et al.*, 2001).

En Chile, destacan las investigaciones realizadas por Millas (1977) y Riquelme (1994) en dos series de suelos graníticos de Cauquenes (Región del Maule); las estimaciones realizadas por Endlicher (1988) en parcelas de trigo de secano en la comuna de Florida (Región del BíoBío); y las mediciones de Peña (1983) en Santa Bárbara (Región del BíoBío), quienes obtuvieron una buena correlación entre las estimaciones del modelo y los resultados de las parcelas de erosión.

La USLE establece que las pérdidas de suelo en un área determinada, corresponden al producto de cinco factores que son:

$$A = R * K * LS * C * P ,$$

donde, A es la pérdida de suelo anual promedio por unidad de área ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ); R es el índice de erosividad de la lluvia ( $\text{MJ mm ha h}^{-1}$ ); K es la erodabilidad del suelo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )<sup>-1</sup>; L corresponde al largo de la pendiente (m); S es el gradiente de la pendiente (%); C representa las prácticas de cobertura del suelo y manejo de los cultivos; y P representa las prácticas de conservación en el agroecosistema.

Los cinco factores fueron determinados a partir de mediciones en terreno y de antecedentes bibliográficos. Para ello, se utilizaron los procedimientos propuestos por Wischmeier y Smith y los datos publicados por Honorato *et al.* (2001), Museau (2007) y Stolpe (2011), quien reportó el factor R para esta zona (Anexo 5).

El factor K se calculó mediante la ecuación empírica de Loch y Rosewell (1992):

$$K = 2,77 \cdot M^{1,14} \times 10^{-7} \cdot (12 - A) + 4,28 \times 10^{-3} \cdot (B - 2) + 3,29 \times 10^{-3} \cdot (C - 3)$$

Donde:

“M” es la distribución del tamaño de partículas del horizonte superficial, que corresponde a los porcentajes de limo + arena muy fina y arena.

“A” es el porcentaje de materia orgánica del horizonte superficial.

“B” es el código de la estructura del suelo del horizonte superficial

1 = Granular muy fino	2 = Granular fino
3 = Granular medio a grueso	4 = Bloques, laminar o masiva

“C” es el código de permeabilidad del perfil

1 = Rápida	2 = Moderadamente rápida
3 = Moderada	4 = Moderadamente lenta
5 = Lenta	6 = Muy lenta

Para el año 1993, se consideró el factor K calculado por Stolpe (2006) para la Serie Cauquenes (Anexo 6).

Para calcular el factor LS, se empleó la fórmula propuesta por Wischmeier y Smith (1978) a partir de numerosos datos experimentales respecto de una parcela de referencia o estándar, de longitud de ladera = 22,13 m, y pendiente = 9%. La ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$LS = \sqrt{f(0,0138 + (0,00965) + (0,00138S^2))}$$

Donde:

“f” es la longitud de la ladera en metros

“S” es la pendiente expresada en porcentaje

Esta fórmula se aplicó sobre cinco unidades de manejo representativas de los distintos niveles de gradiente y largo de pendiente identificados en el predio. Los valores de LS provenientes de cada unidad fueron promediados para obtener un valor global. Las unidades consideradas fueron: cereales en rotación, huerto frutal de berries, franjas forestales, viñedo y cultivo asociado de haba/arveja.

Se asignó el valor 100 al nivel mínimo que es posible calcular bajo estas condiciones agroclimáticas utilizando el modelo USLE, siendo el de los años restantes el porcentaje sobre este valor. Para efectos de discusión, se consideró los niveles de tolerancia de erosión para los suelos del sur de Chile publicados por Ellies (2000) y los valores de referencia indicados por Museau (2007) para los suelos del Secano Interior.

### **Propiedades del suelo**

Las propiedades de suelo evaluadas fueron el porcentaje de materia orgánica, la estabilidad de agregados y la densidad de lombrices. Las dos primeras se determinaron mediante un análisis de suelo realizado en laboratorio, para lo cual se procedió a tomar muestras de suelo desde los 20 cm de profundidad (horizonte superficial) en cada unidad productiva y en sectores sin manejo cercanos a ellas (datos para t<sub>0</sub>, año 1993). Las muestras fueron extraídas desde puntos distribuidos uniformemente para obtener una muestra compuesta representativa. Las muestras finales tuvieron un peso de 1 kg.

**Materia orgánica del suelo (MOS).** El porcentaje de materia orgánica del suelo fue estimado a través del método de pérdida por calcinación (Sadzawka *et al.*, 2004), que evalúa la pérdida de masa de una muestra de suelo seco de 5 a 10 g, después de ser calcinado a 360°C por 16 horas en una mufla.

El porcentaje de materia orgánica se informó como pérdida por calcinación de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P = 100 \cdot \left( \frac{a - b}{a - c} \right)$$

Donde:

P = Pérdida por calcinación (%)

a = masa de suelo seco (g) + masa del recipiente (g)

b = masa del residuo de calcinación (g) + masa del recipiente (g)

c = masa del recipiente (g)

Se consideró como valor óptimo al máximo porcentaje de materia orgánica obtenido, recibiendo el valor 100. Además, se evaluó la condición del indicador de forma cualitativa, de acuerdo a la siguiente tabla elaborada por Salazar y Nájera (2011) que ofrece una clasificación general para la interpretación del nivel de MO en suelos chilenos (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Clasificación general de los niveles de MO en suelos chilenos.

Categoría	% MOS	Rango del indicador	Condición
Bajo	<2,5	<50	Malo
Medio	2,5 – 5,0	50 – 99	Regular
Alto	> 5,0	100	Bueno

Fuente: Modificado de Salazar y Nájera (2011).

**Estabilidad de agregados (EA).** La estabilidad de agregados se determinó mediante el método de relación de dispersión (RD) (Berryman *et al.*, 1982), que evalúa la estabilidad de los microagregados y su variación en función del manejo. Utiliza la metodología del hidrómetro de Bouyoucos, por lo que es de fácil implementación (Seguel *et al.*, 2003). En este análisis, se prepararon muestras correspondientes a cada unidad productiva, de las cuales se separaron dos submuestras. De cada submuestra se extrajo 50 g de agregados de entre 1 a 2 mm, mediante tamizaje del suelo seco al aire, para luego someterlas a diferentes grados de dispersión: una a dispersión suave y otra a dispersión drástica. Finalmente, se les midió la densidad (calculada como contenido de arcilla más limo) mediante hidrómetro y la temperatura a los 40 segundos desde que comienza el proceso de decantación.

Con los datos obtenidos, se estimó RD expresada como la relación porcentual entre la densidad de la muestra sometida a dispersión suave y la de la muestra sometida a dispersión drástica (contenido de arcilla más limo totales). Para el cálculo de RD, se utilizó la siguiente fórmula:

$$RD = 100 \cdot \left\{ 1 - \left[ \frac{ds \cdot (L + A)}{dd \cdot (L + A)} \right] \right\}$$

Donde:

(L+A) ds = (% de limo + % de arcilla) con dispersión suave

(L+A) dd = (% de limo + % de arcilla) con dispersión drástica

Se asignó como valor 100 al máximo porcentaje de RD obtenido, siendo el de los años restantes el porcentaje sobre este valor.

**Densidad de lombrices.** La densidad de lombrices se determinó a partir del método descrito por USDA (1999), que consiste en el conteo de lombrices en muestras de suelo de 900 cm<sup>2</sup>, extraídas a una profundidad de 30 cm desde cada unidad productiva.

Para facilitar la extracción de lombrices situadas a mayor profundidad, se agregaron 2 L de una solución de mostaza, la cual permitió irritar a las lombrices, provocando que éstas salgan a la superficie. Finalmente, se registró el número total de lombrices, considerando aquellas halladas en las muestras de suelo y las que aparecieron después de la aplicación de la solución de mostaza.

El valor óptimo (100) fue definido como el mayor número de lombrices/m<sup>2</sup> encontradas, siendo el de los años restantes el porcentaje sobre este valor.

### Indicadores económicos

Para determinar el nivel de rentabilidad del sistema, se utilizaron como indicadores el Ingreso anual y la Relación Beneficio-Costo, mientras que para caracterizar la eficiencia económica se utilizó el Retorno de la tierra, propuesto por Museau (2007). Cabe destacar que para los cálculos se consideraron los productos finales del sistema y no los productos intermediarios que se utilizan como insumos. No se consideraron los costos e ingresos generados por concepto de capacitación (cursos, talleres y visitas PRODESAL). Los costos incluyeron los insumos agrícolas y animales, los salarios y los servicios. A continuación, se presentan las fórmulas usadas para el cálculo de los indicadores:

**Ingresos netos anuales (\$/año) = Ingreso Producción Vegetal + Ingreso Producción Animal**

- Ingreso Producción Vegetal (\$) = (Producción Bruta Vegetal - Pérdidas) (kg) \* Precio de venta (\$ kg<sup>-1</sup>)
- Ingreso Producción Animal (\$) = Producción Bruta Animal (unidad animal) \* Precio de venta (\$/unidad) + Productos animales (unidad) \* Precio de venta (\$/unidad)

El valor óptimo (100) correspondió al mayor ingreso anual percibido, siendo el de los años restantes el porcentaje sobre este valor.

**Relación Beneficio-Costo (%) = (Beneficio/Costo total) \* 100**

- Costo total (\$) = Costos explícitos + Costos valorizados
  - Costos explícitos (\$) = Costos de insumos + Costos de mano de obra + Costos de servicios + Compra de animales
  - Costos valorizados (\$) = Costos de mano de obra familiar + Costos de donaciones y servicios
- Beneficio = Ingreso – Costo total

**Retorno de la tierra (RT) = Beneficio/Superficie agrícola utilizada**

**Número de especies de importancia económica (NEIE).** Este indicador corresponde al número de especies animales y vegetales manipuladas en la explotación con fines comerciales, es decir, son aquellas que participan en la generación del ingreso. Parte de esta información se utilizó en el cálculo de la diversidad agrícola a través del Índice de Shannon-Weaver (H).

Se asignó el valor 100 al máximo número de especies identificadas con fines comerciales, siendo el de los años restantes el porcentaje sobre este valor.

**Número de fuentes de ingreso predial.** Corresponde a la cantidad total de rubros o productos agrícolas, animales y forestales que contribuyen a la generación del ingreso. Se asignó el valor 100 al máximo número de fuentes de ingreso identificadas, siendo el de los años restantes el porcentaje sobre este valor.

**Índice de Herfindahl.** El Índice de Herfindahl es una medida estadística de la concentración de la oferta, ya sea dentro de una industria o mercado, o dentro de una empresa. Corresponde a la sumatoria de los cuadrados de todas las empresas dentro de una industria o mercado, o bien de todos los rubros en los que se desempeña una empresa (Sun y Shao, 2009). Para efectos de este estudio, el indicador permitió estimar la participación de cada rubro en el ingreso total de la producción silvoagropecuaria, otorgando información sobre su diversidad productiva y su grado de resiliencia económica.

El índice se expresa como:

$$H = \sum_{i=1}^N X_i^2$$

donde,  $X_i$  es el porcentaje del rubro respecto del ingreso total; y N corresponde al número de rubros de la explotación.

El valor óptimo está determinado por la expresión  $1/N$ , la cual refleja la situación de competencia perfecta entre los rubros. Valores más altos (cercaos a 1) indican mayor concentración del ingreso total en pocos rubros, mientras que valores menores implican lo contrario.

**Producción de abonos orgánicos.** El nivel de producción de abonos orgánicos corresponde al volumen ( $m^3$ ) de compost y vermicompost producido dentro del predio para fines de fertilización o comercialización. Se consideró como valor óptimo (100) al mayor volumen obtenido.

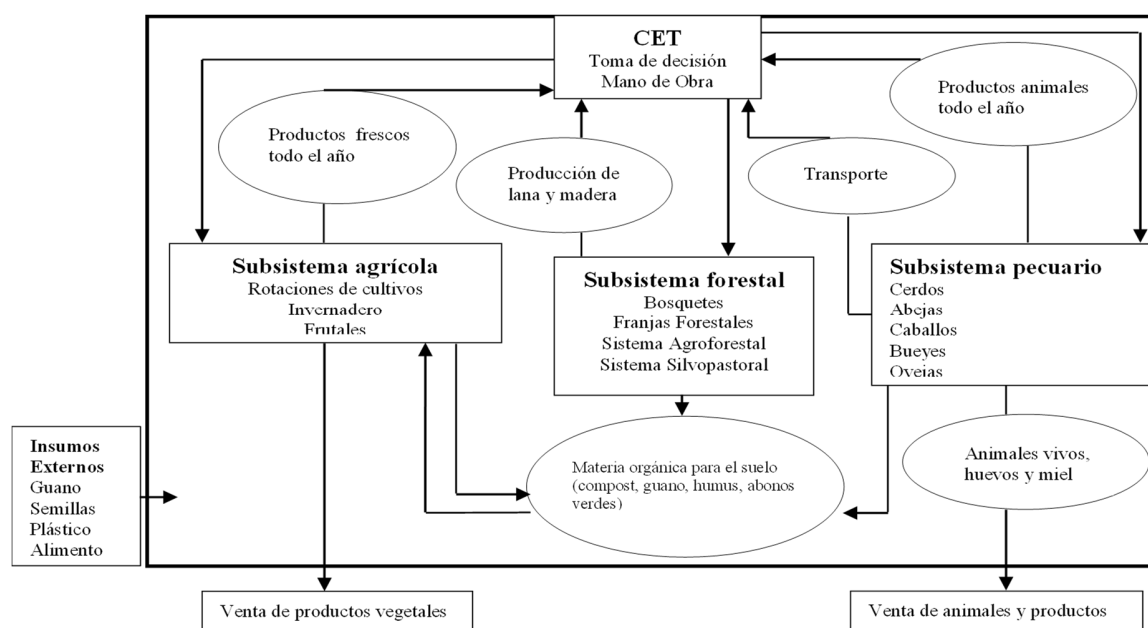
**Independencia de Insumos Externos (IDIE).** Este indicador representa la proporción del costo total que es utilizada en la compra de insumos, la cual se expresa en porcentaje. Se consideró como valor óptimo (100) al menor porcentaje obtenido.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización general del agroecosistema

La unidad predial corresponde a un sistema de producción silvoagropecuaria cuyo diseño y manejo permiten integrar e interrelacionar los recursos existentes y potenciar la biodiversidad, el reciclaje y la agregación de valor de sus productos y subproductos agrícolas, ganaderos y forestales.

El sistema predial está dividido en tres zonas o subsistemas (Figura 4) con aptitudes productivas determinadas por la pendiente, la calidad del suelo y la disponibilidad de agua del sector en el que se encuentran. Por ejemplo, en sectores de altas pendientes (>25 %) y suelos más erosionados se establecen sistemas forestales (principalmente eucaliptus) con cero labranza. En sectores de pendientes moderadas (5-25%), se establecen especies frutales como vid, arándano, frambuesa y manzano. Por último, en sectores de baja pendiente, se encuentran las rotaciones de cereales-leguminosas y hortalizas como tomate, cilantro y lechuga. En invierno, algunas de ellas se cultivan en invernadero. El Anexo 2 muestra la distribución espacial de los subsistemas y unidades productivas que conforman el sistema predial.



**Figura 4.** Esquema del funcionamiento predial del CET (Modificado de Museau, 2007).



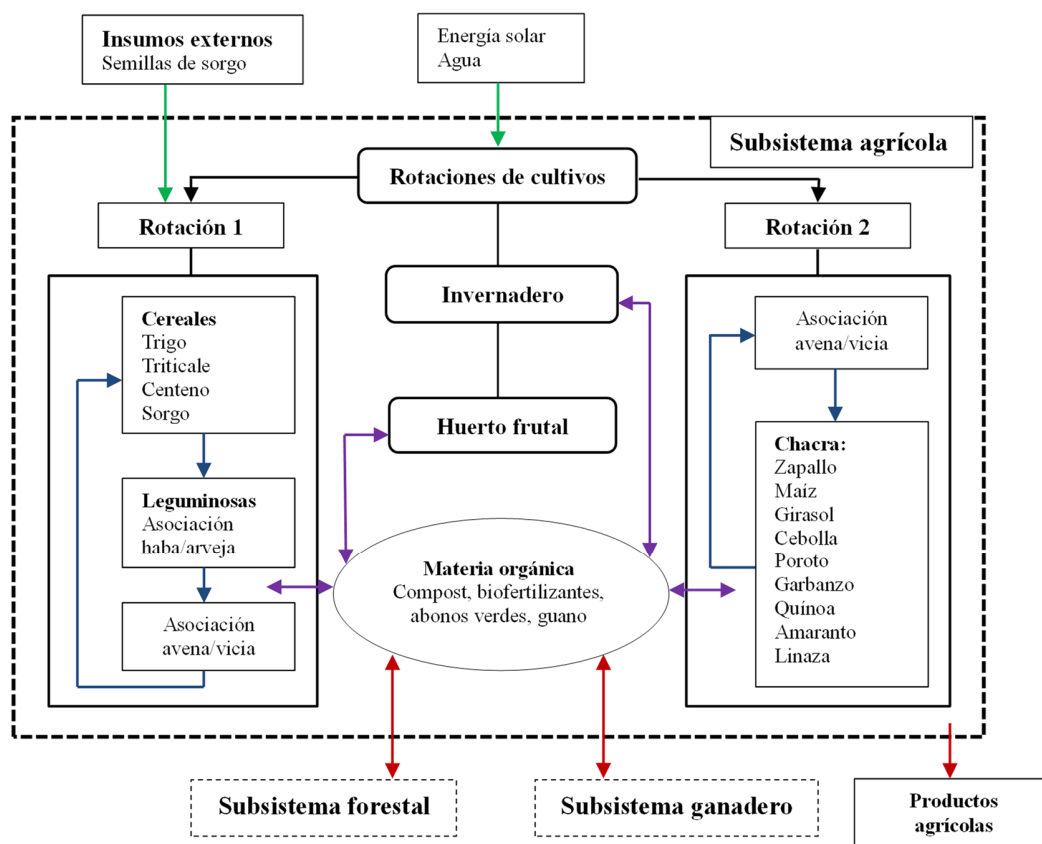
## Caracterización de subsistemas y unidades productivas

### Subsistema agrícola

El subsistema agrícola comprende una superficie total de 0,9 ha. Produce gran parte del material vegetal del predio, siendo los productos frescos y procesados destinados a la venta y al autoconsumo. Los residuos orgánicos de las cosechas (rastros y restos de poda) se utilizan en la elaboración de abonos naturales o en alimentación animal. En términos generales, el manejo de este subsistema consiste en:

- Utilización de policultivos en forma de asociaciones y rotaciones durante todo el año. De esta manera, se maximiza la productividad por unidad de superficie. Las rotaciones ayudan al control natural de plagas y enfermedades y aseguran el aporte de nitrógeno por parte de las leguminosas.
- La labranza es de tipo vertical, por lo que la labor no provoca la inversión de los horizontes del suelo. En algunas ocasiones, se practica la labranza mínima, utilizando sólo un arado cincel de puntas flexibles.
- La fertilidad del suelo es manejada a través de la aplicación de enmiendas orgánicas. Los rastros de los cultivos, el guano y los restos de poda se utilizan para la elaboración de compost. La fertilización de los cultivos se realiza mediante aplicaciones de biofertilizantes líquidos (té de humus, té de compost, Súpermagro, Biol y purines), los cuales se preparan en el mismo predio.
- El control de plagas y enfermedades se basa en un manejo integral que incluye rotaciones y asociaciones de cultivos, corredores biológicos, cubiertas vegetales, cultivo de flores y mantención de “malezas favorables” para el control de insectos. Además, se utilizan biocidas y repelentes a base de especies como cebolla, ajo, ají, manzanilla, ajeno, ruda y tabaco.
- El control de malezas se realiza mediante la combinación de diversas prácticas, con el objetivo de reducir la presión de selección en torno a un método de control específico. Sin embargo, la presencia de malezas no es un problema importante en los cultivos y frutales, dado el alto nivel de diversidad que presenta el agroecosistema.

Dentro de este subsistema, se identificaron tres unidades productivas principales: la rotación de cultivos, la producción bajo invernadero y el huerto frutal (Figura 5).



**Figura 5.** Diagrama del subsistema agrícola del CET, describiendo los sistemas de rotación.

**Rotación de cultivos.** La rotación de cultivos abarca una superficie aproximada de 5.700 m<sup>2</sup>, ocupando posiciones de topografía plana, con pendientes entre 0,5 y 4,5%. Para efectos de este estudio, sólo se consideró los sistemas de rotación extensivos, excluyendo la producción del huerto familiar intensivo.

La rotación obedece al ordenamiento de los cultivos más tradicionales de la agricultura de secano, tales como trigo, lenteja, haba, avena/vicia y pradera (trébol subterráneo, festuca, falaris y ballica) (Infante y San Martín, 2004). Sin embargo, en los últimos años se han incorporado nuevas especies a la rotación, tales como triticale (*X Triticosecale* Wittmack), centeno (*Secale cereale* L.), trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum* M.) y sorgo (*Sorghum* spp.), cuyas características genotípicas permiten su adaptación en una amplia gama de medioambientes, especialmente en condiciones de secano (Mellado *et al.*, 2008).

