

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

Área Académica Agroforestal

Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción



Trabajo Final de Graduación sometido al Tribunal del Área Académica Agroforestal del Tecnológico de Costa Rica para optar por el grado de Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción

Plantas certificadas de cítricos: Combatiendo el HLB y promoviendo la sostenibilidad ambiental en la cuenca alta del río Nosara y subcuenca del río Lajas, Hojancha

Ing. FABIÁN HERRERA JARA

Cartago, Costa Rica, 2025

THIS WORK IS LICENSED UNDER CC BY-NC
4.0 [HTTPS://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-NC/4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0)

Hoja de aprobación

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Tribunal del Área Académica Agroforestal del Tecnológico de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de Magister en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción.

Dr. Fabián Echeverría Beirute

Profesor Tutor

MSc. Dorian Carvajal Venegas

Lector

Dr. Dagoberto Arias Aguilar

Presidente del Tribunal

Fabián Alonso Herrera Jara

Sustentante

Índice General.

Índice General.....	i
Índice de Figuras.....	iii
Índice de Cuadros.....	vii
Índice de Anexos.....	x
Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
El problema de investigación y su importancia.....	4
Objetivos.....	6
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos.....	6
CAPITULO 1. DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA PRODUCCIÓN DE PLANTAS CERTIFICADAS DE CÍTRICOS.....	7
Antecedentes.....	7
Marco teórico.....	11
Marco metodológico.....	25
Enfoque y tipo de investigación.....	25
Marco espacial y temporal.....	31
Metodología para la sistematización de los objetivos.....	34
Resultados.....	39
Conclusiones.....	167
Recomendaciones.....	168

CAPITULO 2. DIAGNÓSTICO Y CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO NOSARA Y LA SUBCUENCA DEL RÍO LAJAS, HOJANCHA, GUANACASTE	168
.....	168
Antecedentes	168
Marco teórico	170
Marco Metodológico	186
Enfoque y tipo de investigación	186
Marco espacial y temporal	187
Sistematización de los objetivos	190
Resultados	214
Discusión.....	249
Conclusiones.....	253
Recomendaciones.....	254
Bibliografía	256

Índice de Figuras.

Figura 1. Modelo de estudio de casos adaptado de Estrada & Alfaro (2015).	26
Figura 2. Ciclo de investigación-acción según Latorre (2004).	27
Figura 3. Modelo de análisis documental adaptado de Vega & Marti (2005).	28
Figura 4. Proceso metodológico de la investigación del presente estudio.....	30
Figura 5. Delimitación del área de estudio.....	32
Figura 6. Mapa de ubicación ITCR y Finca La Vega, San Carlos.	34
Figura 7. Esquema conceptual para el establecimiento de un programa de propagación de material propagativo de cítricos, también denominado planta sana.	41
Figura 8. Fases de conceptualización de un programa de certificación de cítricos.	43
Figura 9. Flujograma operativo multinivel para el SPS.	61
Figura 10. Flujo de introducción y procesamiento de accesiones de cítricos y variedades promisorias.	65
Figura 11. Relación entre el tamaño del meristemo, su capacidad de regeneración y presencia de patógeno	73
Figura 12. Cámara de vapor utilizada para el tratamiento de varetas.	75
Figura 13. Microinjertación de cítricos para limpieza de patógenos sistémicos.....	77
Figura 14. Ejemplo de un banco Productor de Semillas.	82
Figura 15. Multiplicación de patrones por medio de cultivo de tejidos.	84
Figura 16. Contenedor "air-pot" de 38 litros para cultivo de plantas madre.	89
Figura 17. Ejemplo de siembra en maceta para un banco de Germoplasma.	90
Figura 18. Termo para crioconservación en nitrógeno líquido.	93
Figura 19. Ejemplo de un banco de Fundación establecido en maceta.....	96
Figura 20. Ejemplo de un banco de Multiplicación de yemas.	100