**Producción bajo invernadero.** Esta unidad productiva ocupa una superficie plana de 316 m<sup>2</sup>. Al ser un sistema intensivo, contribuye significativamente a la producción y generación de ingresos. Además, permite el cultivo de diversas hortalizas en forma simultánea y permanente, por lo que asegura la disponibilidad de productos para la venta y el autoconsumo durante todo el año.

Las principales especies cultivadas bajo invernadero son hortalizas como tomate, lechuga, acelga, pepino, zapallo italiano, haba, arveja, cilantro, perejil y rabanito.

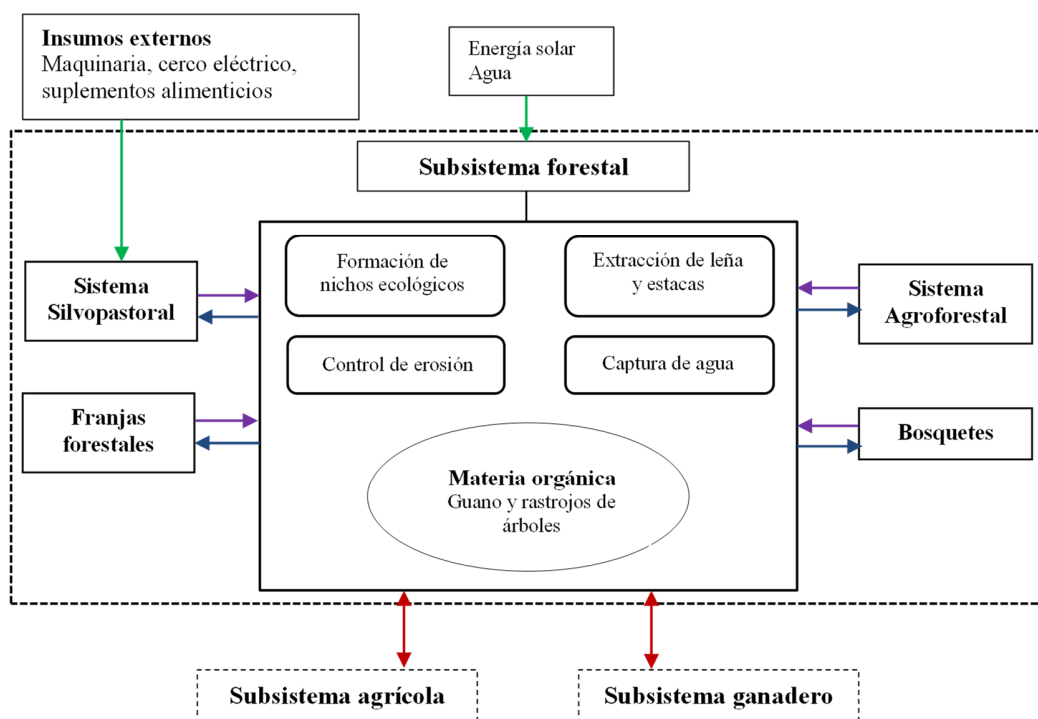
**Huerto frutal.** El huerto frutal posee una superficie total cercana a los 3.300 m<sup>2</sup>. Corresponde a un policultivo formado por frutales menores como berries (arándano, frutilla, frambuesa, mora cultivada y golden berry); por frutales mayores de diversas familias, principalmente pomáceas (manzano, peral y membrillero) y carozos (duraznero, ciruelo y cerezo); y por una viña para la producción de uva de mesa. Alrededor de estos cultivos, conviven árboles como el espino, el aramo y el ciprés.

Además de su fin productivo, la presencia de frutales mayores apunta a proveer servicios ecológicos. Los marcos de plantación se encuentran traslapados para optimizar el uso del espacio y potenciar la interacción biológica entre las especies.

### **Subsistema forestal**

El subsistema forestal consta de una superficie de 2,1 ha, donde se identifican cuatro elementos principales: los bosquetes, las franjas forestales, los sistemas agroforestales y los sistemas silvopastorales (Figura 6). Estos elementos se emplazan en zonas de pendiente inclinada (>25%) cumpliendo múltiples funciones, tales como preservación de especies nativas (ciprés, espino, boldo, maqui, corcolén, entre otros), estabilización de procesos erosivos, protección contra el viento, refugio para animales, nicho para controladores biológicos y producción de madera de pino y eucalipto. La intervención humana en este subsistema es casi nula, salvo en los sistemas agroforestales donde se realizan labores agrícolas.

**Bosquetes.** Los bosquetes se sitúan en tres sectores que suman una superficie total de 6000 m<sup>2</sup>. Están constituidos por un bosque donde se desarrollan especies como corcolén (*Azara serrata* L.), quillay (*Quillaja saponaria* L.), maqui (*Aristotelia chilensis* Mol. Stunz), boldo (*Peumus boldus* Mol.) y otros árboles nativos. La función principal de los bosquetes es proporcionar servicios ambientales, tales como el control de erosión, la captura de agua, el aumento de biodiversidad y la formación de nichos ecológicos para insectos benéficos (predadores y polinizadores) y fauna silvestre.



**Figura 6.** Diagrama del subsistema forestal del CET.

**Franjas forestales.** Corresponden a 7 franjas separadas que en total forman 1 ha. Cada una posee alrededor de 130 árboles de eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.) de 18 años de edad. Desde hace 10 años se extraen unos 40 m<sup>3</sup> de leña, postes y estacas desde esta unidad productiva. Además, proporciona algunos servicios ambientales como cortina cortaviento, aislamiento y formación de nichos para fauna silvestre.

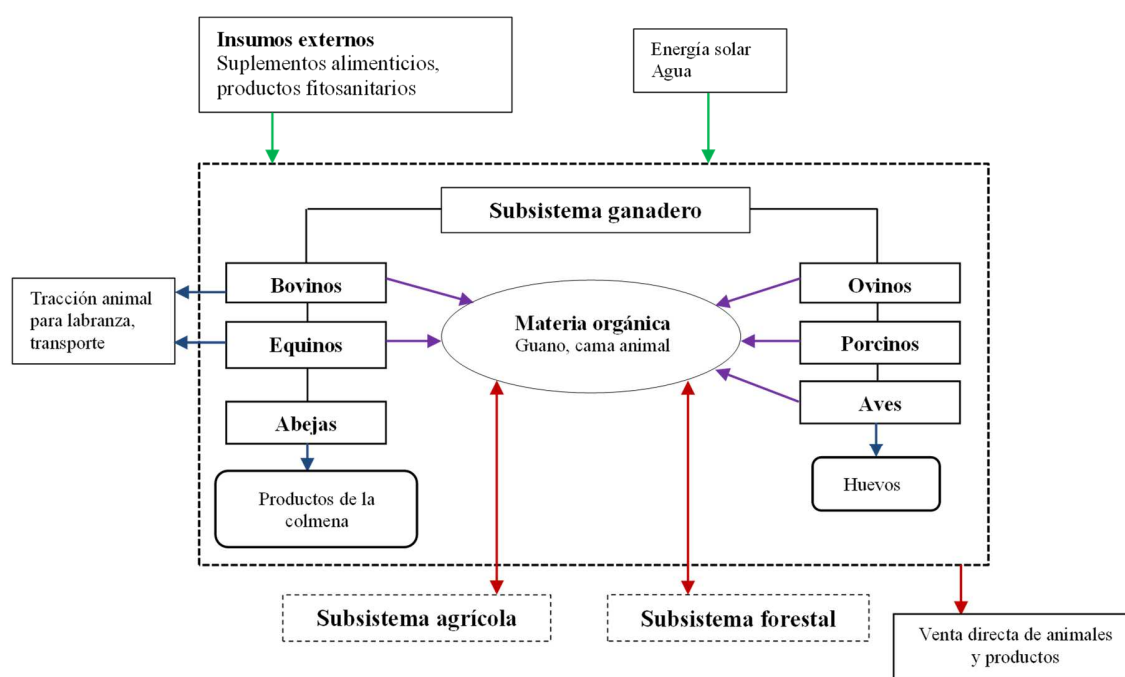
**Sistema Silvopastoral.** El sistema silvopastoral comprende una superficie aproximada de 3.500 m<sup>2</sup>. Posee árboles, pastos y animales en terrazas construidas sobre curvas de nivel. Los árboles son multipropósito (frutales, forrajeros, melíferos y forestales para leña y estacas); las especies que forman la pradera son festuca (*Festuca arundinacea* Shreb) y trébol subterráneo (*Trifolium subterraneum* L.). La carga animal es de 5 corderos y 32 cerdos. Destaca la utilización del pastoreo rotativo utilizando cercos eléctricos como método de control.

La madera se utiliza para energía e infraestructura predial, lo que permite una reducción importante de gastos (\$620.000 al año). El guano animal obtenido en este sistema, se aprovecha para el mejoramiento del mismo suelo y/o la elaboración de biofertilizantes y abonos.

**Sistema Agroforestal.** Corresponde a un área de 1.200 m<sup>2</sup>, donde se combinan 30 plantas de espino (*Acacia caven* Mol.) de 30 años de edad, con trigo, avena-vicia o haba-arveja, de acuerdo con el sistema de rotación señalado en el subsistema agrícola. Su función principal es proveer de servicios ecológicos como cortina cortaviento, sombreado, bombeo de nutrientes y agua en el suelo, control de erosión, formación de nichos ecológicos y extracción de leña.

### Subsistema ganadero

El subsistema ganadero contempla la crianza de cerdos, aves, abejas y eventualmente de caballos y vacas (Figura 7). La crianza de abejas, basada en técnicas naturales, constituye el rubro más importante en la generación de ingresos. La venta de núcleos de abejas, miel y subproductos de la colmena (propóleo, cera, apitoxina) hacen que esta actividad sea muy rentable. Le sigue en importancia la venta directa de otros recursos pecuarios como huevos, aves y cerdos.



**Figura 7.** Diagrama del subsistema ganadero del CET.

El **Cuadro 2** resume las características del sistema predial del CET, desde el punto de vista biofísico, tecnológico y de manejo.

**Cuadro 2.** Síntesis de características del sistema predial del CET, desde el punto de vista biofísico, tecnológico y de manejo.

Determinantes del agroecosistema		Sistema predial del CET
Biofísicas	Clima	Mediterráneo (templado cálido), con niveles de precipitación cercanos a los 1100 mm anuales. El mes más seco es enero con 16 mm, mientras que el mes más lluvioso es junio con 256,4 mm. La temperatura media anual es de 13,7°C, siendo la media del mes más cálido (enero) de 20,6°C y la media del mes más frío (julio) de 8,2°C. Son frecuentes las heladas en los meses de agosto y septiembre.
	Vegetación	Bosque nativo (matorral esclerófilo) remanente de quillay, maqui, boldo, corcolén, espino, entre otros. Praderas naturales de festuca, ballica y trébol.
	Suelo	El suelo del predio pertenece a la Serie Cauquenes, Orden Alfisol, derivado de rocas graníticas, moderadamente profundo, de textura franco arcillo arenosa, con bajos niveles de macronutrientes y materia orgánica.
Tecnológicas y de Manejo	Subsistema Pecuario	<b>Especies:</b> Ovinos, cerdos, aves y abejas. <b>Objetivo de la producción:</b> Ovinos, cerdos y aves se destinan para venta, obtención de subproductos, o servicios ecológicos. La crianza de abejas provee miel y subproductos de la colmena. <b>Tipo de explotación ganadera:</b> Intensiva y semi-extensiva, con alimentación suplementaria <b>Época de venta:</b> Todo el año <b>Pradera:</b> Natural y pasturas
	Subsistema forestal	Extracción de leña y madera de pino y eucalipto, desde franjas forestales y sistemas agroforestales.
	Subsistema agrícola	Establecimiento de policultivos de cereales, leguminosas, hortalizas y frutales. Entre los tres primeros destacan el trigo, sorgo, centeno, avena, habas, porotos, arvejas, tomate, lechuga, acelga, betarraga, cebolla, zapallo, maíz y girasol. Entre los frutales destaca el arándano, mora, frambuesa, frutilla y membrillero. <b>Objetivo de la producción:</b> Autoconsumo y eventualmente venta <b>Manejo del suelo:</b> Labranza vertical con tracción animal y preparación secundaria manual <b>Fertilización:</b> Aplicación de materia orgánica y biofertilizantes <b>Manejo de plagas y enfermedades:</b> Diseño predial, control biológico, labores culturales y preparados naturales <b>Riego:</b> Tecnificado por goteo o aspersión <b>Disponibilidad de agua:</b> Captación de agua de lluvia, bombas hidráulicas, pozos <b>Manejo de malezas:</b> Diseño predial, rotaciones, control manual <b>Mano de obra:</b> Familiar y externa <b>Prácticas de conservación:</b> Curvas de nivel, terrazas y zanjas de infiltración; cero labranza y cubiertas vegetales

### Identificación de los puntos críticos del agroecosistema

Los antecedentes bibliográficos disponibles indican que, entre los años de estudio, los agroecosistemas del Secano Interior han sido afectados por dos problemas ambientales graves que son:

- a. Pérdida de cobertura vegetal y biodiversidad
- b. Erosión de suelos

Respecto a la pérdida de cobertura vegetal, Balduzzi *et al.* (1981) señala que la mayor parte de los ecosistemas del secano fueron fuertemente artificializados durante la segunda mitad del siglo XIX, presentando actualmente una vegetación degradada y poco diversificada. La pérdida o destrucción parcial de las cubiertas vegetales ha sido causada principalmente por una agricultura intensiva en laderas, sin la adopción de medidas preventivas.

Especial atención recibe la expansión de las plantaciones forestales hacia sectores de alta fragilidad (lomajes con más de 20% de pendiente), cuya magnitud alcanza las 120.000 ha año<sup>-1</sup> de pino (*Pinus radiata* D. Don.) y eucaliptus (*Eucalyptus globulus* L.) (Museau, 2007). Esta expansión se ha realizado en desmedro de la actividad agrícola, generando una desarticulación de la estructura rural de la zona. Desde el punto de vista ecológico, la plantación de especies forestales en forma de monocultivo produce la pérdida de biodiversidad a nivel de paisaje, lo que conlleva a la desestabilización del ecosistema y a la disminución de su potencial productivo y regenerativo.

En relación a la erosión de suelos, Peña y Carrasco (1993) reportaron que el 91,9% de los suelos del Secano Interior y parte de la Cordillera de la Costa (488.040 de 531.043 ha), presenta erosión moderada a muy severa. Esta situación fue representada gráficamente por Barrera (2005) en un mapa de erosión de suelos de la región, actualizado posteriormente por CIREN (2010) (Anexo 4).

Los intensos procesos erosivos, tanto de origen antrópico como geológico, han impactado negativamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Según Museau (2007), las principales limitantes nutricionales de los suelos del Secano Interior de la Región del Bío-bío son las deficiencias de nitrógeno, fósforo y en menor grado de potasio. También son comunes las deficiencias de azufre y algunos micronutrientes como zinc y boro (Ovalle y Del Pozo, 1994). Un estudio de fertilidad de suelos en predios agrícolas realizado durante los 10 últimos años, mostró valores de 11 ppm de N (inferior al nivel suficiente de 80 ppm) y 7 ppm de P-Olsen (inferior al nivel suficiente de 20 ppm), mientras que el nivel promedio de K se mantuvo alto (129 ppm) (Museau, 2007).

Otro estudio efectuado por el SAG (1994) sobre sedimentos erodados y agua de escorrentía captada, arrojó pérdidas anuales promedio de materia orgánica y N total que fluctuaron entre 1,7 y 1,9 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, y entre 45 y 82 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente. De acuerdo a Ortega (2000), el contenido de materia orgánica de los suelos del Secano Interior es muy bajo, con un valor promedio de 2,3%. La pérdida de materia orgánica, especialmente en los primeros 30 cm de suelo, se ha traducido en una mayor compactación, una menor capacidad de infiltración de agua y una menor estabilidad estructural (Baginsky *et al.*, 2010), lo que reduce la resistencia física de los suelos frente al impacto de las gotas de lluvia y al efecto de la escorrentía (Zhang *et al.*, 2005).

A la situación descrita se suman algunas emergencias climáticas ocurridas durante las últimas décadas en la Región del Bío-bío, tales como inundaciones, sequías y heladas. Al respecto, Maldonado y Ruiz (2008) informaron que los años de mayor déficit hídrico en la zona fueron 1998 y 2007, con una reducción de la pluviometría mayor a 50% respecto de un año normal y una evapotranspiración superior a las lluvias (Anexo 9). En cuanto a las heladas, en el período 2000-2007 se registraron temperaturas mínimas de hasta -5,6°C. Otros problemas que afectan a la pequeña agricultura del secano son la dependencia de insumos externos, el alto costo de los fertilizantes nitrogenados y plaguicidas, la baja capacidad económica de los productores, el uso de variedades de bajo rendimiento y calidad (Riquelme, 1994); y la aplicación de prácticas inadecuadas como la quema de rastrojos, el sobrepastoreo y el laboreo con arado de vertedera reversible sobre suelos con excesiva pendiente (Infante, 2013).

En consecuencia, un alto porcentaje de los suelos del secano han quedado marginados por completo del uso productivo, provocando serios problemas de sedimentación en los cursos de agua. Los suelos más bajos o vegas han recibido toda la sedimentación de los lomajes, siendo enterrados por capas de arena infértil (Infante e Infante, 2013).

Considerando los antecedentes expuestos, se sintetizó los puntos críticos hacia los cuales se enfoca la evaluación de sustentabilidad. En el Cuadro 3, se identifican los puntos favorables y desfavorables presentes en el sistema productivo del CET, en función de los atributos de sustentabilidad y del contexto agroambiental descrito.



**Cuadro 3.** Puntos críticos del sistema predial del CET, de acuerdo al contexto agroambiental del secano de la Región del Bío-bío.

Atributos	Puntos críticos del agroecosistema	
	Favorables	Desfavorables
Productividad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integración de agricultura, ganadería y forestería</li> <li>- Alta calidad organoléptica y nutricional de los productos (orgánicos)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta demanda de mano de obra</li> <li>- Alta inversión inicial</li> <li>- Condiciones climáticas adversas (heladas, lluvias estivales y sequías)</li> </ul>
Estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reciclaje de materia orgánica (rastros, restos de poda y guano)</li> <li>- Recuperación de la biota del suelo</li> <li>- Prácticas de conservación de suelos</li> <li>- Aprovechamiento intensivo de las unidades productivas</li> <li>- Alta diversidad productiva a nivel predial</li> <li>- Cobertura vegetal permanente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estacionalidad marcada</li> <li>- Productividad y rentabilidad variable</li> <li>- Suelos con escasa materia orgánica</li> <li>- Suelos con alto nivel de degradación</li> <li>- Dificultad en el control de plagas y enfermedades a corto plazo</li> <li>- Dificultad en el control de malezas</li> <li>- Escasa pradera para los animales</li> <li>- Baja disponibilidad de agua</li> <li>- Escasa presencia de vegetación nativa</li> <li>- Baja cobertura vegetal</li> </ul>
Resiliencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta diversificación productiva</li> <li>- Conocimientos tradicionales aplicados al sistema de manejo</li> <li>- Adopción de nuevas técnicas agroecológicas</li> <li>- Valorización de los recursos disponibles y sus interrelaciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oferta y demanda variables</li> <li>- Baja resistencia al cambio climático (sequías, heladas)</li> <li>- Variación de los precios</li> </ul>
Autogestión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Existencia de una organización funcional permanente</li> <li>- Monitoreo de la salud del predio (registro periódico de variables)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dependencia de insumos externos</li> <li>- Autoabastecimiento inestable</li> </ul>

### Determinación de los criterios de diagnóstico y selección de indicadores

En base a los puntos críticos identificados, se determinaron los criterios de diagnóstico y se derivó una lista de indicadores para cada criterio. El Cuadro 4 muestra un resumen de los atributos generales, los puntos críticos, los criterios de diagnóstico y el listado definitivo de indicadores seleccionados.

**Cuadro 4.** Indicadores agroambientales y económicos seleccionados.

Atributos generales	Puntos críticos	Criterios de diagnóstico	Indicadores	Área de evaluación (*)	Método de medición (**)	Unidad de medida	
Productividad	Baja productividad	Eficiencia	Producción agrícola	A	C	kg/ha	
			Ingresos netos anuales	E	R	\$/año	
	Baja rentabilidad		Relación Beneficio-Costo	E	R	Coficiente	
			Retorno de la tierra	E	R	\$/ha	
Estabilidad	Baja biodiversidad	Uso del paisaje	Índice de diversidad biológica	A	C	Coficiente	
		Especies manejadas	Índice de diversidad agrícola	A	C	Coficiente	
	Deterioro y agotamiento de los recursos naturales	Conservación de recursos	Cobertura vegetal		A	C	%
			Pérdidas de suelo por erosión hídrica		A	C/R	t/ha/año
		Fertilidad del suelo	Materia orgánica del suelo		A	L	%
			Estabilidad estructural del suelo		A	L	% RD
	Densidad de lombrices		A	C	Lombrices/m <sup>2</sup>		
	Resiliencia	Riesgo climático (sequía)	Diversificación productiva	Número de especies de importancia económica (NEIE)	E	R	Número
Fluctuaciones del mercado		Fuentes de ingreso predial		E	R	Número	
		Índice de Herfindahl		E	R	Coficiente	
Autogestión	Dependencia de insumos externos	Autosuficiencia	Nivel de producción de abonos orgánicos	E	R	m <sup>3</sup>	
	Reutilización de residuos y aprovechamiento de recursos disponibles	Existencia de una organización funcional	Independencia de insumos externos (IDIE)	E	R	%	

\* **A:** Agroambiental; **E:** Económico

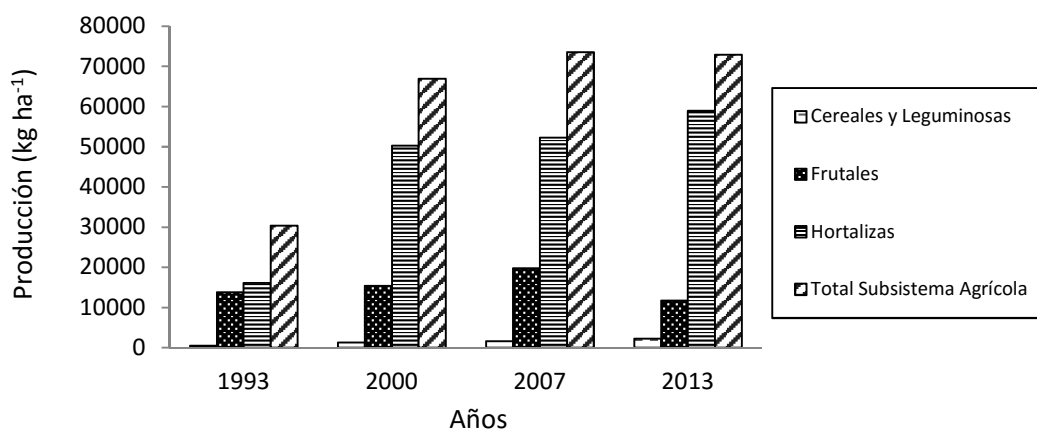
\*\* **C:** estimación en campo; **R:** registros y/o literatura; **L:** análisis en laboratorio.

### Análisis de resultados e integración gráfica

A continuación, se presenta la interpretación y análisis de los valores obtenidos por cada indicador. Posteriormente, en la gráfica radial se ilustran los resultados de los 16 indicadores, reflejando el nivel de sustentabilidad predial en cada año de evaluación.

#### Indicadores agroambientales

**Producción agrícola.** La Figura 8 muestra los resultados de la producción del subsistema agrícola a lo largo del tiempo, indicando los valores obtenidos en el año 2013 ( $t_3$ ), 2007 ( $t_2$ ), 2000 ( $t_1$ ) y el estado inicial 1993 ( $t_0$ ). La producción de la temporada 2007 presentó el valor más alto (100), con un nivel de 73.578,4 kg ha<sup>-1</sup>, mientras que los años 2013, 2000 y 1993 presentaron un nivel de 72.853,9 (99), 66.918 (91) y 30.362 (41,3) kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.



**Figura 8.** Niveles de producción del subsistema agrícola y sus unidades de manejo, obtenidos en los años considerados en el estudio.

Los resultados reflejan un progreso en la capacidad productiva del subsistema agrícola, con un incremento de 140% en 20 años. En general, este aumento se debió a la incorporación de nuevas especies agrícolas a la explotación en forma de policultivos y a un mayor rendimiento por especie. Lo anterior concuerda con Liebman (1999), quien sostiene que el establecimiento de combinaciones de cultivos en diseños espaciales y temporales (policultivos simultáneos o de relevo), permite optimizar la eficiencia productiva y ampliar la oferta de alimentos durante la temporada. Este aspecto está directamente relacionado con el índice de diversidad productiva, por lo que será discutido con mayor profundidad en el análisis de este indicador.

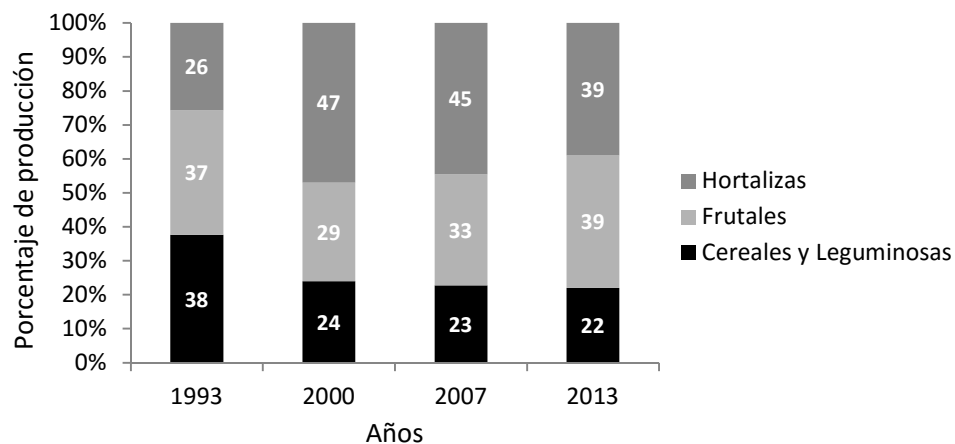
El mayor incremento en la productividad total se produjo en el período 1993-2000, siendo el rubro de hortalizas el que presentó el mayor aumento (212%), seguido del rubro de frutales y de cultivos con un aumento de 11,6% y 173% respectivamente entre estos años. En los años siguientes, las variaciones no fueron tan significativas puesto que el sistema de producción agroecológica ya se encontraba establecido, centrándose los esfuerzos técnicos tanto en el perfeccionamiento del diseño predial como en la evaluación de nuevas prácticas y tecnologías. El Cuadro 5 presenta las variaciones porcentuales de productividad entre cada año.

**Cuadro 5.** Variación porcentual de producción del subsistema agrícola entre los años considerados en el estudio.

Año	Producción anual (kg/ha)	Período	Variación porcentual por período (%)
1993	30.362	1993-2000	120
2000	66.918	2000-2007	10
2007	73.578	2007-2013	-1
2013	72.854		

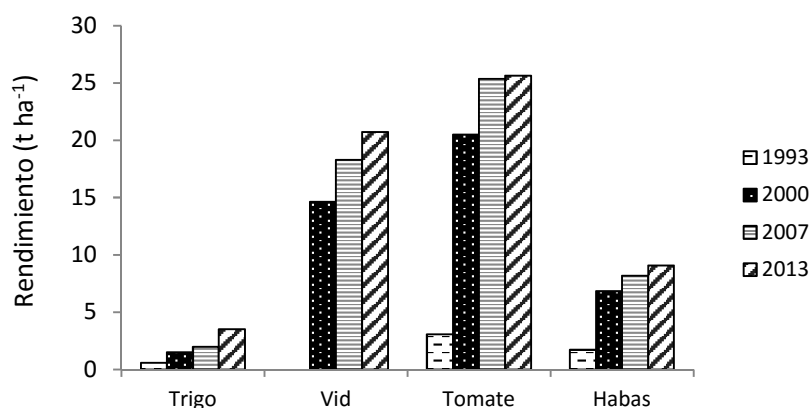
Entre los años 1993 y 2000 la producción agrícola total aumentó en un 120%, como resultado de la adopción del esquema agroecológico. Los principales cambios de manejo involucrados en su implementación fueron:

- a. Instalación de riego tecnificado en todas las unidades productivas.
- b. Construcción de un invernadero para el cultivo intensivo de hortalizas.
- c. Integración de nuevas especies animales a la explotación. Los guanos animales contribuyeron a incrementar el volumen y variedad de bioabonos elaborados dentro del predio, de 10 m<sup>3</sup> de compost en 1993 a 50 m<sup>3</sup> en 2000).
- d. Establecimiento de un sistema de rotación más largo y diverso, reemplazando potreros ocupados con praderas por asociaciones de gramíneas y leguminosas tradicionales del secano (Infante y San Martín, 2004).



**Figura 9.** Aporte porcentual, referido a peso fresco, de las unidades de manejo respecto de la productividad total obtenida en los años considerados en el estudio.

De acuerdo a la Figura 9, existe una redistribución de las unidades de manejo según su aporte a la productividad total del sistema. Desde los años 1993 y 2000, la participación de hortalizas (invernadero), cereales y leguminosas (rotaciones) tuvo una tendencia a disminuir y luego a mantenerse en el tiempo, en tanto que las especies frutales adquirieron cada vez mayor relevancia. En el año 2013, la contribución de hortalizas y frutales tendió a igualarse, alcanzando ambos rubros un 39%. Dada la mayor rentabilidad de las especies frutales, éstas pasaron a formar parte importante del ingreso, lo que trajo consigo una mayor demanda de insumos, tecnología y mano de obra (ver resultados de indicadores económicos). Sin embargo, el cultivo tradicional de hortalizas continúa siendo un elemento fundamental en la propuesta tecnológica del CET, ya que constituye una fuente permanente de recursos para los pequeños agricultores del secano.



**Figura 10.** Rendimiento de los principales cultivos del subsistema agrícola.

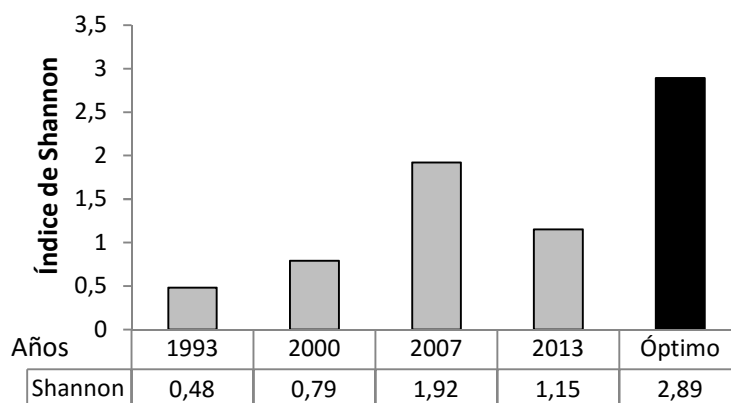
Entre los años 1993 y 2007, la producción de los principales rubros agrícolas muestra un importante aumento en el tiempo, destacando el cultivo de tomate y de vid. En el caso del tomate, el mayor rendimiento (de 3 t ha<sup>-1</sup> en 1993 a 25,6 t ha<sup>-1</sup> en 2013) se asoció a cambios de manejo como el cultivo bajo plástico, la conducción de las plantas (conducción y poda a un eje sin despuntar), el riego tecnificado y la fertilización orgánica en dosis crecientes. Por otra parte, el diseño del huerto bajo invernadero incorporó asociaciones y rotaciones con otras especies de hortalizas y flores, lo que permitió promover el control biológico de plagas y enfermedades (Willey, 1990). Este último aspecto es de especial relevancia, si se tiene en cuenta que algunos sistemas alternativos de la zona han mostrado altos niveles de daño causado por la polilla del tomate (*Tuta absoluta*) y fusarium (*Fusarium oxysporum*), alcanzando pérdidas de hasta un 40% (Museau, 2007).

La producción de uva de mesa se inicia en el año 2000 con un rendimiento de 14,6 t ha<sup>-1</sup>. Posteriormente, aumentó hasta 18,3 t ha<sup>-1</sup> en 2007, debido a la implementación del sistema de conducción en espaldera, la adopción de la poda apitonada y la siembra anual de avena-vicia sobre la hilera de plantación como cultivo de cobertura. El rendimiento de uva de mesa en el año 2013 fue de 20,7 t ha<sup>-1</sup>, superando al valor de referencia de la comuna (12 t ha<sup>-1</sup>) obtenido por Museau (2007) en el mismo predio.

Al igual que el resto de las gramíneas, el trigo incrementó su rendimiento como respuesta a las mejores condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo logradas en el sistema de rotación con leguminosas. El rendimiento en el año 2013 fue de 35 qq ha<sup>-1</sup>, nivel que supera al obtenido por Museau (2007) en el mismo predio durante los años 2000 y 2007 (15 y 20 qq ha<sup>-1</sup>, respectivamente) y a los promedios reportados por Ruiz *et al.* (2004) y Mellado (1991) (14 y 15 qq ha<sup>-1</sup> respectivamente) en condiciones de secano; sin embargo, resulta inferior al rendimiento de 45 qq ha<sup>-1</sup> obtenido por Ruiz (2013) (datos no publicados) en parcelas demostrativas del Secano Interior, conducidas por investigadores de INIA Quilamapu.

A partir del año 2000, el rendimiento de haba se vio favorecido por ajustes en la fecha de siembra y por la asociación con arvejas utilizando policultivos en franjas, alcanzando los 9 t ha<sup>-1</sup> en 2013. Ambas medidas contribuyeron a evitar la fuerte competencia que muestran las plantas de haba en sus primeros estados de desarrollo, cuando son combinadas con plantas de otra especie (Infante, 1986). De esta manera, fue posible incrementar la producción de materia seca por unidad de superficie, potenciar la fijación de N atmosférico en el suelo y mejorar las condiciones físicas del terreno para el establecimiento de gramíneas (Baginsky *et al.*, 2010) (ver resultados de indicadores de suelo).

**Índice de diversidad biológica.** El índice de diversidad biológica presentó una evolución positiva en el período 1993-2007, con una variación de 300%. Sin embargo, hacia el año 2013 disminuyó hasta alcanzar un valor de 1,15. Tanto la condición del año 2007 (1,92) como la del año 2013, fue superior a la diversidad biológica observada por Museau (2007) en sistemas alternativos del Secano Interior (promedio de 0,82), pero muy inferior al óptimo teórico de 2,89 que representa una alta diversidad distribuida homogéneamente entre las especies que la conforman.



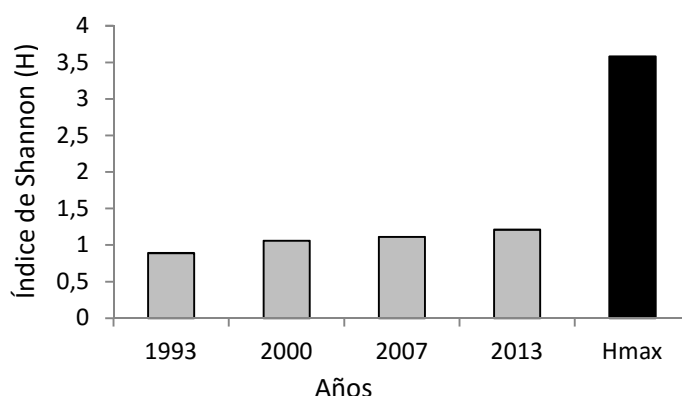
**Figura 11.** Valores del Índice de Shannon, indicando la diversidad biológica a nivel predial en cada año de evaluación.

El aumento experimentado en el período 1993-2007 se asocia a la colonización progresiva de diversas especies herbáceas comunes en la zona, las cuales son consideradas malezas. Las mejores condiciones generadas por las prácticas de conservación, el régimen de riego y la mayor calidad del suelo, propiciaron su expansión sobre el predio y especialmente sobre los sectores de cultivo. Muchas de ellas fueron manejadas como cubiertas vegetales entre las hileras de frutales, con el fin de aumentar la retención de agua en el suelo, protegerlo de la erosión y mejorar sus condiciones fisicoquímicas para favorecer a los cultivos de interés. Por esta razón, la práctica tradicional de “desmalezado” se reemplazó por mantener un crecimiento a ras de suelo de la cubierta vegetal y no de “limpiar” el suelo dejándolo descubierto.

La mantención de una alta diversidad de especies herbáceas silvestres, junto a la introducción de otras especies con funciones agroecológicas específicas, proporcionó servicios ecosistémicos a través del tiempo, tales como refugio para insectos polinizadores y enemigos naturales de plagas, materia prima para abonos verdes y mulch, alimentos para animales, entre otros.

La disminución de la diversidad biológica observada entre los años 2007 y 2013, no muestra causas evidentes asociadas a cambios de manejo. Cabe señalar que la metodología utilizada por Museau para estimar esta variable en el año 2007, tuvo algunas diferencias respecto a la utilizada en 2013, por lo que no se descartan errores en la etapa de muestreo.

**Índice de diversidad agrícola.** La diversidad agrícola presentó una leve tendencia favorable en el tiempo con un incremento de 36% en el período de 20 años (< 2% anual), debido a la incorporación progresiva de nuevas especies agrícolas a la explotación (ver resultados del NEIE) y al incremento del rendimiento por especie, especialmente del rubro de frutales. La mayor variación se observó entre 1993 y 2000 (19%), producto de los cambios de manejo descritos en el análisis de producción agrícola, que mantuvieron el cultivo simultáneo de un mayor número de especies (Figura 12).



**Figura 12.** Valores del Índice de Shannon, indicando el nivel de diversidad agrícola en cada año de evaluación.  $H_{max}$  es la máxima diversidad que es posible obtener, la cual se alcanza cuando todas las especies identificadas en la muestra están equitativamente presentes (Pla, 2006).

En el año 2013 se alcanzó el nivel más alto de diversidad agrícola con un valor de 1,21 (33,8), pero muy inferior a la diversidad máxima teórica ( $H_{max}$ ) de 3,58 calculada según la fórmula de Pla (2006). Esta amplia diferencia se debe a que sólo tres especies (tomate, haba y uva de mesa), de un total de 36, concentraron la mayor parte de la producción total. No obstante, Pla (2006) advierte que el uso de muestras pequeñas, como la utilizada en esta evaluación, puede producir valores sesgados que subestiman la agrobiodiversidad del sistema, por lo que no se descarta que la diferencia entre el valor observado y el potencial sea mayor.

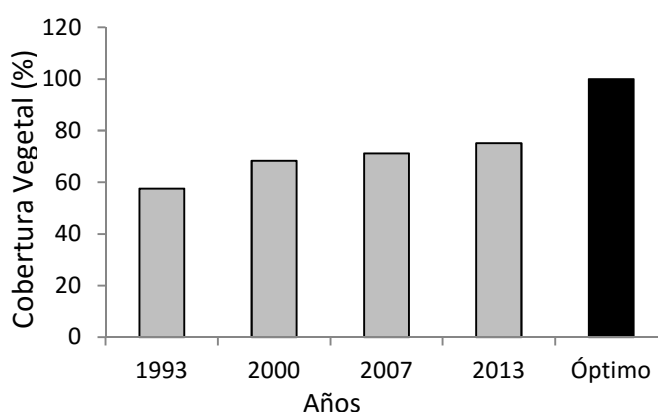
Aunque la escala temporal y el número de hitos considerados en la evaluación no resultan suficientes para explicar el efecto real de la biodiversidad sobre la resiliencia del sistema productivo, puede afirmarse que el avance logrado a través del tiempo incrementó sus funciones ecosistémicas debido a que más especies ocuparon nichos diferentes. De este modo, la presencia de varios rubros actúa como un “seguro” o “amortiguador”, que permite al agroecosistema resistir y recuperarse de perturbaciones externas, tal como se ha demostrado en las experiencias descritas por Nicholls y Altieri (2013).



Es sabido que los arreglos agroecológicos de la biodiversidad están estrechamente vinculados con la productividad de los sistemas agrícolas (Funes-Monzote *et al.*, 2013); sin embargo, no es conveniente asegurar, en este caso, que la mayor diversidad agrícola alcanzada fue el factor que determinó el aumento de la productividad total, sin un estudio de correlación previo. Según algunos autores, el incremento de la biodiversidad influye más bien de forma indirecta en la productividad, al promover interacciones y funciones sinérgicas que permiten elevar gradualmente el rendimiento de los cultivos y/o reducir el riesgo de pérdida (Morais *et al.*, 2006; Lin, 2007; Murgueitio *et al.*, 2011). Por ejemplo, un servicio importante que ofrecen los sistemas agrícolas diversificados es la oportunidad de atraer polinizadores y predadores para el control biológico de plagas, lo que favorece indirectamente el rendimiento de los cultivos (Vásquez y Álvarez, 2011).