Figura 21. Esquema de multiplicación de accesiones en el banco de Multiplicación de yemas.....	104
Figura 22. Tubete de 150 cm ³ y portatube de 120 espacios.....	105
Figura 23. Defectos de raíz y tallo motivos de descarte.	106
Figura 24. Maceta y porta maceta para banco de Multiplicación.....	108
Figura 25. Ejemplo de una planta desarrollada en un sistema “ <i>pot-in-frame</i> ”.....	109
Figura 26. Ejemplo de vivero comercial certificado.....	111
Figura 27. Esquema básico de trazabilidad del SPS.....	114
Figura 28. Ejemplo de un mapa de distribución de variedades en un bloque de fundación.	116
Figura 29. Ejemplo de formato para reporte de corta de yemas para la trazabilidad en Nivel 2 del SPS.....	117
Figura 30. Ejemplo de formato para reporte de corta de yemas para la trazabilidad en Nivel 3 del SPS.....	118
Figura 31. Sistema para determinar el ID planta/lote en el SPS.....	120
Figura 32. Reservorio de 500 m ³ y 400 m de espejo de agua.	121
Figura 33. Paneles solares para generación eléctrica en invernaderos.	122
Figura 34. Experimento a escala en túnel de viento con exposición de la ventana cenital.	124
Figura 35. Experimento, a escala, en túnel de viento con exposición transversal a los vientos.....	124
Figura 36. Croquis unidad de indexación, bodega y oficina del SPS.....	131
Figura 37. Geotextiles de uso regular en invernaderos.	132
Figura 38. Croquis bloque de Cuarentena.....	136
Figura 39. Estructura europea para la protección de árboles semilleros.	139

Figura 40. Banco de Producción de Semilla botánica del SPS.....	142
Figura 41. Croquis del banco de Germinación y Desarrollo de Propágulos	145
Figura 42. Croquis banco de Germoplasma del SPS.	149
Figura 43. Croquis banco de Fundación del SPS.....	153
Figura 44. Croquis banco de Multiplicación	157
Figura 45. Diseño de reservorio revestido con geomembrana.	162
Figura 46. Acción de pozo canadiense en invierno y verano.....	164
Figura 47. Ubicación área de estudio del proyecto, Hojancha, Guanacaste, Área de Conservación Tempisque.	189
Figura 48. Curva hipsométrica cuenca alta del río Nosara.	219
Figura 49. Curva hipsométrica subcuenca del río Lajas.	220
Figura 50. Mapa hipsométrico cuenca alta río Nosara y subcuenca río Lajas.....	221
Figura 51. Mapa delimitación de la cuenca alta del río Nosara y subcuenca del río Lajas, cauce principal y red hídrica o drenaje.	223
Figura 52. Mapa de cobertura de suelo en la cuenca alta río Nosara y subcuenca río Lajas.....	227
Figura 53. Clasificación por capacidad de uso del suelo en ZPMA	229
Figura 54. Clasificación por capacidad de uso del suelo en las cuencas CarNS y SrLj.	230
Figura 55. Modelación espacial de ETR en las unidades de estudio.....	232
Figura 56. Modelación espacial de flujos hídricos que identifica áreas críticas de esorrentía en las unidade de estudio.....	233
Figura 57. Clasificación espacial de erosión en CarNS y SrLj.....	237
Figura 58. Cultivo de cítricos en la cabecera de la cuenca alta del río Nosara.....	238

Figura 59. Mapa distribución área de potrero y cultivo de cítricos en la cuenca alta del río Nosara y subcuenca del río Lajas.	239
Figura 60. Principales resultados de la encuesta para determinar el valor socioeconómico de la citricultura en Hojancha.	241
Figura 61. Distribución porcentual de la valoración económica comunitaria de la citricultura.	243
Figura 62. Jerarquización de problemáticas ambientales según percepción comunitaria.	246
Figura 63. Resultados de la valoración de los servicios ecosistémicos percibidos en la comunidad de Hojancha.	248
Figura 64. Potreros en las cabeceras de la CarNs (A) y SrLj (B y C) en Monte Romo, Hojancha. Potrero y finca forestal maderable (<i>Tectona grandis</i>) en la SrLj (D).	251

Índice de Cuadros.