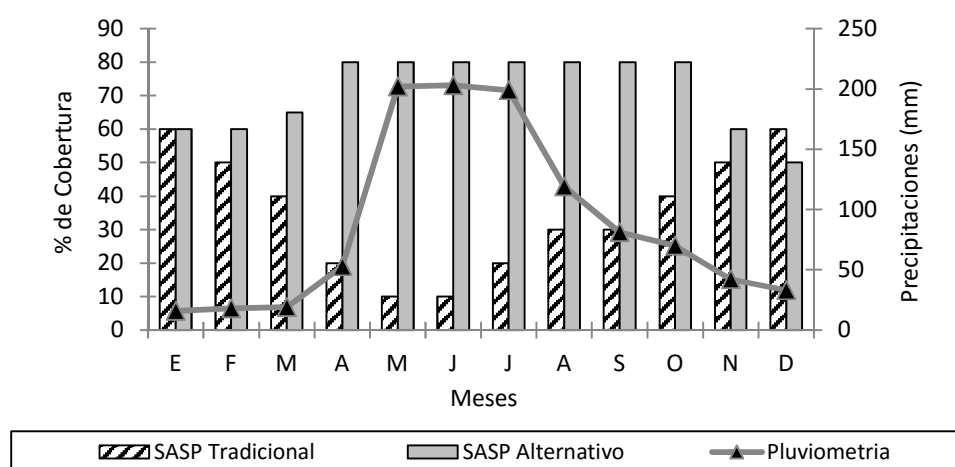
En el área económica, la mayor complejidad estructural del agroecosistema dada por la heterogeneidad de especies de interés productivo, podría mejorar la respuesta frente a períodos de baja rentabilidad de los cultivos principales, provocados ya sea por alzas en los costes de producción, bajas en los rendimientos o fluctuaciones de los precios de mercado. Esta tendencia es respaldada por Nicholls *et al.* (2013), quienes demostraron, mediante una exhaustiva revisión de experiencias en sistemas agroecológicos y convencionales de Iberoamérica, que el diseño de sistemas altamente diversificados puede proporcionar a los productores la versatilidad y flexibilidad necesaria para mantener una agricultura familiar económicamente estable en el tiempo.

**Cobertura del suelo.** El grado de cobertura del suelo se incrementó progresivamente a través del tiempo, mostrando una variación de 30,4% en el período de 20 años. Este aumento es consecuencia de la aplicación de prácticas complementarias al diseño predial, como el uso de policultivos y rotaciones. Otras estrategias como el establecimiento de cultivos de cobertura y el manejo ecológico de praderas, permitió mantener un manto vegetal semipermanente que protegió el suelo del efecto erosivo de la lluvia, especialmente durante el período invernal, cuando ésta alcanza su máxima erosividad y los potreros normalmente se encuentran en barbecho.



**Figura 13.** Porcentaje de suelo cubierto obtenido en el sistema productivo del CET.

Lo anterior concuerda con la Figura 14 (Museau, 2007), donde se observa que el nivel de cobertura de los sistemas alternativos de Yumbel se mantiene alto casi todo el año (80%), mientras que los sistemas tradicionales presentan niveles de cobertura muy bajos (35% en promedio) en los períodos con mayor riesgo de erosión (otoño, invierno y parte de la primavera), producto del laboreo de los suelos, las labores de desmalezado y la quema de rastrojos. El nivel de cobertura medido en 2013 fue menor al promedio obtenido por Museau (2007) en sistemas alternativos de la zona (81,5%). Sin embargo, cabe señalar que el cálculo efectuado por este autor sólo consideró los meses de otoño e invierno (cuando la cobertura del suelo alcanzó el máximo), mientras que la nueva estimación se realizó en los meses de primavera.



**Figura 14.** Distribución mensual de la cobertura de suelo en agroecosistemas tradicionales y alternativos del Secano Interior de la Región del Bío-Bío. Museau (2007) define los sistemas silvoagropecuarios (SASP) tradicionales de Yumbel, como sistemas campesinos de subsistencia, de 5 ha en promedio, basados en rotaciones de cultivos de variedades antiguas, viñas y ganadería extensiva, cuyos productos se destinan al autoconsumo; y a los sistemas silvoagropecuarios (SASP) alternativos de Yumbel como sistemas campesinos intensivos, de 3,5 ha promedio, que integran de forma sinérgica la producción agrícola, ganadera y forestal, mediante un diseño predial que promueve la biodiversidad, el reciclaje y la conservación del suelo. Los productos obtenidos son destinados a la venta y al autoconsumo.

En el año 2013, el subsistema forestal presentó una mayor cobertura vegetal que el subsistema agrícola. Las especies arbóreas del subsistema forestal (pinos, eucaliptos y algunos árboles nativos) han desarrollado un follaje persistente que, al traslaparse, es capaz de interceptar la lluvia y reducir su efecto erosivo. Por el contrario, el subsistema agrícola no siempre logra mantener una cubierta permanente, pues su dinámica depende de factores estacionales y de cultivo. Así, por ejemplo, la presencia de especies anuales en el sistema de rotación determina distintos grados de cobertura durante la temporada de producción, según las etapas de crecimiento de los cultivos (Cuadro 6).

En función de su diseño, las unidades forestales también mostraron diferencias en el grado de cobertura vegetal. Las franjas forestales tuvieron una mayor área de cobertura que el sistema silvopastoral, ya que éste último utiliza una baja densidad de plantación que permite el crecimiento de la pradera natural y el pastoreo del ganado. Pese a lo anterior, la cobertura de la pradera fue deficiente y heterogénea, debido a la baja fertilidad del suelo y al impacto de la carga animal.

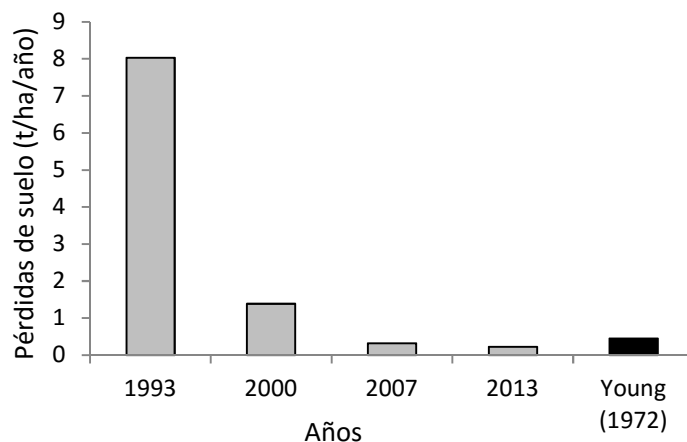
**Cuadro 6.** Cobertura del suelo en los subsistemas agrícola y forestal, evaluada durante la temporada 2012-2013.

<b>Subsistema</b>	<b>Unidad productiva</b>	<b>Cobertura de suelo (%)</b>
Agrícola	Rotación 1	78,0
	Rotación 2	54,0
	Huerto Frutal	76,6
	Invernadero	56,4
<b>Promedio subsistema agrícola</b>		<b>66,3</b>
Forestal	Sistema Silvopastoral	65,5
	Franjas Forestales	80,9
<b>Promedio subsistema forestal</b>		<b>73,2</b>

Por último, cabe notar que, si bien la metodología utilizada permite estimar la cobertura vegetal a nivel de cultivo, su extrapolación a escala predial podría ser sesgada si no se complementa con una base cartográfica apropiada. Esta estimación tiene especial relevancia ya que la cobertura del suelo proporciona información clave para determinar el factor C de la Ecuación Universal de Pérdidas por Erosión (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978).

**Pérdidas de suelo por erosión hídrica.** Como se observa en la Figura 15, la pérdida de suelos por erosión hídrica disminuyó considerablemente (97,26%), desde 8,04 t/ha/año en 1993, hasta 0,22 t/ha/año en 2013. La mayor variación se produjo entre los años 1993 y 2000, debido a los cambios de manejo orientados a recuperar la fertilidad natural de los suelos y a reducir los efectos de la erosión hídrica. El manejo incorporó la aplicación permanente de técnicas conservacionistas, tales como el uso de cubiertas vegetales, la utilización de mulch, la incorporación de rastrojos, la aplicación periódica de enmiendas orgánicas, el uso de labranza mínima, la construcción de terrazas en curvas de nivel y el cultivo en contornos (Stolpe, 2011). Además, el riesgo de erosión fue minimizado por medio de un diseño predial que consideró la capacidad de uso de los suelos, en función de su exposición, su pendiente y su historial productivo (Museau, 2007). El establecimiento de policultivos y de un sistema de rotación también ayudó a mantener las propiedades fisicoquímicas de los suelos, especialmente el contenido de materia orgánica y la estabilidad de agregados (ver indicadores respectivos).

El conjunto de medidas señaladas contribuyó a reducir el factor C (factor de cultivo y manejo) y P (prácticas de conservación) de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), y por tanto el valor de A (pérdida por erosión).



**Figura 15.** Pérdidas de suelo por erosión hídrica a nivel predial en los años considerados en el estudio.

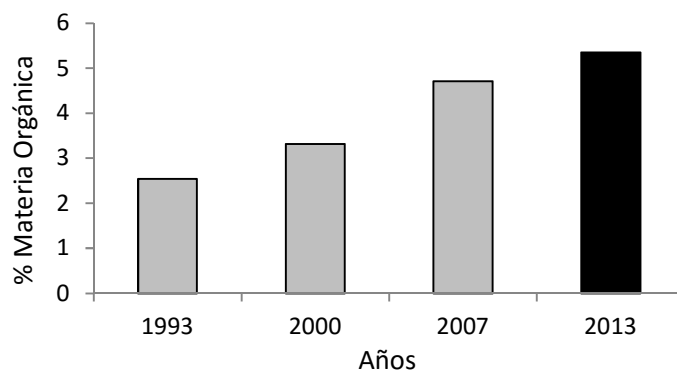
La tasa de pérdida de suelo de  $0,22 \text{ t ha}^{-1}\text{año}$  calculada en el año 2013, fue menor al promedio de  $1,2 \text{ t ha}^{-1}\text{año}$  obtenido por Museau (2007) en sistemas alternativos del Secano Interior. Incluso resultó ser más baja que la erosión mínima de  $0,45 \text{ t/ha/año}$  sugerida por Young (1972) bajo condiciones naturales de secano. Sólo la tasa de pérdida registrada en 1993 ( $8,04 \text{ t ha}^{-1}\text{año}$ ) superó el nivel de tolerancia de erosión de  $3-4 \text{ t ha}^{-1}\text{año}$  establecido para suelos de la Serie Cauquenes de la Región del Bío-bío con pendiente mayor a 10%, en tanto que los años restantes presentaron niveles aceptables al implementarse el diseño agroecológico.

Cabe señalar que los valores de tolerancia de erosión (T) para una localidad pueden modificarse según las características específicas de los suelos (profundidad, susceptibilidad a la erosión, gradiente de la pendiente, reducción de la MO, entre otros). Así, en el caso de la Región del Bío-bío y específicamente de la comuna de Yumbel, donde la erosión se considera uno de los problemas más graves, un nivel de tolerancia de  $3-4 \text{ t ha}^{-1}\text{año}$  estaría sobrestimado y las prácticas de conservación asociadas serían aún ineficaces. Si bien no es posible alcanzar “cero” erosión en un suelo debido a la ocurrencia de erosión geológica, sería recomendable establecer como valor de tolerancia para estos suelos el obtenido en el año 2013, considerando además su tasa de recuperación anual.

### Propiedades del suelo

**Materia orgánica del suelo (MOS).** A nivel predial, el contenido de materia orgánica del suelo se incrementó 2,1 veces al cabo de 20 años (de 2,54% a 5,35%), variación importante si se considera que los aumentos de materia orgánica se producen muy lentamente. Por ejemplo, se ha observado que suelos con 3% de materia orgánica pueden aumentar a 4% al cabo de 10 años, cuando los rastrojos se dejan sobre la superficie del suelo (Baginsky *et al.*, 2010).

En el año 2013 se obtuvo una condición buena de 5,35%, que superó a la obtenida por Museau (2007) y a los valores registrados en los años 2000 y 1993 (Figura 16). Incluso superó al promedio de 4,86% obtenido en el mismo predio durante el año 2011 (datos no publicados). De acuerdo a la pauta interpretativa, las tres estimaciones anteriores mostraron una condición “regular”, produciéndose la mayor variación entre los años 2000 y 2007 (42%).



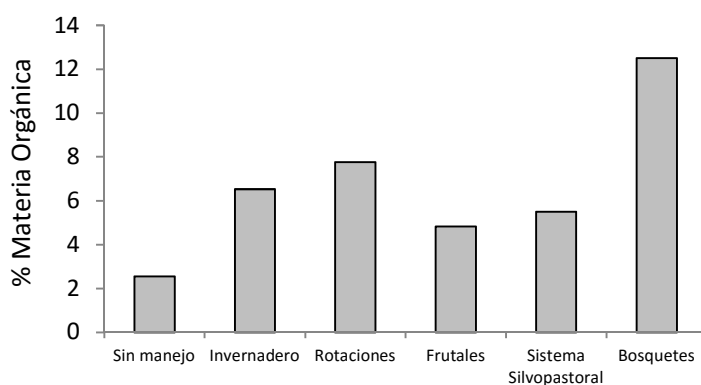
**Figura 16.** Niveles de materia orgánica observados en los años considerados en el estudio.

El nivel alcanzado en el año 2013 es consecuencia de un conjunto de prácticas agroecológicas destinadas a la rehabilitación, acondicionamiento y fertilización del suelo, entre las que destacan: a) adición de volúmenes crecientes de compost y estiércol; b) aplicación de biofertilizantes líquidos; y c) uso de abonos verdes, rotaciones y cultivos de cobertura (Baginsky *et al.*, 2010). Se aplicaron mayores dosis de enmiendas orgánicas en la medida que aumentó la disponibilidad de residuos y el uso de tecnologías para la elaboración de dichos insumos dentro del predio (ver nivel de producción de abonos orgánicos). Particularmente, la mayor disponibilidad de estiércol se asocia a la incorporación de nuevas especies animales, al mejoramiento de la infraestructura predial (corrales, establos, gallineros, lechos de lombrices y rediles móviles), la alimentación y el manejo sanitario de los mismos. La utilización de la cama animal y la construcción de estructuras para la conservación del guano, fueron estrategias efectivas para aprovechar los nutrientes provenientes de la orina y evitar su lixiviación por efecto de las lluvias.

La incorporación directa de abonos verdes al suelo, especialmente de las asociaciones avena/vicia y haba/arveja, o indirecta como materia prima para la elaboración de compost, también significó un aporte de materia orgánica y de residuos rápidamente mineralizables, que mejoraron las características fisicoquímicas del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Experiencias similares como las expuestas por Prager *et al.* (2012), confirman los beneficios de los abonos verdes sobre las múltiples funciones de la materia orgánica del suelo. Sin embargo, aunque muchos autores recomiendan ampliamente esta práctica, advierten que la baja relación C/N (10 a 20) de los abonos verdes poco lignificados, podría limitar la acumulación de MO estable en el suelo (Eira, 1992).

En cuanto a los niveles de MOS de las principales unidades productivas, todas presentaron una buena condición (>5%), con excepción del huerto frutal que presentó una condición regular

(4,8%). El valor de 2,5% medido en los sectores sin manejo es similar a los resultados reportados por Ortega (2000) para suelos de la zona sin uso productivo. El sistema de rotación alcanzó el nivel más alto (7,7 %), seguido del cultivo bajo invernadero (6,5%) y el sistema silvopastoral (5,5%) (Figura 17). Sin embargo, esta tendencia no concuerda con la observada en el año 2011 (datos no publicados), caracterizada por un alto nivel de MOS en camas altas bajo invernadero (9,1%) y valores muy inferiores en el sistema de rotación y el huerto frutal (1,9% y 3,6% respectivamente).



**Figura 17.** Contenido de materia orgánica de dos suelos sin manejo y de cinco unidades productivas del CET, obtenidas durante la temporada 2012-2013.

Aunque todos los suelos de las unidades evaluadas recibieron aplicaciones periódicas de enmiendas orgánicas, éstos difieren principalmente en su nivel de intensificación productiva (en función de la superficie y posición que ocupan dentro del predio) y en sus prácticas de manejo, lo que explicaría las diferencias en los contenidos de MOS observados. En el cultivo bajo invernadero, la calidad del suelo mejoró debido a la aplicación periódica de altas dosis de abonos orgánicos (manejo intensivo). En relación a los potreros de rotación, las prácticas que explican el aumento en el contenido de MOS son la incorporación de rastrojos secos y abonos verdes de diversas especies (fuentes variadas de carbono y nitrógeno), la aplicación permanente de compost y el uso de labranza mínima para el laboreo de los suelos, todo lo cual reduce significativamente la pérdida de carbono orgánico (Rouanet, 2005).

En el caso del huerto frutal, los aportes de materia orgánica estuvieron dados por la utilización de mulch orgánico (corteza de pino), el uso de una cubierta vegetal permanente, y la aplicación de compost localizada en los camellones de cultivo. No obstante, debido a que el compost no fue incorporado en profundidad sino aplicado superficialmente al suelo, no se produjeron cambios tan rápidos en el tiempo en comparación con otras unidades como el cultivo bajo invernadero y el sistema de rotación.

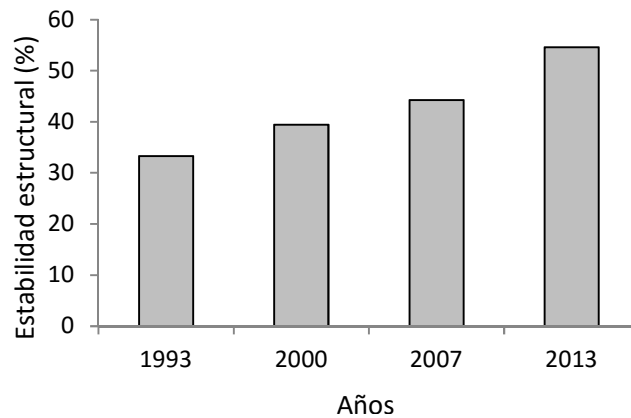
El sistema silvopastoral aumentó lentamente su nivel de materia orgánica a través del tiempo, producto de la implementación de un sistema de pastoreo rotativo entre potreros de uso forestal. Aquí el aporte de materia orgánica se atribuye a la acumulación del guano animal y a los ciclos de crecimiento y muerte de la pradera natural, que mantienen una cubierta vegetal permanente en los períodos de otoño e invierno, cuando el riesgo de erosión de los suelos es mayor. Gran parte de la materia orgánica acumulada se debe a la descomposición paulatina de raíces y partes aéreas de las especies que componen la pradera, una vez que éstas comienzan su etapa de senescencia (generalmente en los meses de verano). Cabe destacar la especial condición de los bosquetes, que dado su estado de conservación o de mínima intervención antrópica, muestran niveles muy altos de materia orgánica (12,5 %).

Los múltiples efectos atribuidos a la materia orgánica sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, descritos ampliamente por Narea y Valdivieso (2002), hacen evidente su gran importancia desde el punto de vista agronómico. En general, niveles altos de MOS pueden garantizar la productividad, estabilidad, resiliencia y biodiversidad del medio edáfico a largo plazo, y consecuentemente, de la sustentabilidad de los agroecosistemas (Prager *et al.*, 2012). Por lo tanto, se puede inferir que el aumento de la MOS experimentado, tiene un efecto positivo sobre el resto de los indicadores de calidad del suelo evaluados, especialmente de la estabilidad de agregados (Oades, 1993).

**Estabilidad de agregados (EA).** La evolución de la EA presentó una tendencia positiva en el tiempo, al mantenerse el manejo agroecológico del suelo. Su nivel tuvo una recuperación significativa en respuesta a los distintos manejos aplicados sobre cada unidad productiva, mostrando un incremento de 63,96% en 20 años.

En el año 2013, el suelo alcanzó el grado de estabilidad más alto (54,6%), seguido de los años 2007, 2000 y 1993 (44,3%, 39,5% y 33,3% respectivamente) (Figura 18). La mayor variación positiva se produjo entre los años 2007 y 2013 (44,3 y 54,6 respectivamente), debido a una importante alza en la producción de abonos orgánicos y biofertilizantes líquidos, especialmente de vermicompost, Súpermagro y Biol.

La mayor EA observada se puede atribuir al aumento del carbono orgánico de la MOS, debido a la acción de las sustancias húmicas y fúlvicas, polisacáridos y otros compuestos generados por el metabolismo microbiano, que permiten mantener unidas las partículas primarias de los agregados del suelo (Shepherd *et al.*, 2001). De acuerdo a Fortun y Fortun (1989), la MOS promueve la estabilidad de agregados porque reduce el hinchamiento del agregado, disminuye su permeabilidad y aumenta su resistencia intrínseca frente a fuerzas destructivas.



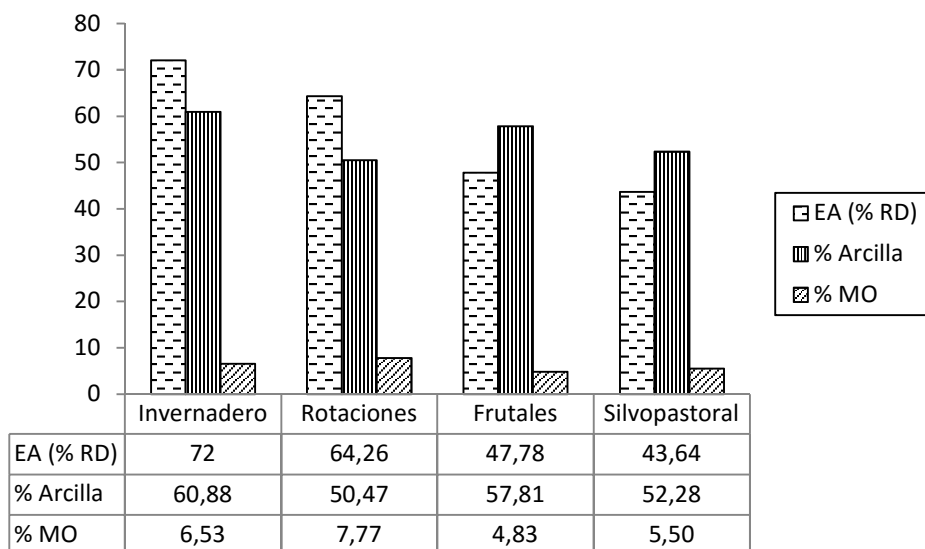
**Figura 18.** Evolución de la estabilidad de agregados a nivel predial entre los años 1993, 2000, 2007 y 2013.