Cuadro 1. Distritos productores de cítricos de la Península de Nicoya, clasificación por quintil de desarrollo y su posición a nivel nacional.	23
Cuadro 2. Comparativo del Índice de Desarrollo Humano (IDH) cantonal y sus componentes para cantones de la Península de Nicoya.	24
Cuadro 3. Metodologías técnicas utilizadas para el diseño de un sistema para la producción de plantas certificadas de cítricos.	37
Cuadro 4. Variables y actividades para la consecución del objetivo.	38
Cuadro 5. Total de fincas con cultivo de naranja por extensión sembrada y en edad de producción en hectáreas, y cantidad de plantas dispersas, según provincia.	46
Cuadro 6. Precio histórico y proyectado en vivero por planta de cítrico tradicional: naranja, limones y mandarinas.	48
Cuadro 7. Cantidad de viveristas de cítricos por cantón y/o provincia.	48
Cuadro 8. Cantidad de semillas de portainjertos por litro de las principales variedades utilizadas en la citricultura, precios por volumen en dólares americanos.	52
Cuadro 9. Patrones con características de interés para la citricultura nacional.	54
Cuadro 10. Compatibilidad entre variedades de cítricos y patrones de uso común.	55
Cuadro 11. Genética utilizada en procedimientos de interinjerto en producción de plantas de cítricos.	57
Cuadro 12. Variedades de cítricos de interés (accesiones) y cantidades propuestas de material propagativo de importación para el establecimiento del SPS.	58
Cuadro 13. Lista de plantas utilizadas para indexación.	68
Cuadro 14. Enfermedades transmisibles por injerto en cítricos, método de detección y disponibilidad de prueba a nivel nacional.	70
Cuadro 15. Patrones de cítricos de interés para el SPS.	85

Cuadro 16. Parámetros de referencia para manejo nutricional en sustratos inertes... ..	87
Cuadro 17. Tipos de contenedores y volumen de sustrato mínimos requeridos.....	88
Cuadro 18. Variedades (accesiones) y cantidades propuestas para el banco de fundación.....	97
Cuadro 19. Producción estimada de yemas y plantas por ser reemplazadas en el banco de Multiplicación.....	102
Cuadro 20. Requerimientos mínimos de producción en el banco de Germinación y Desarrollo de Propágulos.....	107
Cuadro 21. Elementos por considerar en la elaboración de un manual de certificación de plantas de cítricos.....	113
Cuadro 22. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en la oficina.....	127
Cuadro 23. Especificaciones para la construcción de la oficina en el SPS.....	127
Cuadro 24. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en bodega.....	129
Cuadro 25. Especificaciones para la construcción de la bodega en el SPS.....	130
Cuadro 26. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en el bloque de cuarentena.....	134
Cuadro 27. Especificaciones para la construcción del bloque de cuarentena en el SPS.....	135
Cuadro 28. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en bloque de indexación.....	138
Cuadro 29. Especificaciones para la construcción del bloque de indexación en el SPS.....	138
Cuadro 30. Especificaciones de herramientas y equipo requerido en banco de producción de semilla sexual.....	140
Cuadro 31. Especificaciones para la construcción del banco de producción de semilla sexual en el SPS.....	141

Cuadro 32. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en bloque de Germinación y Desarrollo de Propágulos.	143
Cuadro 33. Especificaciones para la construcción del bloque de Germinación y Desarrollo de Propágulos en el SPS.	144
Cuadro 34. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en el banco de germoplasma.....	147
Cuadro 35. Especificaciones para la construcción del banco de germoplasma en el SPS.	148
Cuadro 36. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en cada una de las unidades que conformarán el banco de Fundación.....	151
Cuadro 37. Especificaciones para la construcción para cada unidad que conformarán el banco de Fundación en el SPS.	152
Cuadro 38. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido por unidad en el banco de Multiplicación.	155
Cuadro 39. Especificaciones para la construcción de la unidad que conformarán el banco de Multiplicación en el SPS.	156
Cuadro 40. Propuesta de tamizaje para certificación en cítricos aplicable al SPS.	159
Cuadro 41. Cantidad de bancas porta macetas requeridas para el proyecto SPS.	160
Cuadro 42. Cantidad de sustrato requerido para el SPS.	160
Cuadro 43. Cantidad de contenedores requeridos en el SPS.	161
Cuadro 44. Interpretación de los índices de forma de Horton (F) y coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc).....	176
Cuadro 45. Metodología para el diagnóstico y caracterización de la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas, Hojancha.....	192
Cuadro 46. Variables cuantitativas derivadas, instrumentos de procesamiento, datos requeridos y fuente de referencia.	195