No obstante los resultados obtenidos, cabe señalar que la cantidad de MOS *per se* no siempre es responsable directa de la estabilidad de agregados, si no que ésta puede depender más del tipo de MOS y de su disposición con respecto a las partículas minerales (Holeplass *et al.*, 2004). Además, la EA está determinada por otros factores como la densidad aparente del suelo (Db), los óxidos de Fe y Al, la tensión de agua y el contenido y tipo de arcilla (Kay *et al.*, 1997). Este último factor resulta de gran importancia si se considera que el suelo bajo estudio corresponde a un Alfisol, el cual se caracteriza por acumular un alto contenido de arcilla iluviada, que puede influir notablemente en la EA por su naturaleza química. En efecto, en el año 2013 el contenido promedio de arcilla en los suelos del CET fue de 55% en promedio, superando a los valores de referencia de los suelos de la Serie Cauquenes (Anexo 3).

Las unidades de manejo presentaron diferencias significativas en la EA del suelo, lo que se puede asociar tanto a los contenidos naturales de arcilla, como a los niveles de MOS alcanzados después de casi 20 años de abonado orgánico (Figura 19). El cultivo bajo invernadero mostró la mayor EA (72%) y el mayor contenido de arcilla entre las unidades de manejo evaluadas; sin embargo, su nivel de materia orgánica (6,53%) fue menor a los suelos bajo rotación, los que sin ser tan arcillosos presentaron una alta EA (64,26%).

Por otra parte, la EA obtenida en el huerto frutal (47,78%) fue menor a las unidades anteriores pero mayor al sistema silvopastoral (43,64). A pesar de presentar un alto contenido arcilla, la menor EA en ambos suelos puede ser explicada por su nivel de materia orgánica y por las prácticas de manejo aplicadas en cada unidad productiva.





**Figura 19.** Niveles de estabilidad de agregados (EA), contenidos de arcilla y materia orgánica de unidades evaluadas.

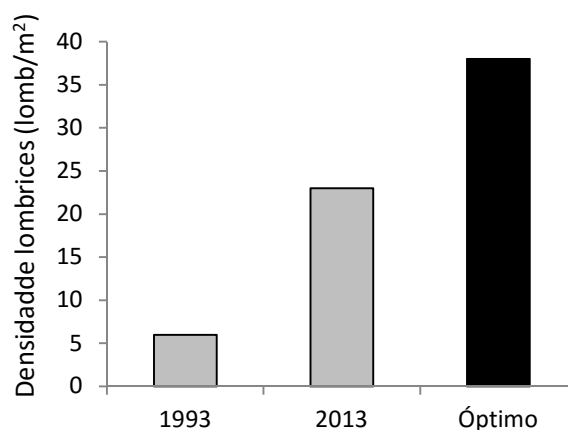
Aunque los resultados obtenidos en cada caso revelan que la EA depende fundamentalmente de la materia orgánica y el contenido de arcilla del suelo, no es posible determinar cuál de las dos propiedades ejerce una mayor influencia. Además, es importante considerar el efecto de otras propiedades del suelo y de factores propios de los sistemas de cultivo que, en mayor o menor grado, podrían incidir en la capacidad de agregación del suelo. Como ejemplo, se ha observado que los sistemas de raíces fibrosas de gramíneas como trigo, centeno, cebada y triticale, liberan compuestos que ayudan a agregar el suelo entre las raíces. También se ha observado que las micorrizas producen sustancias insolubles que adhieren partículas de materia orgánica, dando mayor estabilidad a los suelos (Bowman *et al.*, 2000).

Dado que la EA es una propiedad física clave en la conservación de la fertilidad natural del suelo, es considerada una de las más importantes para asegurar la estabilidad productiva de los agroecosistemas. Una mayor EA promueve la calidad del suelo al facilitar la penetración de raíces y evitar la pérdida de nutrientes, favoreciendo el desarrollo de los cultivos. Además, reduce el impacto erosivo de las gotas de lluvia y la escorrentía superficial, al aumentar la infiltración y la capacidad de retención de agua en el suelo (Casanova *et al.*, 2008).

**Densidad de lombrices.** Debido a que la densidad de lombrices no fue evaluada en el sistema productivo del CET durante los años 2000 y 2007, sólo se consideró los resultados obtenidos en los años 1993 (sin manejo agroecológico) y 2013. Como se observa en la Figura 20, la presencia de lombrices aumentó casi 3 veces en 20 años, considerando tanto a especies endémicas (ej: *Chilota chilensis* y *Chilota platei*) como a especies exóticas (ej: *Lumbricus terrestris* y *Eisenia foetida* o lombriz roja californiana). Este resultado es comparable al de Mader *et al.* (2002), quienes encontraron que, después de 21 años de manejo orgánico, el suelo presentó 3,2 veces más lombrices que un suelo bajo manejo convencional. La mayor

proporción de lombrices encontradas correspondió a la categoría ecológica de las endógeas, las cuales se desarrollan entre los 20 y 30 cm de profundidad.

En este caso, la proliferación de lombrices respondió principalmente al efecto acumulativo de prácticas de conservación de suelo, tales como la adición de materia orgánica (enmiendas y abonos verdes de baja relación C/N), la ausencia de agroquímicos, la presencia de cubiertas vegetales o mulch, el establecimiento de rotaciones de cultivos y el uso de labranza mínima, todo lo cual proporciona la humedad, la temperatura y el alimento necesario para el desarrollo de las lombrices (Selles *et al.*, 2006).



**Figura 20.** Densidad de lombrices promedio, evaluada en los años 1993 y 2013.

Lo anterior concuerda con las experiencias de Ramert *et al.* (2000) y de Bukerfield y Webster (1996), quienes reportaron que la aplicación de prácticas destinadas a incrementar la materia orgánica del suelo, no sólo aumentó la población de lombrices en hasta un 155%, sino también su diversidad, en relación a un monocultivo sin manejo agroecológico.

El aumento de la biomasa de lombrices influyó positivamente en el progreso de indicadores como la MOS, la estabilidad de agregados, la diversidad agrícola y la pérdida de suelo por erosión hídrica. Esto se debe a que las lombrices actúan sobre todas las propiedades del suelo, reflejando su efecto sobre su estructura, incorporando y mezclando compuestos minerales y orgánicos para la formación de humus, regulando el pH y facilitando la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y el desarrollo de raíces. Numerosas investigaciones demuestran que la capacidad de las lombrices de hacer galerías verticales, junto con depositar sus fecas o cotovinas en estas galerías, mejora la estabilidad de los agregados, la macroporosidad, la infiltración y retención de agua y la aireación, además de disminuir la compactación y la erodabilidad del suelo (Selles *et al.*, 2006).

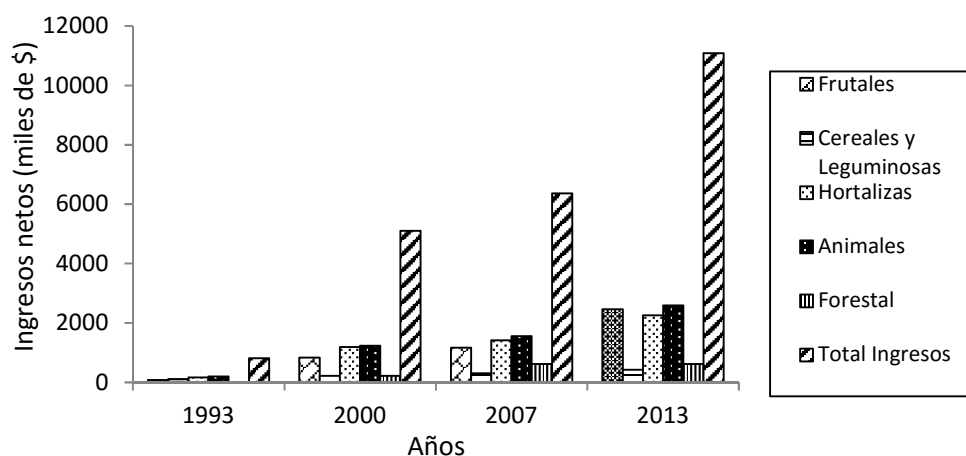
Desde el punto de vista químico, al moverse en el perfil de suelo las lombrices pueden descomponer materia orgánica y movilizar minerales a mayores profundidades, llevándolos a zonas de mayor concentración de raíces. Además, participan activamente en el ciclo del nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y calcio, aumentando su mineralización y su biodisponibilidad (Russel, 1973). A nivel biológico, se ha observado que la presencia de lombrices favorece la proliferación de microorganismos que se alimentan directamente de las sustancias que éstas liberan, especialmente de hongos y bacterias fijadoras de nitrógeno. También son agentes importantes en el control sanitario del suelo, al consumir microorganismos y nemátodos patógenos y reducir la posibilidad de difusión de inóculos de enfermedades, a través de la rápida descomposición de materiales orgánicos (Selles *et al.*, 2006).

Gracias a estas ventajas, la actividad de las lombrices contribuyó significativamente al manejo del estiércol y de otros efluentes derivados del subsistema animal, lo que se reflejó en el indicador de producción de compost y en el IDIE. Destaca aquí la utilización de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) para transformar rápidamente el estiércol acumulado en establos, corrales y camas animales, en enmiendas orgánicas inocuas y de alta calidad que fueron incorporadas a los suelos. Además, permitió un ahorro importante en la compra de insumos y una fuente de ingreso adicional que no requirió de mayores inversiones (ver indicadores económicos).

Aunque se obtuvo un resultado favorable de este indicador y un impacto positivo en otros indicadores agroambientales y económicos, su nivel no alcanzó el óptimo de 38 lombrices/m<sup>2</sup>, promedio reportado por Museau (2007) en sistemas alternativos del Secano Interior. Además, el resultado obtenido en el año 2013 podría considerarse deficiente según el criterio de Shepherd (2000), quien sostiene que poblaciones de lombrices menores a los 100 ejemplares/m<sup>2</sup> en los primeros 20 cm de suelo, indican que se trata de un sistema productivo biológicamente degradado, lo que obedecería a la condición general de los suelos del secano.

### **Indicadores económicos**

**Ingresos netos anuales.** En concordancia con la producción agrícola, el indicador de ingresos mostró un avance considerable en el tiempo, con un incremento de 1.263% en 20 años. El ingreso total obtenido en la temporada 2013 alcanzó el nivel más alto (100), con un valor de \$11.076.770, en tanto que los años 2007, 2000 y 1993 presentaron valores de \$6.357.850, \$5.100.280 y \$812.300, respectivamente. Esta tendencia tuvo como causas principales el aumento de la capacidad productiva de los subsistemas, la reducción de costos y las variaciones de precios experimentadas a través del tiempo. Estas últimas corresponden a los ajustes anuales del IPC general aplicados a cada año, sumados a los cambios en los precios de venta de productos específicos.



**Figura 21.** Ingresos netos anuales de las principales unidades productivas en los años considerados en el estudio.

El primer incremento significativo en el nivel de ingresos se produjo entre los años 1993 y 2000 (528%) impulsado por la implementación del esquema agroecológico, el cual potenció todos los rubros, principalmente la producción de hortalizas, animales y frutales. En el caso de las hortalizas, se incorporaron ocho nuevas especies, de las cuales la lechuga, el tomate y la cebolla fueron las más importantes, con aportes al ingreso de 39,2%, 30% y 7%, respectivamente. Los ingresos de la producción pecuaria, basados en la venta de miel y huevos, aumentaron junto a la venta de aves, cerdos y núcleos de lombrices. Dada su mayor rentabilidad, la fruticultura fue cobrando mayor relevancia (dos nuevas especies) por lo que se incorporaron nuevas tecnologías para su producción.

El segundo gran incremento se observa entre los años 2007 y 2013 (74%), debido principalmente al fuerte desarrollo de la fruticultura. Sólo en este período se incorporaron más de diez nuevas especies frutales, entre las que destaca el arándano y la frutilla, con aportes al ingreso de 38% y 13,8%, respectivamente. Además, rubros tradicionales como la uva de mesa, las manzanas y los membrillos aumentaron notablemente su producción, contribuyendo a la composición del ingreso del área frutícola con un 23,4%, 12%, 6%, respectivamente.

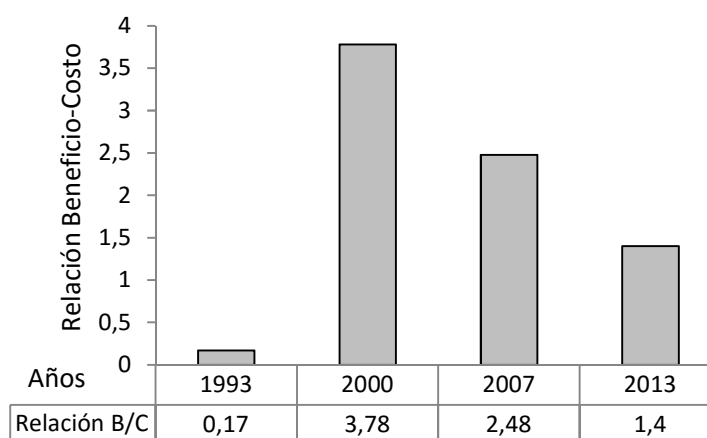
La horticultura y la producción pecuaria (y sus derivados) también experimentaron un aumento importante en la generación de ingresos. En la primera, se produjo un nuevo incremento en la producción de los principales rubros (tomate, lechuga, cebolla y ciboullette) y se incorporaron nuevas especies como berenjena y papa. En la segunda, la mayor producción de miel, huevos, aves, cerdos y núcleos de lombrices, fue complementada con la de conejos y ovejas.

Cabe destacar que la producción de miel y sus subproductos ha constituido uno de los rubros más importantes para la generación de ingresos a través del tiempo. Sólo en el año 2013 la venta de miel representó casi la mitad de los ingresos totales generados por la actividad pecuaria y casi un 10% del ingreso predial. Su importancia radica en que, junto con mantener

un precio de venta relativamente estable, su producción es menos exigente en mano de obra e insumos que otros rubros (Museau, 2007). Sin embargo, la actividad apícola no se limita sólo a sus productos, sino que además contribuye indirectamente a la generación de ingresos facilitando la polinización de los cultivos.

**Relación Beneficio-Costo.** Pese al aumento observado entre los años 1993 y 2000, la relación Beneficio-Costo tuvo una tendencia negativa en el período 2000-2013. Sólo los valores obtenidos en los años 2000 (3,78) y 2007 (2,48) superaron al promedio de 2,26 calculado por Museau (2007) en sistemas alternativos del Secano Interior.

En concordancia con el comportamiento de los ingresos, la alta eficiencia económica observada en el primer período obedece al modelo de gestión agroecológico, cuyos efectos se resumen en un aumento de la superficie cultivada, un incremento en el rendimiento de los cultivos y una reducción de los costos operacionales. La reducción de costos se asocia al ahorro de insumos, especialmente de fertilizantes orgánicos; así, por ejemplo, la elaboración intrapredial de abonos orgánicos significó un ahorro aproximado de \$1.155.000 en los costos de la temporada 2000, frente a un ahorro de \$70.000 en la temporada 1993.



**Figura 22.** Relación Beneficio-Costo obtenida en los años considerados en el estudio.

A partir del año 2000, la relación Beneficio-Costo comenzó a disminuir notablemente hasta alcanzar un valor de 1,4 en el año 2013. Esta tendencia se explica por la alta demanda de insumos y mano de obra necesaria para la ampliación de la superficie cultivada, el manejo de nuevas especies frutales y el desarrollo de tecnologías apropiadas.

De esta manera, el progreso de la producción silvoagropecuaria trajo consigo costos operacionales cada vez mayores que fueron disminuyendo la eficiencia económica del sistema (Cuadro 7), aun cuando algunos de los principales rubros como trigo y vid experimentaron un alza en sus precios de venta (Museau, 2007).

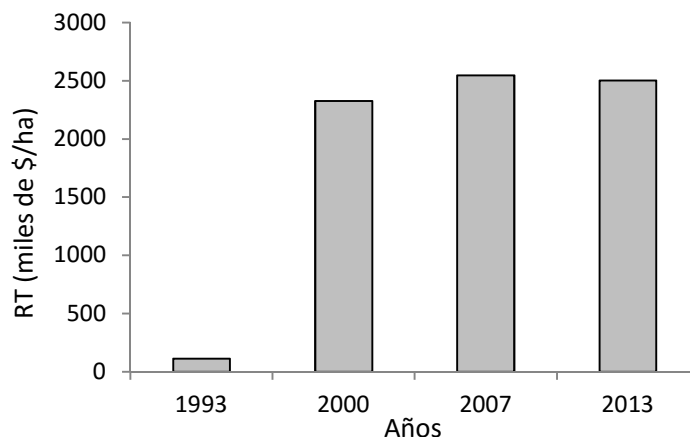
**Cuadro 7.** Costos operacionales en los años considerados en el estudio.

Costos operacionales (\$)	Años			
	1993	2000	2007	2013
Semillas y almácigos	35.000	550.00	80.000	120.000
Alimento para animales	0	280.000	400.000	480.000
Insumos farmacéuticos	2.000	4.000	10.000	10.000
Guano	180.000	140.000	115.000	90.000
Insumos para plagas y enfermedades	0	5.000	6.000	6.000
Insumos Bocashi	0	0	0	180.000
Insumos Súpermagro	0	0	30.000	60.000
Guano rojo y roca fosfórica	0	0	0	110.000
Mano de obra	463.200	1.086.000	1.620.000	4.416.000
Electricidad	15.000	22.000	35.000	42.000
<b>Total</b>	<b>697.193</b>	<b>1.594.000</b>	<b>2.291.193</b>	<b>5.516.013</b>

El principal costo asociado correspondió a la mano de obra, el cual aumentó desde los \$463.200 en 1993, hasta los \$4.416.000 en 2013. Su incremento se debió al contrato de obreros agrícolas calificados y a los ajustes anuales del sueldo mínimo. Otras fuentes de costo fueron insumos como semillas y alimentos para animales, los cuales presentaron variaciones importantes durante este período (118% y 71% respectivamente).

Del análisis anterior se desprende que la alta complementariedad interna entre rubros que caracteriza a los sistemas agroecológicos, no siempre garantiza una mayor eficiencia económica. Si bien el manejo agroecológico es capaz de aumentar la eficiencia productiva en el largo plazo, ésta no es suficiente por sí sola, pues requiere de un modelo de gestión económica apropiado que tenga en cuenta los recursos humanos y las fluctuaciones del mercado de insumos.

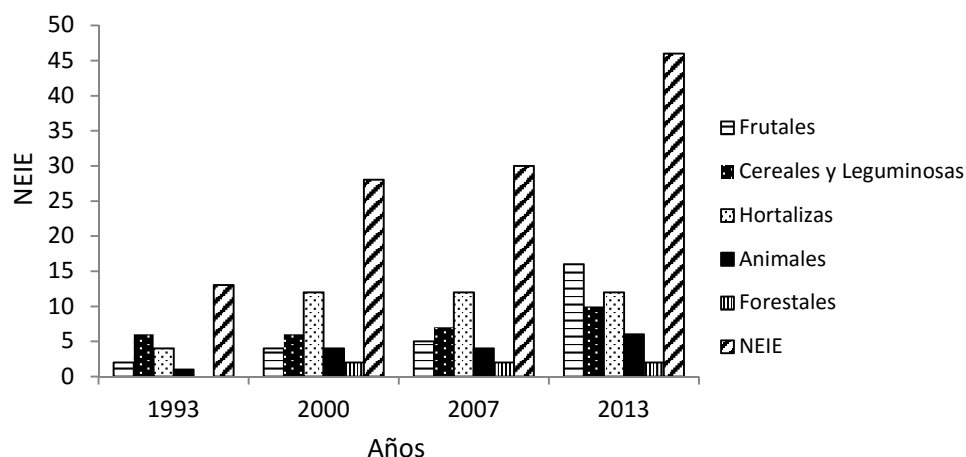
**Retorno de la tierra.** El Retorno de la tierra, entendido como el beneficio económico obtenido por superficie cultivada ( $\$ \text{ ha}^{-1}$ ), se incrementó casi 20 veces en 20 años de manejo agroecológico. El avance más importante se observó entre los años 1993 y 2000 (Figura 23), período en el que se expandió la superficie cultivada y se intensificó la actividad agrícola a través del establecimiento de policultivos y de la aplicación de nuevas tecnologías. Los períodos siguientes no tuvieron mayores variaciones, ya que el nivel de producción, la superficie cultivada y los precios de venta no aumentaron hasta el año 2007. En este año, el nivel de retorno alcanzó su nivel más alto (2.546.276  $\$ \text{ ha}^{-1}$ ), superando ampliamente al promedio de 256.841,7  $\$ \text{ ha}^{-1}$  obtenido por Museau (2007) en sistemas alternativos del secano.