Cuadro 47. Lista de variables cuantitativas secundarias, instrumentos de procesamiento, datos requeridos, detalles y fuentes referenciales.....	197
Cuadro 48. Lista de variables cualitativas, instrumentos de procesamiento, datos requeridos, detalles y fuentes de referencia	198
Cuadro 49. Valores C de referencia para diferentes coberturas utilizados en el estudio.	209
Cuadro 50. Lista de participantes (informantes) claves identificados para profundizar en el contexto histórico y técnico del fenómeno en estudio.....	213
Cuadro 51. Caracterización cuenca alta río Nosara.	216
Cuadro 52. Caracterización subcuenca del río Lajas.	217
Cuadro 54. Clasificación de suelo por capacidad de uso en la cuenta alta del río Nosara y subcuenca del río Lajas.	229
Cuadro 55. Pérdida de suelo en las unidades de estudio por hectárea al año.	235

Índice de Anexos

Anexo 1. Calendario de actividades del proyecto de graduación 2024.	272
---	-----

Resumen

Este estudio desarrolla el diseño de un Sistema de Producción de Plantas Sanas de Cítricos (SPS) para viveros certificados y evalúa comparativamente los impactos ambientales entre sistemas citrícolas y ganaderos en las cuencas de los ríos Nosara y Lajas (Hojancha, Guanacaste). La investigación responde a la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles ante la posible expansión ganadera derivada del impacto del Huanglongbing (HLB) en los cultivos citrícolas regionales.

El SPS integraría componentes de biotecnología, conservación de germoplasma y multiplicación de yemas libres de patógenos, en terrenos del Instituto Tecnológico de Costa Rica para producir material vegetal certificado. Complementariamente, mediante análisis espaciales (SIG) y modelización de erosión (RUSLE), se cuantificaron los impactos ambientales de ambos sistemas productivos.

Los resultados indican que los sistemas citrícolas presentan menores tasas de erosión y mejor capacidad de regulación hídrica. Los estudios de percepción revelan una valoración positiva de las comunidades hacia la citricultura como actividad económicamente viable y ambientalmente sostenible. Estos hallazgos subrayan la importancia de desarrollar estrategias de adaptación ante el HLB que integren productividad y ecosistemas.

Las principales contribuciones de esta investigación incluyen: (1) bases para un modelo certificable para producción de material vegetal sano, (2) evidencia cuantitativa de los beneficios ambientales de la citricultura, y (3) fundamentos técnicos para políticas públicas que promuevan sistemas productivos sostenibles. El estudio demuestra el potencial de la citricultura como alternativa para un desarrollo territorial equilibrado en la región, ofreciendo soluciones concretas a los actuales desafíos fitosanitarios y ambientales.

Palabras clave: cítricos, certificación, HLB, RUSLE, cuencas.

Abstract

This project pursues two key goals: developing a Healthy Plant Production System (HPPS) for certified citrus nurseries and conducting a biophysical watershed diagnosis to compare land-use impacts between citrus and livestock production in Hojancha, Guanacaste. The study focuses on the Nosara and Lajas River watersheds, where unsustainable livestock expansion risks greater environmental degradation than regulated citrus cultivation.

The HPPS establishes a standardized certification protocol for disease-free citrus propagation, integrating biotechnological labs, germplasm conservation, and budwood multiplication at the Costa Rica Institute of Technology (ITCR). This model ensures phytosanitary integrity while enhancing yield and crop diversity.

A GIS-based biophysical analysis, employing the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), quantifies lower environmental impacts from citrus systems—reduced erosion and improved water retention—compared to livestock. The study addresses land-use shifts driven by Huanglongbing (HLB), which has disrupted regional citrus economies.

By combining HPPS implementation with watershed diagnostics, this project delivers a certified nursery framework to revive citrus production, demonstrates citriculture's superior sustainability over livestock, and informs land-use policies balancing agriculture with conservation. The findings highlight citrus farming's potential for economic resilience and advocate for HLB-adaptive practices that harmonize ecological and community well-being.

Keywords: citrus, certification, HLB, RUSLE, watersheds.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El Huanglongbing (HLB), es considerada la enfermedad bacteriana más destructiva de los cítricos a nivel mundial. La misma ha causado la pérdida de millones de hectáreas de cultivos y un incremento exponencial en los costos de manejo (Ghosh *et al.*, 2023). La ausencia de una cura y la rápida propagación de su agente causal, *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLAs), han intensificado la problemática (Thakuria *et al.*, 2023).