**Figura 23.** Retorno de la tierra (RT) en los años considerados en el estudio.

En el período 2007-2013 se observó una leve disminución de este indicador, ya que el beneficio económico aumentó a una tasa similar a la superficie cultivada.

**Número de especies de importancia económica (NEIE).** A nivel predial, el número de especies de importancia económica (NEIE) experimentó una tendencia positiva en el tiempo, con una variación de 253,8% en 20 años. Los aumentos más importantes se observaron entre los períodos 1993-2000 y 2007-2013, con variaciones de 115,4% y 53,3%, respectivamente. Durante el primer período, se introdujeron 15 nuevas especies, de las cuales 8 fueron hortalizas, 2 frutales, 3 animales y 2 forestales (Figura 24). Lo anterior concuerda con la tendencia de otros indicadores como productividad agrícola e ingresos anuales, los cuales reflejan el auge de las hortalizas en este período.



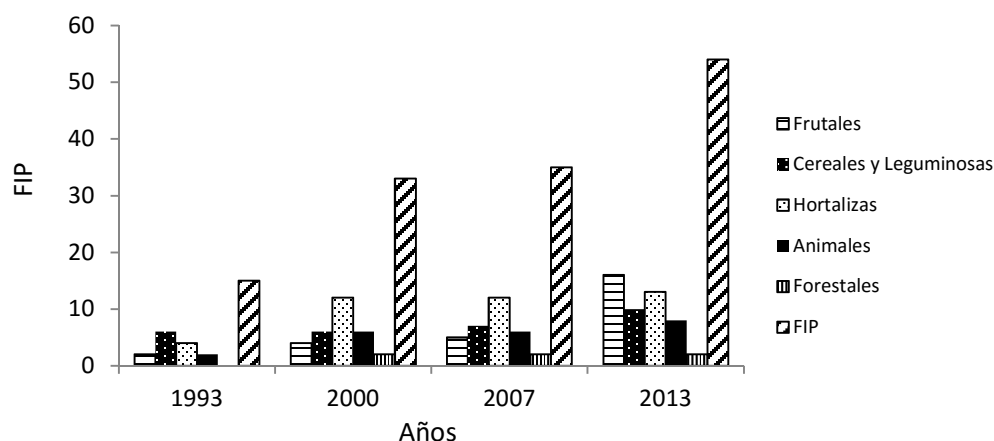
**Figura 24.** Número de especies de importancia económica de las unidades de manejo en los años considerados en el estudio.

El período 2000-2007 no tuvo cambios tan importantes, debido a que los esfuerzos técnicos y los recursos financieros priorizaron el mejoramiento de prácticas y tecnologías para los cultivos incorporados en los años anteriores. Luego en el período 2007-2013, se incorporaron 16 nuevos rubros al sistema productivo, de los cuales 11 fueron frutales, 3 fueron cereales y 2 animales. El NEIE alcanzado en el año 2013 fue superior al promedio de 18 especies obtenido por Museau (2007) en sistemas alternativos de la zona. Además, fue mayor al NEIE registrado por el mismo autor en el predio del CET durante el año 2007 (25 especies).

Los resultados anteriores reflejan un aumento en la diversidad productiva, la cual contribuye a una mayor seguridad económica. Como se explicó en el Índice de diversidad agrícola, mientras mayor sea el número de especies cultivadas en un agroecosistema, mayor será su capacidad para resistir, recuperarse de perturbaciones externas (resiliencia) y mantener una producción económicamente estable y rentable en el tiempo. No obstante, dichas especies deben distribuirse espacialmente considerando su compatibilidad y las ventajas comparativas entre rubros.

**Número de fuentes de ingreso predial.** Exhibiendo un comportamiento similar al NEIE, las fuentes de ingreso predial tendieron a diversificarse en el tiempo, especialmente en los períodos 1993-2000 y 2007-2013, con aumentos de un 120% y 54,3% respectivamente (Figura 25). En el primer período, la mayor diversificación estuvo dada por una mayor cantidad de hortalizas y especies animales. Estos rubros fueron los puntos de partida para el desarrollo del sistema agroecológico, ya que presentan ciclos productivos más cortos y su costo de producción suele ser menor al de los cultivos frutales.

En el caso de las hortalizas, la producción escalonada, ya sea bajo invernadero o en forma de chacras, permitió mantener la disponibilidad de alimentos durante todo el año y generar ingresos en el corto plazo.



**Figura 25.** Número de fuentes de ingreso predial aportados por las unidades de manejo en los años considerados en el estudio.

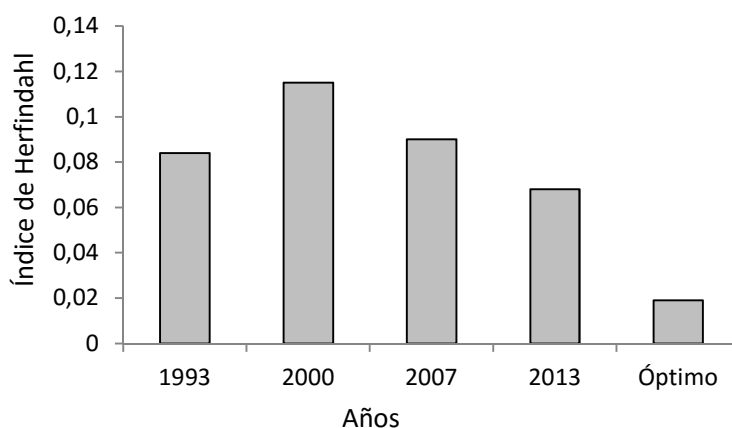


Por otra parte, la integración de los animales logró mejorar la economía predial aportando una serie de recursos y servicios (estiércol, control de malezas, tracción de arados, carga, transporte y productos derivados), que constituirían la base para el establecimiento de nuevos rubros en los años posteriores.

Es importante mencionar que a inicios del período 1993-2000, la actividad forestal era incipiente, debido al alto grado de degradación de los suelos y de la cubierta vegetal nativa. Con la incorporación de especies como pino, eucalipto y otras especies arbóreas, fue posible mitigar la erosión de suelos y aprovechar la madera en forma de leña y material de construcción.

En el período 2007-2013, el número de fuentes de ingreso aumentó en 19 rubros, de los cuales 11 correspondieron a especies frutales, 3 a cereales, 2 a animales y 1 a hortalizas. Cabe destacar que en este período la actividad apícola se vio favorecida por el desarrollo de otros productos derivados de la colmena, tales como cera, propóleo, jalea real y apitoxina, los cuales constituyeron fuentes de ingreso adicionales a la venta de miel. Además, se incorporó la producción de abonos orgánicos y biofertilizantes (compost, vermicompost, Súpermagro y Biol) los cuales, además de ser utilizados en el acondicionamiento y fertilización del suelo, significaron un gran ahorro de insumos y una fuente de ingresos importante a través de su comercialización.

**Índice de Herfindahl.** En general, este indicador presentó una tendencia favorable en el tiempo, excepto durante el período 1993-2000, en el que arrojó un valor más cercano a 1 que el resto de los años (valores cercanos a 0 son deseables). Desde el año 2000 en adelante, el valor del índice disminuyó notablemente hasta alcanzar un valor de 0,068, lo que significa una mejor condición de la variable. Sin embargo, dicho valor se encuentra aún lejano del óptimo (0,019) (Sun y Shao, 2009), el cual representa la contribución equitativa hipotética de los rubros al ingreso total (competencia perfecta) (Figura 26).



**Figura 26.** Índice de Herfindahl en los años considerados en el estudio.

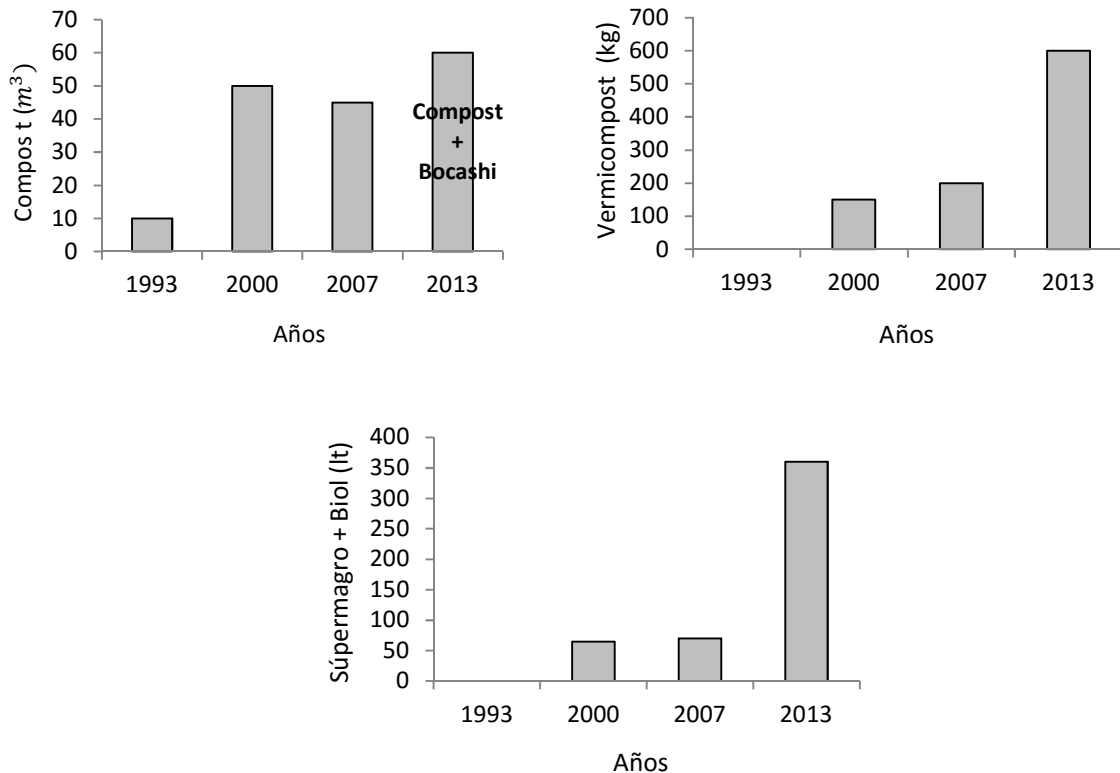
Los resultados anteriores reflejan la distribución del aporte al ingreso de cada uno de los rubros. Así, en el año 2000 las mayores contribuciones al ingreso se distribuyeron en menos rubros que el resto de los años, concentrándose principalmente en la producción de compost (costo valorizado), miel, membrillos, uva de mesa, lechugas y tomates, entre un total de 33 rubros. Lo anterior sugiere que, a pesar del alto grado de diversidad productiva alcanzado en este año, el ingreso percibido se concentra en pocos rubros. Desde el punto de vista del concepto de resiliencia, ésta no sería una condición deseable ya que, si una perturbación externa impacta sobre la producción de estos rubros, el ingreso caería drásticamente sin tener la capacidad suficiente para ser compensado por los rubros restantes (la recuperación o compensación del nivel de producción y renta después de una perturbación externa, es uno de los beneficios de la biodiversidad).

Por su parte, los años 1993, 2007, 2013 mostraron una mejor condición al mostrar valores más cercanos al óptimo. El año 2013 tuvo la mejor condición (0,068), ya que la contribución al ingreso total estuvo repartida en 54 fuentes de ingreso de forma más equitativa. Si bien los rubros de compost, miel, membrillos, uva de mesa, lechugas y tomates siguieron liderando la concentración del ingreso, surgieron otros rubros como la producción de bokashi, arándanos, frutillas, cerdos, núcleos de lombriz, leña y estacas que redujeron dicha concentración.

En este caso, cualquier impacto negativo sobre uno de los rubros con mayor aportación al ingreso, podría ser compensado más fácilmente por los otros rubros señalados, los cuales además provienen de distintos subsistemas (agrícola, ganadero y forestal).

Del análisis anterior se desprende que la capacidad resiliente de un agroecosistema está determinada tanto por su grado de diversificación productiva, como por la distribución de los aportes que hacen los rubros al ingreso total de la explotación. En este sentido, pese a que la condición del año 2013 dista de la óptima, representa un estado de alta resiliencia económica y productiva.

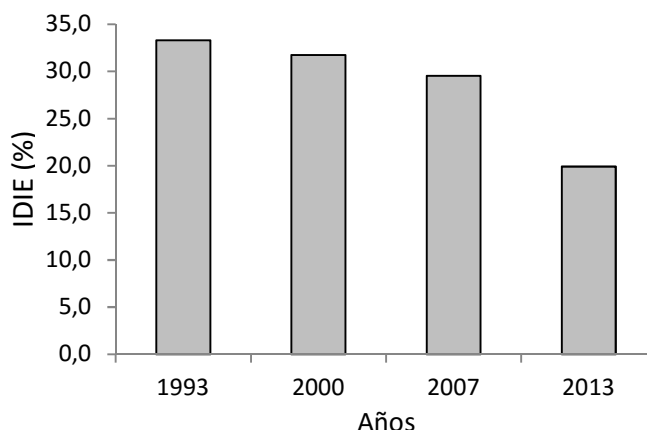
**Producción de abonos orgánicos.** A partir del año 2000, la producción de vermicompost mediante la crianza de *Eisenia foetida* (lombriz californiana) y la elaboración de biofertilizantes líquidos (Súpermagro, Biol y tés), se convirtieron en estrategias claves dentro del programa de fertilización orgánica, que hasta entonces dependía únicamente de aplicaciones de compost y guano. En efecto, entre los años 2007 y 2013, se observa un aumento sustancial en la producción de estos insumos (200% en vermicompost y 400% en biofertilizantes líquidos), cuya aplicación combinada, tanto a nivel foliar como de suelo, permitió corregir gran parte de las deficiencias nutricionales manifestadas en algunos cultivos (Figura 27).



**Figura 27.** Niveles de producción intrapredial de compost ( $m^3$ ), vermicompost (kg) y biofertilizantes líquidos (lt), en los años considerados en el estudio.

La producción de compost, aunque mostró una leve baja entre los años 2000 y 2007, aumentó hacia el año 2013 gracias a la adopción de la tecnología denominada “bokashi”, la cual permite acelerar el proceso de descomposición de los materiales orgánicos, logrando un compost de alta calidad en dos a tres semanas (CET, 1994).

**Independencia de Insumos Externos (IDIE).** Los resultados del IDIE mostraron una menor dependencia del exterior a través del tiempo, con una disminución de 39% en 20 años. La variación más importante se experimentó en el período 2007-2013 (-33,3%), logrando en el último año que sólo el 20% del costo total correspondiera a la compra de insumos (valores menores son deseables) (Figura 28). En los dos períodos restantes, las variaciones no fueron tan altas ya que los costos operacionales aumentaron de forma similar a la mano de obra, en la medida que se desarrolló el modelo agroecológico.



**Figura 28.** Independencia de insumos externos (IDIE) en los años considerados en el estudio.

En el año 1993, los costos operacionales más altos estuvieron representados por la compra de semillas, almácigos, insumos farmacéuticos (animales) y guano para su aplicación directa al suelo o para la elaboración de compost, lo que se tradujo en una dependencia del exterior de 33%. En los tres años siguientes, al aumento del costo de mano de obra se suma la compra de insumos para plagas y enfermedades de los cultivos, de suplementos alimenticios para los animales y de insumos para la elaboración de Súpermagro. Sin embargo, la tendencia al alza de los costos operacionales fue compensada por el ahorro en fertilizantes orgánicos y energía, debido al uso de abonos y leña producidos dentro del predio. Además, debido a la incorporación de un mayor número de animales a la explotación, la disponibilidad de guano aumentó por lo que se redujo su compra desde predios vecinos.

### Integración de resultados

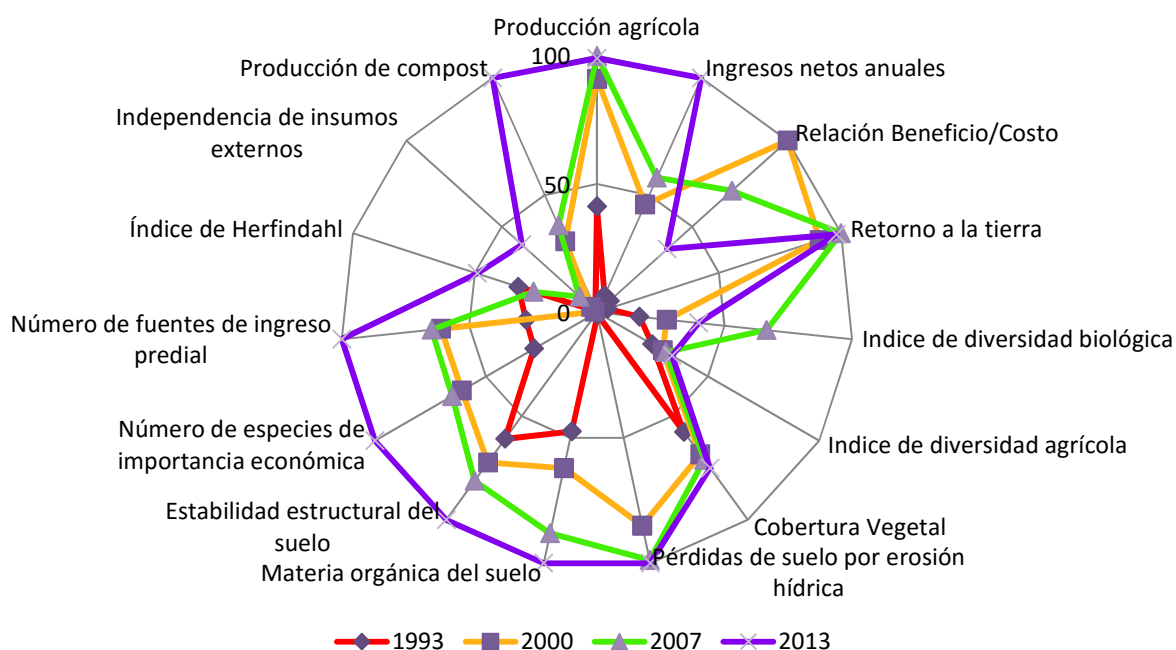
A continuación, se presentan los indicadores evaluados para cada año considerado en el estudio, con sus valores óptimos respectivos y los criterios considerados para su definición (Cuadro 8). La integración de estos resultados se representa mediante una gráfica radial que permite comparar la sustentabilidad predial del CET a través del tiempo (Figura 29). Para tal efecto, se normalizaron los valores en una escala de 0 a 100. Cabe señalar que la normalización de los indicadores en los cuales son deseables valores menores (pérdida de suelos por erosión hídrica, índice de Herfindahl e IDIE), se realizó considerando el valor inverso del obtenido en relación a su valor óptimo.

**Cuadro 8.** Valores obtenidos, valores óptimos y criterios para su definición, en los años considerados en el estudio.

Indicador	Año				Valor óptimo	Criterios para la definición del óptimo
	1993	2000	2007	2013		
Producción agrícola	30.362,0	66.918,0	73.578,4	72.853,9	73.578,4	Valor máximo
Ingresos netos anuales	812.300	7.624.391	7.972.564	13.213.314	13.213.314	Valor máximo
Relación Beneficio-Costo	0,2	3,8	2,5	1,4	3,8	Valor máximo
Retorno de la tierra	15,86	724,28	670,13	753,75	753,75	Valor máximo
Índice de diversidad biológica	0,48	0,79	1,92	1,15	2,89	Óptimo según fórmula
Índice de diversidad agrícola	0,89	1,06	1,11	1,21	3,58	Óptimo según fórmula
Cobertura vegetal	57,6	68,4	71,2	75,1	100	Cobertura máxima de suelo
Pérdidas de suelo por erosión hídrica	8,04	1,39	0,32	0,22	0,22	Valor mínimo por erosión geológica
Materia orgánica del suelo	2,54	3,32	4,71	5,35	5,35	Valor máximo
Estabilidad estructural del suelo	33,3	39,5	44,3	54,6	54,6	Valor máximo
NEIE	13	28	30	46	46	Valor máximo
Fuentes de ingreso predial	15	33	35	54	54	Valor máximo
Índice de Herfindahl	0,084	0,115	0,09	0,068	0,019	Óptimo según fórmula
Independencia de insumos externos	0,33	0,32	0,30	0,20	0	Independencia total
Producción de abonos orgánicos (m <sup>3</sup> )	10	200	245	660	660	Valor máximo

La Figura 29 muestra que la aplicación de prácticas agroecológicas provocó un aumento de la sustentabilidad a través de los 20 años de producción. De los cuatro atributos considerados básicos para el desarrollo de un sistema agrícola sustentable, la productividad y estabilidad fueron los que presentaron un mayor progreso, seguido de los atributos de resiliencia y autogestión. Esta situación es comparable a otras experiencias de transición agroecológica, en las cuales la productividad y la estabilidad también fueron los atributos más destacados (Alonso y Guzmán, 2006; Rey-Novoa y Funes-Monzote, 2013). Sin embargo, en ambos casos se plantea que el atributo de autogestión, por medio de una menor dependencia de insumos externos, es un factor clave de la productividad.

El principal avance se manifestó a nivel agroambiental, especialmente en la protección del suelo frente a la erosión hídrica y al aumento de su fertilidad integral (cobertura del suelo, materia orgánica del suelo (MOS), estabilidad de agregados (EA), densidad de lombrices y producción de abonos orgánicos). Lo anterior permitió revertir exitosamente los procesos de degradación del suelo, logrando mejores condiciones para el crecimiento y desarrollo de especies vegetales y animales, tanto de carácter funcional (servicios ecosistémicos) como productivo. Sin embargo, los índices de diversidad biológica y agrícola no reflejaron fielmente esta mejora, ya que se mantuvo el dominio de ciertas especies entre la diversidad encontrada. Adicionalmente, la aplicación de técnicas apropiadas a las condiciones agroclimáticas del Secano Interior, se ha traducido en importantes incrementos de la producción agrícola, pecuaria y forestal, y consecuentemente, en un mayor nivel de ingresos.



**Figura 29.** Presentación gráfica de los indicadores evaluados.

Desde el punto de vista económico, la mayor diversificación de rubros reflejada por indicadores como el NEIE o el número de fuentes de ingreso predial, ha permitido alcanzar un alto nivel de eficiencia y estabilidad económica, que garantiza la disponibilidad de productos durante todo el año y la generación permanente de ingresos. No obstante, el bajo desempeño de indicadores como la relación Beneficio-Costo, el Índice de Herfindahl y el IDIE indican que, pese a la mayor cantidad y variedad de rubros incorporados, éstos aún concentran la generación del ingreso total en pocas fuentes, lo que puede traducirse en una baja resiliencia, aumentando el riesgo económico.

Por otro lado, aunque la mayor producción de insumos y la complementariedad entre subsistemas permitió reducir considerablemente los costos operacionales, la capacidad de autogestión del sistema (representado por IDIE) no alcanzó la condición esperada, debido fundamentalmente al costo creciente de la mano de obra. Dicha situación se vio reflejada, por la baja relación Beneficio-Costo observada en los últimos años.

### Recomendaciones finales

Considerando las debilidades identificadas en el sistema productivo del CET y las limitantes metodológicas encontradas en este estudio, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Frente al bajo desempeño de indicadores como la diversidad agrícola (Índice de Shannon), el Índice de Herfindahl y la relación Beneficio-Costo se propone implementar nuevas prácticas que permitan incrementar el rendimiento de aquellas especies con menor contribución a la producción total. Por otra parte, se recomienda aumentar el valor de los productos con menor contribución al ingreso total, a través de nuevos formatos de productos y estrategias de comercialización.
- Para mejorar el IDIE (Independencia de Insumos Externos), se plantea reducir el costo del alimento para animales (afrecho, harinilla y pellets) a través de su producción predial. Algunas alternativas son potenciar el pastoreo rotativo en el sistema silvopastoral y/o evaluar la posibilidad de adquirir alimento desde predios vecinos.
- Debido a que la sequía constituye un problema grave para la pequeña agricultura del secano, se propone incorporar un nuevo grupo de indicadores que dé cuenta del balance hídrico y de la eficiencia en el uso del agua a nivel predial. Además, se sugiere la integración de indicadores de eficiencia energética, tanto de tipo productiva como alimentaria, incorporando metodologías como ECOFAS para su medición.
- Se recomienda utilizar el Índice de Herfindahl para futuras evaluaciones, dada su fácil medición e interpretación. Este indicador es útil ya que permite complementar las estimaciones de diversidad económica cuando éstas no consideran la distribución de los rubros respecto de su aporte al ingreso total.

En cuanto a las estimaciones de biodiversidad, se recomienda complementar o reemplazar el uso del Índice de Shannon por el índice IDA propuesto por Leyva y Lores (2012), que permite caracterizar y organizar la diversidad del sistema productivo en función de sus valores utilitarios y aportes medibles a la alimentación humana, de los animales y del suelo, así como de necesidades complementarias asociadas al fortalecimiento del agroecosistema.

## CONCLUSIONES

El conjunto de indicadores obtenidos a través de la metodología MESMIS, permitió medir satisfactoriamente la evolución de la sustentabilidad predial del CET a través del tiempo. Los cuatro atributos generales considerados en este estudio fueron caracterizados por 16 indicadores (8 agroambientales y 8 económicos), los cuales se obtuvieron a través del análisis de aquellos puntos críticos o factores limitantes (agroclimáticos, económicos y sociales) que afectan la sustentabilidad agrícola del secano. Puesto que el sistema productivo del CET es considerado representativo de los sistemas campesinos del Secano Interior, se plantea que el conjunto de indicadores seleccionados puede ser una herramienta apropiada para evaluar la sustentabilidad predial de otros sistemas campesinos o para monitorear futuros programas de desarrollo agrícola en esta zona.

En general, la evolución del sistema agroecológico reflejó un progreso en los atributos de productividad, estabilidad, resiliencia y autogestión, el cual se reflejó en el comportamiento de los 16 indicadores evaluados, especialmente de aquellos relacionados con la estabilidad productiva y resiliencia frente a las emergencias climáticas ocurridas en los años 1998 y 2007.

En la dimensión agroambiental, el indicador más destacable fue la producción agrícola, cuyo incremento se debió a una mayor biodiversidad agrícola, una mayor cobertura vegetal y al manejo ecológico del suelo. Éste último se tradujo en un incremento del contenido de materia orgánica (MOS), una mayor estabilidad estructural (EA) y una menor pérdida de suelo por erosión hídrica, lo que permitió revertir gradualmente la degradación del suelo y recuperar su fertilidad.

Los resultados anteriores responden a un manejo agronómico integral, basado principalmente en la producción y aplicación de volúmenes crecientes de enmiendas orgánicas (compost) y de biofertilizantes líquidos obtenidos del mismo agroecosistema, en la mantención de una cubierta vegetal o mulch, en el uso de rotaciones y policultivos y en el incremento de la biodiversidad.

En la dimensión económica, la mayor diversificación de rubros permitió alcanzar un alto nivel de eficiencia y estabilidad económica, que garantizó la disponibilidad de productos durante todo el año y la generación permanente de ingresos. Sin embargo, pese a la mayor cantidad y variedad de rubros incorporados, éstos aún concentran la generación del ingreso total en pocas fuentes, lo que reduce la resiliencia y aumenta el riesgo económico.

Aunque la producción de insumos prediales y la complementariedad entre subsistemas permitió reducir considerablemente los costos operacionales, la capacidad de autogestión del sistema no alcanzó la condición esperada, debido al costo creciente de la mano de obra que se requirió principalmente en el manejo del huerto polifrutal.



Finalmente, se concluye que el mayor nivel de sustentabilidad logrado después de 20 años en el sistema productivo del CET, demuestra que la estrategia de producción agroecológica es una alternativa apropiada para el desarrollo sustentable de la pequeña agricultura del Secano Interior. Los resultados obtenidos en esta evaluación pueden servir de referencia o meta para otros sistemas campesinos, que pretendan orientar adecuadamente sus esfuerzos laborales, técnicos y financieros hacia el logro de una mayor sustentabilidad predial.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abbona, E. A., S. J. Sarandón, M. E. Marasas and M. Astier. 2007. Ecological sustainability evaluation of traditional management in different vineyard systems in Berisso, Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 335-345.
- Acevedo, E. 2007. Trigo y medio ambiente. pp. 629-648. *In*: Mellado, M. El Trigo en Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Centro Regional de Investigación Quilamapu. Chillán, Chile. Colección Libros INIA N° 21. 684 p.
- AGRIMED. 2008. Análisis de Vulnerabilidad del Sector Silvoagropecuario, Recursos Hídricos y Edáficos frente a Escenarios de Cambio Climático: Capítulo I. CONAMA-ODEPA-FIA. Santiago, Chile. 181 p.
- Alonso, A. M. y G. I. Guzmán. 2006. Evaluación comparada de la sostenibilidad agraria en el olivar ecológico y convencional. *Agroecología* 1: 63-73.
- Altieri, M. 1999. *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*. 4ta Ed. Nordan-Comunidad, Montevideo, Uruguay. 338 p.
- Altieri, M. 2009. *Vertientes del Pensamiento Agroecológico: Fundamentos y aplicaciones*. Sociedad Latinoamericana de Agroecología (SOCLA). Medellín, Colombia. 364 p.
- Altieri, M. 2013. Construyendo resiliencia socioecológica en agroecosistemas: Algunas consideraciones conceptuales y metodológicas. pp. 94-104. *In*: Nicholls, C., L. Ríos y M. Altieri (Eds.). *Agroecología y resiliencia socioecológica: Adaptándose al cambio climático*. REDAGRES-CYTED-SOCLA. Medellín, Colombia. 207 p.
- Astier, M., O. R. Masera y Y. Galván-Moyoshi. 2008. *Evaluación de Sustentabilidad: Un enfoque dinámico y multidimensional*. Valencia, España: Imag Impressions. 200 p.
- Barrera, J. A. 2005. *Susceptibilidad de Erosión: VIII Región*. Informe Fignal a CONAF. Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
- Baginsky, C., O. Seguel y A. Contreras. 2010. *Impacto de la utilización de cultivos y enmiendas orgánicas sobre la funcionalidad del suelo*. MAVAL. Santiago, Chile. 124 p.
- Berryman, C., D. Davies, C. Evans, M. Harrod, A. Hughes, R. Skinner, R. Swain and D. Soane. 1982. *Techniques for measuring soil physical properties*. Formerly Advisory Paper N°18. Reference Book 441. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Swedish. 116 p.

- Bowman, G., C. Shirley and C. Cramer. 2000. Benefits of cover crops. Managing cover crops profitably. CMR Editorial. United States. 201 p.
- Bukerfield, J. C. and K. A. Webster. 1996. Earthworms, mulching, soil moisture and grape yields: earthworm response to soil management practices in vineyards. Australian and New Zealand Wine Industry Journal 11 (1): 47-53.
- Casanova, M., O. Seguel., J. Haberland and C. Kremer. 2008. Propiedades físicas: indicadores de calidad y salud de suelos. Antumapu-Revista de extensión y comunicación Agropecuaria y Medio Ambiental 6 (1-2): 32-34.
- CET. 1994. Programa cofinanciado INDAP de Agroecología en la comuna de Yumbel. Centro de Educación y Tecnología. Yumbel, Chile.
- CIREN. 2010. Determinación de la erosión potencial y actual de los suelos de Chile: Región del Bío-bío. Síntesis de Resultados. Centro de Información de Recursos Naturales, Santiago, Chile. 51 p.
- Conway, G. R. 1987. The properties of agroecosystems. Agricultural Systems 24: 95-117.
- CORFO. 1965. Geografía Económica de Chile. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 885 p.
- Del Pozo, A. y S. Del Canto. 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Centro Regional de Investigación Quilamapu. Chillán, Chile. 116 p.
- Di Felice, V., R. Mancinelli, R. Proulx and E. Campiglia. 2012. A multivariate analysis for evaluating the environmental and economical aspects of agroecosystem sustainability in central Italy. Journal of Environmental Management 98: 119-126.
- Eira, A. 1992. Solubilizacao microbiana do fosfatos. Microbiología do Solo. Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo. Campinas Brasil. 243-255 p.
- Endlicher, W. 1988. El problema de la erosión del suelo en la Cordillera de la Costa de la VIII Región. Revista de Geografía Norte Grande 15: 11-27.
- Fernandes, L. A. and P. Woodhouse. 2008. Family farm sustainability in southern Brazil: An application of agri-environmental indicators. Ecological Economics 66: 243-257.
- Fortun, C. y A. Fortun. 1989. Diversos aspectos sobre el papel de la materia orgánica humificada en la formación y estabilización de los agregados del suelo. Edafología Agrobiología 48: 185-204.
- Funes-Monzote, F. R., M. Monzote, E. A. Lantinga, C. J. Ter Braak, J. E. Sánchez and H. Van Keulen. 2009. Agro-Ecological Indicators (AEIs) for dairy and mixed farming systems

classification: Identifying alternatives for the Cuban livestock sector. *Journal of Sustainable Agriculture* 33 (4): 435-460.

Galán, A. L. y A. L. Pérez. 2012. Nuevos índices para evaluar la Agrobiodiversidad. *Agroecología* 7: 109-115.

Gómez, A. A., D. S. Kelly, J. K. Syers and K. J. Coughlan. 1996. Measuring sustainability of agricultural systems at the farm level. *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America Special Publication 49: 401-409.

González, L. 2011. La degradación de las cuencas hidrográficas del Chile central. pp. 123-137. *In: Casanova, M. (Ed.). Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo-Universidad de Chile. Santiago, Chile. Boletín N° 24. 173 p.

Halberg, N. G. Verschuur and G. Goodlass. 2005. Farm level environmental indicators: are they useful? An overview of green accounting systems for European farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105: 195-212.

Holeplass, H., B. R. Singh and R. Lal. 2004. Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotation and nitrogen fertilization in an inceptisol in southeastern Norway. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70: 167-177.

Honorato, R., L. Barrales, I. Peña y L. Barrera. 2001. Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX región de Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*. 28 (1): 7-14.

Infante, A. 1986. Descripción de un sistema de producción intensivo de hortalizas a nivel familiar bajo tecnología orgánica. Tesis para optar al Título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 178 p.

Infante, A. 2004. Descripción y evaluación de una estrategia para el intercambio de semillas y la conservación de la biodiversidad en comunidades campesinas del Secano Interior del sur de Chile. Tesis de Maestría en Desarrollo Rural y Agricultura Sustentable. Universidad Católica de Temuco. Temuco, Chile. 110 p.

Infante, A. y K. San Martín. 2004. Manual de Agroecología. Centro de Educación y Tecnología (CET). Cromia. Yumbel, Chile. 168 p.

Infante, A. 2013. Agroecología y programas de desarrollo sustentable en el secano de Chile. pp. 1-17. *In: Nicholls, C., L. Ríos y M. Altieri (Eds.). Agroecología y resiliencia socioecológica: Adaptándose al cambio climático*. REDAGRES-CYTED-SOCLA. Medellín, Colombia. 207 p.

- Infante, A. y F. Infante. 2013. Percepciones y estrategias de los campesinos del secano para mitigar el deterioro ambiental y los efectos del cambio climático en Chile. *Agroecología* 8: 71-78.
- Kay, B. D., A. P. Da Silva and J. A. Baldock. 1997. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: Predictions using pedotransfer functions. *Canadian Journal of Soil Science* 77: 655-667.
- Leyva, A. y A. Lores. 2012. Nuevos índices para evaluar la agrobiodiversidad. *Agroecología* 7: 109-115.
- Liebman, M. 1999. Sistemas de policultivos. pp: 191-202. *In: Altieri, M. (Ed.). Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable. 4ta Ed. Nordan-Comunidad, Montevideo, Uruguay. 338 p.*
- Lin, B. 2007. Agroforestry management as adaptative strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 144: 85-94.
- Loch, R. J. and C. J. Rosewell. 1992. Laboratory methods for measurement of soil erodibilities (K-factors) for the Universal Soil Loss Equation. *Australian Journal of Soil Research* 30: 233-248.
- López-Ridaura, S., H. Van Keulen, M. K. Van Ittersum and P. A. Leffelaar. 2005. Multiscale methodological framework to derive indicators for sustainability evaluation of peasant natural resource management systems. *Environment, Development and Sustainability* 7: 51-69.
- Mader, P., A. Fliebbach, D. Dubois, L. Gunst, P. Fried and U. Niggli. 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296: 1694-1697.
- Maldonado, I. 2004. El clima en el área agroecológica del Secano Interior. pp. 97-109. *In: Pérez, C. (Ed.). Seminario Internacional hacia una Agricultura Sustentable y Conservacionista del Medio Ambiente con la Participación de Productores. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. Chillán, Chile. Actas INIA N° 26. 558 p.*
- Masera, O. R., M. Astier and S. López-Ridaura. 1999. Sustainability and Natural Resource Management. The MESMIS Evaluation Framework. Mundiprensa-GIRA-UNAM, Mexico. 109 p.
- Mellado, M. 1991. Comportamiento del trigo y otros cereales en áreas con déficit hídrico de la Zona Centro Sur de Chile. pp. 133-133. *In: Mohan, M. (Ed.). Mejoramiento de la resistencia a la sequía en trigo: Memoria del taller. CIMMYT. México D.F.*
- Mellado, M., I. Matus y R. Madariaga. 2008. Antecedentes sobre el centeno en Chile y otros países. Ministerio de Agricultura. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. Chillán, Chile. Boletín INIA N° 182. 64 p.

- Millas, G. 1977. Determinación de pérdidas de suelo utilizando la ecuación universal de la erosión en 10 localidades del sur de Chile. Tesis Universidad de Chile. Facultad de Agronomía. 110 p.
- Moldan, B., S. Janousková and T. Hák. 2012. How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. *Ecological indicators* 17: 4-13.
- Morais, H., P. Caramori, A. Ribeiro, J. Gomes and M. Kogushi. 2006. Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41: 763-770.
- Murgueitio, E., Z. Calle, F. Uribe, A. Calle and B. Solorio. 2011. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management* 261: 1654-1663.
- Museau, H. 2007. Évaluation de la durabilité d'un système de production agro-sylvo-pastoral (SASP) diffuse par la Corporation "Centro de Educación y Tecnología (CET)" dans la commune de Yumbel, région Biobío au Chili. Mémoire de fin d'études Master Professionnel spécialité Sciences et Productions Végétales, Université de Rennes 1. Rennes, France. 56 p.
- Narea, G. y C. Valdivieso. 2002. Agricultura Orgánica: Situación actual, desafíos y técnicas de producción. Ministerio de Agricultura. Servicio Agrícola y Ganadero. 150 p.
- Nicholls, C., L. Ríos y M. Altieri. 2013. Agroecología y resiliencia socioecológica: Adaptándose al cambio climático. REDAGRES-CYTED-SOCLA. Medellín, Colombia. 207 p.
- NEIKER, 2011. Tarjetas de Salud de Agroecosistemas: Conservación de la biodiversidad edáfica y vegetal en áreas pascícolas de montañas y fondos de valle. Proyecto SOIL-Montana 2011-2014, España. 26 p.
- Oades, J. M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- OECD. 1999a. Environmental indicators for agriculture: Concepts and Framework. Volume 1. Organization for Economic Co-operation and Development OECD Press. Paris, France.
- Ovalle, C. y A. Del Pozo. 1994. La Agricultura del Secano Interior. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. Cauquenes, Chile. 234 p.
- Peña, L. 1983. Determinación de los factores R, K y C de una ecuación de predicción de erosión para la Precordillera de la VIII Región. *Agricultura Técnica* 43: 151-158.
- Peña, L. y P. Carrasco. 1993. Clasificación de Erosión de Suelos de la Cuenca del Biobío. Proyecto FONDECYT N° 91/0335. Universidad de Concepción. Chillán, Chile.

Peterson, P. 2002. Evaluando la sustentabilidad: Estudios de caso sobre impactos de innovaciones agroecológicas en la agricultura familiar de diferentes países latinoamericanos. *Revista LEISA* 19: 64-67.

Pino, C. 2009. Evaluación y comparación de sostenibilidad de predios bajo manejo orgánico certificado en las Regiones del Maule y Bío-Bío. *Revista Brasileira de Agroecología* 4 (2): 747-750.

Pino, C., B. Jiménez y G. Vidal. 2012. Validación de un método de autoevaluación de sostenibilidad para sistemas de producción orgánica. pp. 172-186. *In: Céspedes, C. (Ed.). Producción hortofrutícola orgánica. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. Chillán, Chile. Boletín INIA N° 232. 192 p.*

Pla, C. 2006. Biodiversidad: Inferencia basada en el Índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia* 31 (8).

PLADECO. 2013. Orientaciones Globales, Presupuesto Municipal y Programa Anual 2013-2016. Servicio de Planificación Comunal de la Municipalidad de Yumbel. Yumbel, Chile. 247 p.

Prager, M., O. Sanclemente, M. Sánchez de Prager, J. Miller y D. Sánchez. 2012. Abonos verdes: Tecnología para el manejo agroecológico de los cultivos. *Agroecología* 7: 53-62.

Ramert, B., R. L. Bugg, M. S. Clark, M. R. Werner, R. P. Mc Guinn, D. D. Poufel and A. M. Berry. 2000. Influence of *Lombicus terrestris* inoculation on green manure disappearance and decomposer community in walnut orchard. *Soil Biology and Biochemistry* 33 (11): 1509-1516.

Rasul, G. and G. B. Thapa. 2004. Sustainability of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh: An assessment based on environmental, economic and social perspectives. *Agricultural Systems* 79: 327-351.