Esta enfermedad, diseminada por el vector *Diaphorina citri* (Liviidae) y por el uso de material de propagación infectado (Gottwald, 2010), se encuentra ampliamente distribuida y establecida en todo el territorio nacional (SFE, 2024). Debido a las limitaciones económicas y técnicas, los pequeños y medianos productores sufren serias complicaciones en la implementación de los programas de control necesarios (Belasque *et al.*, 2010).

El HLB suele obligar a la erradicación de las plantaciones en el corto o mediano plazo. En zonas con tradición ganadera, los citricultores han tendido a reemplazar los cítricos por la ganadería extensiva, que presenta un mayor impacto ambiental negativo. Este cambio agrava la vulnerabilidad de regiones ambientalmente frágiles frente a los efectos del cambio climático (Méndez, 2022; Ramírez, 2015). Un caso emblemático es el cantón de Hojanca, donde la citricultura ha desempeñado un papel crucial en el desarrollo sostenible; su declive, podría tener consecuencias significativas tanto a nivel económico como ecológico.

Hojanca ha sido reconocido internacionalmente por su exitosa gestión ambiental comunitaria, convirtiéndose en un modelo de desarrollo sostenible (Méndez, 2022; Ramírez, 2015). Tras una crisis de deforestación y sequías, la comunidad logró en menos de 40 años aumentar la cobertura boscosa a más del 50% del territorio, con un incremento significativo de los servicios ecosistémicos regionales (Madrigal *et al.*, 2012).

La expansión del cultivo de cítricos en el cantón de Hojanca durante la primera década del siglo XXI permitió un uso más adecuado de terrenos con severas limitaciones

productivas (principalmente suelos clase VII y VI, según Decreto N° 23214 MAG-MIRENEM), evitando su transformación en potreros o en áreas de cultivo de ciclo corto y mejorando los beneficios económicos del cantón.

Sin embargo, la ausencia de un sistema de certificación del material de siembra en Costa Rica constituye una amenaza existencial para la producción de cítricos ante la presencia endémica del HLB. La normativa vigente, enfocada en aspectos administrativos y de infraestructura, no contempla protocolos que se apeguen a los estándares científicos y técnicos de vanguardia para la producción segura de tejido propagativo de cítricos. Esta carencia incrementa el riesgo de pérdidas económicas, por consiguiente, de la sostenibilidad del sector (Méndez y García, 2017).

Ante esta problemática, el presente proyecto de graduación se enfoca en la planificación y diseño conceptual de un sistema de producción de plantas de cítricos libres de enfermedades de transmisión por injerto (ETI).

El Sistema de Producción de Planta Sana de Cítricos (SPS) es un proceso operativo estandarizado que asegura la certificación tanto fitosanitaria como genética de las plantas. Su implementación está diseñada para brindar al sector citricultor acceso a material propagativo de alta calidad, con el fin de:

- Diversificar los cultivos, optimizar la productividad y garantizar las inversiones.
- Aprovechar de manera eficiente la capacidad del suelo con material mejor adaptado a las diferentes zonas agroclimáticas del país.
- Establecer un protocolo replicable, adaptable a otros sistemas frutícolas (como aguacate o mango), gracias a su enfoque escalable y uso de principios universales.

De este modo, el SPS promueve una citricultura más sostenible y resiliente, capaz de enfrentar los desafíos fitosanitarios y ambientales actuales.

El proyecto propone el establecimiento del SPS en terrenos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Campus Local San Carlos, basado en estándares de producción internacionales como los de la Red Americana de Plantas Limpias para Cítricos de los Estados Unidos, Fundecitrus en Brasil, OIRSA en Centroamérica, entre otros. Este sistema contaría con componentes esenciales a mencionar:

- Laboratorios biotecnológicos: para saneamiento de tejidos y diagnóstico de enfermedades.
- Banco de Germoplasma: para la conservación de la diversidad genética de los cítricos en general.
- Banco de Fundación: para la producción de material vegetal libre de enfermedades de aquellas variedades de interés comercial.
- Banco de Multiplicación de yemas: para la propagación masiva de material vegetal sano de las variedades fundamentales para el comercio.
- Unidades de apoyo: bancos de Producción Semilla Sexual, Germinación y Desarrollo de Propágulos, Cuarentena.

Este proyecto además incluye un análisis integral de las condiciones biofísicas de la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas, ubicadas en Hojancha, Guanacaste. Estas zonas albergan una notable diversidad de ecosistemas y desempeñan un papel clave en la conservación de la biodiversidad del Área de Conservación Tempisque (ACT) y el Bosque Modelo Chorotega (BMCH), (Madrigal *et al.*, 2012).

La caracterización realizada identifica amenazas y oportunidades para el desarrollo sostenible de la región, ofreciendo una base técnica para:

- Fortalecer la competitividad del sector citrícola de Hojancha mediante políticas informadas.
- Articular la relación entre cobertura del suelo, producción agrícola y beneficios ambientales, promoviendo sinergias para el bienestar de las comunidades rurales.

Realizado entre junio y diciembre de 2024 (ver anexo 1), este estudio proporciona a los tomadores de decisiones herramientas estratégicas para impulsar un modelo de agricultura sostenible, equilibrando productividad y conservación.

El problema de investigación y su importancia

El Huanglongbing (HLB) representa una grave amenaza para la citricultura costarricense, con especial impacto en zonas vulnerables como la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas, que en conjunto abarcan el 48,76% del territorio de Hojancha, Guanacaste. La cuenca alta del río Nosara se origina en las zonas más elevadas del cantón, a 891 metros sobre el nivel del mar (msnm), mientras que la subcuenca del río Lajas nace en los cerros de Santa Elena, a 802 msnm.

Según la legislación ambiental costarricense (Decreto No. 23214 MAG-MIRENEM, 13 de abril de 1994), estas áreas presentan una clasificación de capacidad de uso de la tierra predominantemente en suelos clase VII (51,41%) y VI (46,38%), con una mínima proporción de clases III (1,05%) y II (1,16%). Esta distribución refleja severas limitaciones para la producción agrícola.

Actualmente por causa del HLB, huertos de cítricos están siendo sustituidos por actividades más degradativas como la ganadería extensiva, práctica históricamente arraigada en la región (D. Méndez, 2022; Ramírez, 2015). La inexistencia de plantas de cítricos con calidad fitosanitaria certificada, y los elevados costos asociados al control del HLB (Belasque *et al.*, 2010; Passos *et al.*, 2000), agravan esta problemática.

En su totalidad, Hojancha cuenta con aproximadamente 350 hectáreas de cítricos (Agencia Extensión Agropecuaria Hojancha, 2024). La posible erradicación del cultivo podría tener consecuencias socioeconómicas y ambientales significativas, particularmente en los distritos de Huacas y Monte Romo. Estos distritos, ubicados en el quintil II del Índice de Desarrollo Social (nivel bajo de desarrollo), presentan una dimensión económica muy limitada (18,1 y 20,6, respectivamente), en contraste con otras zonas cítricas como Palmichal de Acosta (41,2), (MIDEPLAN, 2023). Esta disparidad

subraya la vulnerabilidad de estas comunidades ante la pérdida de una actividad económica clave (Salazar y Vásquez, comunicación personal, 16/06/2024).

El contexto histórico de la región refuerza la urgencia de abordar esta problemática. Antes de 1978, las cuencas del cantón de Hojanca enfrentaban una grave deforestación, principalmente impulsada por la ganadería extensiva, cuyos efectos se agravaron durante la sequía de principios de la década de los 1990, que amenazó el modo de vida de las comunidades locales (D. Méndez, 2022).

No obstante, gracias a un notable esfuerzo de resiliencia ambiental y gestión comunitaria, en menos de cuatro décadas la cobertura boscosa superó el 50% del territorio. Esta recuperación boscosa se integró con una diversificación productiva. Las tradicionales caficultura y ganadería se complementaron con el auge forestal y con una citricultura incipiente que inicio con la siembra de naranjos para dotar de sombra a los cafetales que posteriormente se convirtió en una pujante actividad labrada en terrenos de laderas con pendientes de hasta 45% (Madrigal *et al.*, 2012).

La potencial eliminación de los cítricos por causa del HLB en el cantón de Hojanca no solo representaría un retroceso económico significativo, sino también ambiental, al incrementar el riesgo de dar paso a actividades no solo menos rentables sino más degradativas.