Rey-Novoa, J. M. y F. Funes-Monzote. 2013. La familia campesina Rey-Novoa: Una transición agroecológica. *Revista LEISA* 29: 12-15.

Riquelme, J. 1994. Calibration of de Erosion-Productivity Model EPIC for three soil tillage systems in the Secano Interior of Chile. 8th ISCO Conference. New Delhi, India. 15 p.

Riquelme, J., C. Pérez y S. Yoshikawa. 2004. Manejo y prácticas conservacionistas del suelo para un desarrollo sustentable del secano. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. Chillán, Chile. Boletín INIA N° 124. 199 p.

Rouanet, J. L. 2005. Rotaciones de cultivos y sus beneficios para la agricultura del sur. Fundación Chile. Santiago, Chile. 91 p.

- Ruiz, C., C. Pérez y K. Matsuya. 2004. Sistemas productivos sustentables en el Secano Interior. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. Chillán, Chile. Boletín INIA N° 125. 87 p.
- Ruiz, C. y M. Jeldres. 2008. Emergencias climáticas en la agricultura. Recomendaciones para la Región del Bío-bío. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán. Chile. Boletín INIA N° 184. 246 p.
- Russel, W. R. 1973. Soil conditions and plant growth. 10<sup>th</sup> Ed. Longman London and New York, United States. 618 p.
- Sadzawka, A., M. A. Carrasco, R. Grez y M. Mora. 2004. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Santiago, Chile. 112 p.
- Salazar, O. y F. Nájera. 2011. Pauta interpretativa de análisis de fertilidad completa de suelos. Agenda técnica de Martínez & Valdivieso. 3 p.
- Santibáñez, F., P. Santibáñez y C. Caroca. 2011. Interacciones entre el cambio climático y la degradación de tierras. pp: 11-18. *In*: Casanova, M. (Ed.). Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo-Universidad de Chile. Santiago, Chile. Boletín N° 24. 173 p.
- Sarandón, S. y C. Flores. Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: Una propuesta metodológica. *Agroecología* 4: 19-28.
- Seguel, O., V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica* 63(3): 287-297.
- Selles, G., R. Ferreyra, R. Ahumada, M. Santelices, J. García-Huidobro y R. Ruiz. 2006. Lombrices de tierra como agentes mejoradores de las propiedades físicas del suelo en huertos frutales. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. Santiago, Chile. Boletín INIA N° 140. 92 p.
- Shannon, C. E. and W. Weaver. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana IL: University of Illinois Press.
- Shepherd, G. 2000. Visual soil assessment. Vol 1: Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. Horizon and Landcare Research. Palmerton. 84 p.
- Shepherd, T. G., S. Sagar, R. H. Newman, C. W. Ross and J. L. Dando. 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fraction in New Zealand soils. *Australian Journal Soil Research* 39: 465-489.



- Smyth, A. J. and J. Dumansky. 1995. A framework for evaluating sustainable land management. *Canadian Journal of Soil Science* 75: 401-406.
- Speelman, E. N., S. López-Ridaura, C. N. Aliana, M. Astier and O. Masera. 2007. "Ten Years of Sustainability Evaluation using MESMIS Framework: Lessons Learned from in Application in 28 Latin American Case Studies". *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 14: 345-361.
- Stolpe, N. 2006. Descripciones de los Principales Suelos de la VIII Región de Chile. Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Universidad de Concepción. Chillán, Chile. 84 p.
- Stolpe, N. 2011. Conservación de Suelos. 2da Ed. Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Universidad de Concepción. Chillán, Chile. 148 p.
- Sun, H. and R. Shao. 2009. Herfindahl index applied to Fourier analysis. *Digital Signal Processing* 19: 726-730.
- Ten Brink, B. J., S. H. Hosper and F. Colin. 1991. A Quantitative Method for Description and Assessment of Ecosystems: The AMOEBA-approach. *Marine Pollution Bulletin* 23: 265-270.
- Toro, P., A. García, A. G. Gómez-Castro, J. Perea, R. Acero y V. Rodríguez-Estevez. 2010. Evaluación de la Sustentabilidad en Agroecosistemas. *Archivos de Zootecnia* 59: 71-94.
- USDA, 1999. Soil Quality Test Kit Guide. United Agriculture Department of Agriculture. Washington DC, USA. 88 p.
- Van der Werf, H. M. G. and J. Petit. 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93: 131-145.
- Vásquez, L. y J. M. Álvarez. 2011. Control ecológico de poblaciones de plagas. Instituto de Investigaciones de Sanidad Vegetal. Ministerio de la Agricultura de Cuba. La Habana, Cuba. 134 p.
- Venegas, R. 1997. Indicadores de sustentabilidad predial. *Agroecología y Desarrollo* N° 11/12. CLADES. 114 p.
- Vega, D. 2009. Medición comparativa de la sustentabilidad en agroecosistemas campesinos polirubricas: Estudios de casos en la comunidad de Tralcao, Provincia de Valdivia, Región de los Ríos. Tesis de Licenciatura en Agronomía. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 124 p.
- Vilain, L. 2003. La Méthode IDEA: Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles. Guide d'utilisation. EDIPS-EDUCAGRI, France. 151 p.

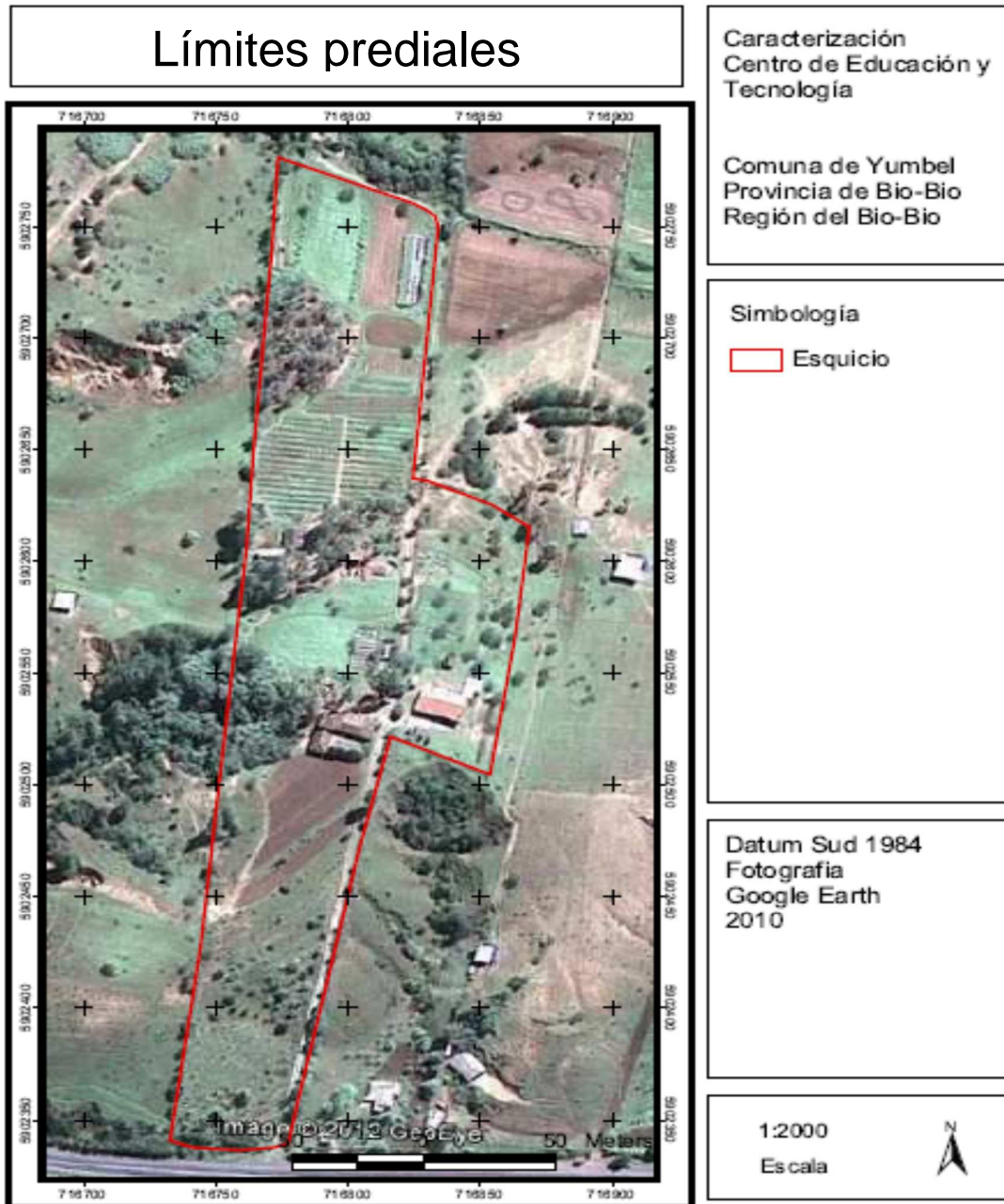
Willey, R. W. 1990. Resource use in intercropping systems. *Agriculture and Water Management*. 17: 215-231.

Wischmeier, W. and D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A Guide to conservation planning. *Agricultural Handbook N° 537*. Department of Agriculture, Washington DC, USA.

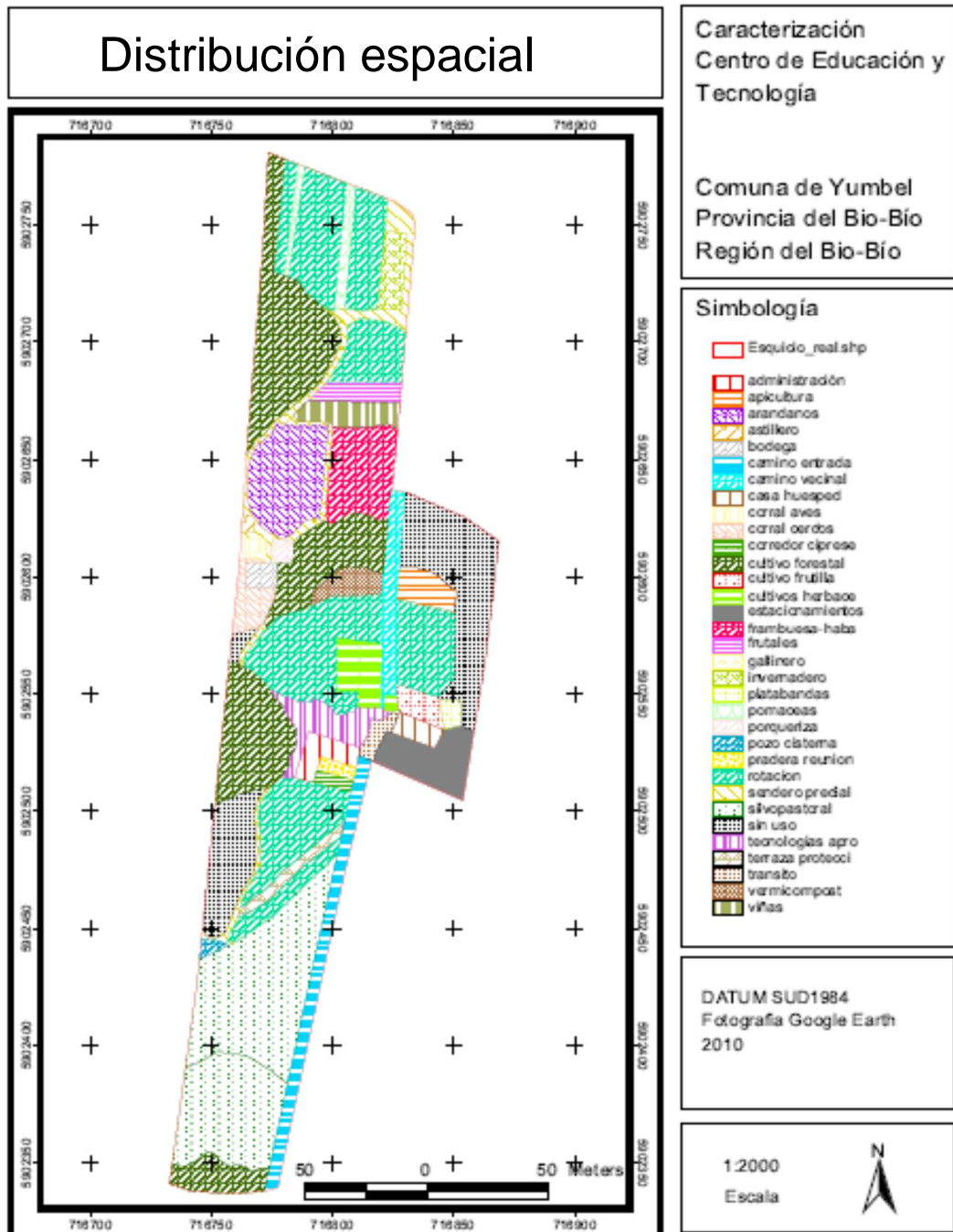
Zhang, B., R. Horn and P. Hallet. 2005. Mechanical resilience of degraded amended with organic matter. *Soil Science of America Journal* 69: 864-871.

### ANEXOS

Anexo 1. Límites prediales de la central demostrativa del CET.

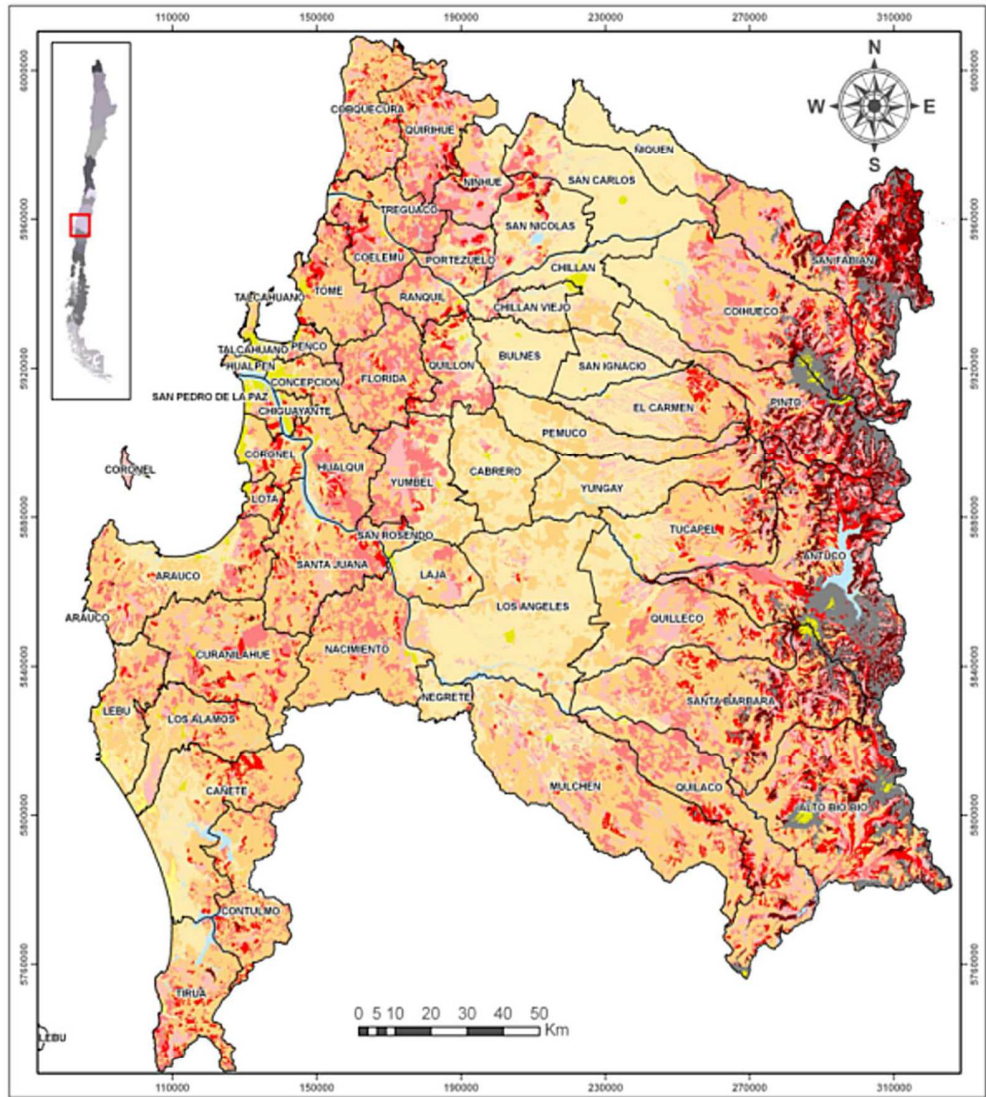


**Anexo 2.** Distribución espacial de los subsistemas y unidades de manejo en la central demostrativa del CET.



Anexo 3. Mapa de erosión actual de la Región del Bío Bío (CIREN, 2010).

### CARTOGRAFÍA EROSIÓN ACTUAL REGION VIII DEL BIO BIO



Simbología Erosión Nacional		
Descripción		
	EROSION MUY SEVERA	
	EROSION SEVERA	
	EROSION MODERADA	
	EROSION LIGERA	
	SIN EROSION	
	EROSION NO APARENTE	PLAYAS Y DUNAS
		RIOS Y CUERPOS DE AGUA
		ROCAS Y AFLORAMIENTOS ROCOSOS
		OTROS USOS

**Anexo 4.** Factores de erosividad de la lluvia (R) estimados para varios sectores de la Región del Bío-bío de Chile (Stolpe, 2011).

Sector	R
Primeros faldeos de la Precordillera de Ñuble	3274
Depresión Central (área de Chillán)	2143
Depresión Central (área de Mulchén)	3258
Al sur del río Itata y al poniente de una línea que forman los pueblos de Ñipas, Florida y Nacimiento	2400
Primeros faldeos de la Precordillera de Bío-bío	4360
Sector elevado de la Precordillera de Bío-bío (altitud sobre 450 m)	5400
Sector al poniente de Angol	2650

**Anexo 5.** Factores de erodabilidad de suelos para algunas series de la Región del Bío-bío (Stolpe, 2006).

Serie de suelo	Taxonomía	K
Arenales	Isotic, mesic Typic Xeropsamments	0,0018
Arrayán	Medial, amorphic, thermic Humic Haploxerands	0,0094
Bulnes	Fine, mixed, active, thermic Duric Argixerolls	0,0278
Cauquenes	Fine, mixed, active, mesic Ultic Palexeralfs	0,0240
Collipulli	Very fine, hallosytic, mesic Xeric Paleumults	0,0290
Constitución	Fine, mixed, semiactive, mesic Ultic Palexeralfs	0,0194
Pocillas	Fine, mixed, active, thermic Ultic Palexeralfs	0,0270
Santa Bárbara	Medial, amorphic, mesic Typic Haploxeralfs	0,0128

**Anexo 6.** Porcentaje de suelo cubierto en sectores con y sin manejo, de los subsistemas y unidades productivas del CET en la temporada 2012-2013.

Subsistema	Unidad productiva	Área (m <sup>2</sup> )	Cobertura de suelo (%)										Media
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Agrícola	Rotación 1	4.075	90	90	90	100	50	15	70	85	100	90	78
	Rotación 2	1.640	95	25	90	60	40	30	65	27			54
	Huerto Frutal	2.700	95	98	55	55	80						76,6
	Invernadero	316	60	40	25	85	72						56,4
Promedio Subsistema Agrícola													<b>66,3</b>
Forestal	Sistema Silvopastoral	3.500	45	65	95	60	65	55	85	95	65	25	65,5
	Franjas Forestales	10.000	80	78	75	74	77	85	97				80,9
Promedio Subsistema Forestal													<b>73,2</b>
<b>Media ponderada (predial)</b>													<b>75,1</b>
Condición sin manejo (t <sub>0</sub> )			20	95	90	12	53	42	97	9	85	70	<b>57,6</b>



**Anexo 7.** Resultados de análisis de suelos en central demostrativa CET (2011).

	Suelo erosionado	Potrero de arándanos	Potrero en rotación	Cama alta
Materia orgánica (%)	1,0	1,9	3,6	9,1
pH	7,22	6,84	6,48	7,25
N disponible	1,3	2,7	4,6	34,0
P disponible	1,0	5,85	12,93	202,62
K disponible	35,90	92,0	307,2	643,0

**Anexo 8.** Valores de tolerancia de erosión en algunos suelos de la Región del Bío-bío (Stolpe, 2011).

Condiciones	Tolerancia de erosión		
	Suelos volcánicos (trumaos)	Suelos graníticos o metamórficos ton ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Suelos volcánicos antiguos (rojo arcilloso)
Pendiente de 6% y erosión ligera	10-12	7-8	5-7
Pendiente 6-10% y erosión ligera a moderada	7-8	5-6	4-5
Pendiente mayor a 10% y erosión moderada a severa	5-6	3-4	2-3

**Anexo 9.** Curvas de evapotranspiración y precipitación reales y de un año normal para Los Ángeles, Región del Bío-bío. Septiembre 2007 a Marzo 2008.