Este escenario amenazaría los avances alcanzados en materia de desarrollo sostenible, exigiendo por parte de las autoridades institucionales y civiles, la promoción de estrategias integrales para alcanzar la convivencia con la enfermedad HLB y el bienestar comunitario.

Objetivos

Objetivo general

Elaborar un protocolo para la producción de plantas certificadas de cítricos, con el fin de combatir el Huanglongbing (HLB) y promover la sostenibilidad ambiental en la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas, en Hojancha, Guanacaste.

Objetivos específicos

1. Diseñar conceptualmente un sistema integrado para la producción de plantas certificadas de cítricos, a fin de fortalecer la citricultura en la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas, en Hojancha, Guanacaste.
2. Realizar un diagnóstico y caracterización biofísica de la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas, en Hojancha, Guanacaste, para evaluar el potencial impacto ambiental derivado del cambio de uso de suelo ante la eventual erradicación de cultivos de cítricos.

CAPITULO 1. DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA PRODUCCIÓN DE PLANTAS CERTIFICADAS DE CÍTRICOS

Antecedentes

La década de 1950 marcó un hito con el establecimiento del primer programa para la producción de plantas de cítricos libres de enfermedades transmisibles por injerto (ETI) en la Universidad de Riverside, California. Esta iniciativa pionera (Vidalakis *et al.*, 2010a; Lee y Garnsey, 1996; Passos *et al.*, 2000) se convirtió en el referente para los sistemas modernos de producción de material vegetal sano de cítricos y otros frutales, indispensables hoy día ante los riesgos que plantea el comercio internacional de material vegetal propagativo para las economías agrícolas de los países.

A lo largo de su historia, la citricultura ha enfrentado graves amenazas fitosanitarias, siendo particularmente devastadora la pandemia causada por el virus de la tristeza de los cítricos (VTC) en la segunda mitad del siglo XX (Moreno *et al.*, 2008; Mukhopadhyay, 2004) y más recientemente el Huanglongbing (HLB), considerado como el mayor desafío para la citricultura a escala global (Thakuria *et al.*, 2023).

Según el marco conceptual de Bassanezi (2020), la estrategia efectiva contra el HLB se sustenta en tres pilares fundamentales:

1. El uso exclusivo de plantas certificadas libres de ETI.
2. La erradicación sistemática de ejemplares infectados.
3. El control integral del vector *Diaphorina citri*.

La implementación del primer pilar exige que las regiones productoras de cítricos cuenten con sistemas especializados que garanticen la cuarentena, conservación, protección y multiplicación certificada de tejido vegetal (Vidalakis *et al.*, 2010; Vidalakis *et al.*, 2010a).

Costa Rica carece de un sistema como el supra citado, que representa una severa limitación para la producción nacional. Esta deficiencia se manifiesta en la incapacidad del país para suministrar material propagativo de cítricos con certificación fitosanitaria,

contraviniendo los principios de producción internacionalmente reconocidos para tal efecto (Vapnek, 2009).

Dicha condición afecta la eficacia del Programa Nacional de Material Vegetal Propagativo (PNMV) del Servicio Fitosanitario del Estado para cumplir el objetivo de su creación, al carecer de un sistema robusto de trazabilidad. Es técnica y legalmente imposible para el PNMV garantizar la sanidad vegetal de los viveros registrados ante su dependencia.

Asociatividad como estrategia para el desarrollo de liderazgos regionales contra la amenaza del HLB

Este trabajo de graduación se articula con una iniciativa estratégica impulsada por productores cítricos de la península de Nicoya, quienes desde 2017 han consolidado la asociatividad como mecanismo de coordinación frente a la amenaza del Huanglongbing (HLB). La inexistencia de un sistema de producción de plantas sanas de cítricos, da fe de un atraso no menor a 15 años para la citricultura nacional, considerando que la enfermedad se oficializó como presente en el país desde 2011 (SFE, 2024). Esta situación deja al sector en una posición de vulnerabilidad crítica.

En este contexto, los productores han asumido un rol de liderazgo en la defensa de sus intereses económicos y sociales, con especial énfasis en la consecución de recursos para la implementación del Sistema de Producción de Plantas Sanas de Cítricos (SPS). La Cámara Nacional de Cítricos (Canacítricos) ha ejercido un papel determinante en este proceso, mediante:

- La incidencia política e institucional para el fortalecimiento productivo.
- El desarrollo de capacidades técnicas sectoriales.
- La promoción de marcos normativos que garanticen la sostenibilidad de la actividad citrícola.

El presente capítulo tiene como objetivo la elaboración de una propuesta de diseño para el desarrollo de un sistema de producción de material propagativo de cítricos libre de

enfermedades, que esté adaptado a las condiciones específicas de la citricultura costarricense. Este documento constituirá un referente técnico-conceptual para:

1. Orientar la formulación de proyectos por parte de Canacítricos, MAG e INDER.
2. Subsanan la actual carencia de lineamientos técnicos nacionales.
3. Establecer las bases para un modelo sostenible de producción de material sano de cítricos.

La propuesta pretende servir de fundamento técnico para la ejecución de un proyecto SPS público-privado, contribuyendo a la protección y competitividad de la citricultura nacional frente a la amenaza del HLB.

Crterios para la selección de una potencial sede para la ubicación del SPS

Requisitos técnicos fundamentales.

Para la implementación óptima de un SPS, los terrenos candidatos deben cumplir con los siguientes parámetros esenciales:

- Dimensión mínima de una hectárea.
- Topografía predominantemente plana (pendientes <5%).
- Condiciones climáticas con vientos máximos <100 km/h.
- Accesibilidad a la red vial primaria nacional.
- Infraestructura básica de servicios públicos (energía, agua, telecomunicaciones).
- Condiciones de seguridad perimetral adecuadas.
- Cercanía a laboratorios de biotecnología.

Consideraciones económicas y operativas.

La naturaleza intensiva en capital de los componentes técnicos (laboratorios de cultivo in vitro, bancos de germoplasma e infraestructura de fundación) hace económicamente inviable su desarrollo sin esquemas de cooperación público-privada. Esta sinergia

permite, optimizar la inversión inicial, compartir riesgos operativos y garantizar sostenibilidad financiera a largo plazo.

Sitios potenciales por región para el presente estudio.

Región Huetar Norte.

Finca La Vega propiedad del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) presenta características ideales debido a infraestructura institucional existente, posicionamiento estratégico en la región citrícola, capacidad de integración con proyectos de investigación.

Región de Guanacaste.

1. Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez (INTA) por su acceso a redes de transferencia tecnológica, capacidad de escalamiento y oportunidad de realizar validación agronómica en condiciones de trópico seco.
2. Finca Experimental de la UCR en Santa Cruz permitiría sinergias con programas académicos, proximidad a zonas productoras estratégicas, así como por su historial en desarrollo de protocolos agrícolas.

Evaluación comparativa entre sitios potenciales.

Cada opción presenta ventajas diferenciadas que deben ponderarse considerando:

- Costos de adaptación de infraestructura.
- Proximidad a centros de demanda.
- Potencial de articulación institucional y político.
- Escalabilidad futura del proyecto.

Esta evaluación técnica preliminar proporciona el marco de referencia para la toma de decisiones informada, garantizando que la ubicación seleccionada maximice las probabilidades de éxito técnico y financiero del SPS.

Marco teórico

Origen y taxonomía de los cítricos: una perspectiva botánica y productiva

El género *Citrus*, perteneciente a la familia Rutaceae, tiene su centro de origen primario en el sudeste asiático, específicamente en la región noreste de la India, norte de Birmania y la provincia de Yunnan en China, zonas caracterizadas por un clima subtropical monzónico (Gmitter y Hu, 1990). Desde el punto de vista taxonómico, la clasificación de los cítricos ha sido objeto de amplio debate científico, destacándose principalmente dos sistemas: el propuesto por Tanaka en Japón y el desarrollado por Swingle en Estados Unidos.

Según Ollitrault *et al.* (2020), la compleja taxonomía del género *Citrus* sigue sin resolverse definitivamente, debido principalmente a los extensos procesos de hibridación ancestral que han ocurrido tanto dentro del género como con géneros afines. Esta complejidad genética ha generado continuas revisiones y actualizaciones en su clasificación sistemática.

Desde el punto de vista productivo, los cítricos, que incluyen naranjas, mandarinas, limones, limas y pomelos, entre otros, ocupan el segundo lugar en producción frutícola mundial, solo superados por las musáceas (Statista, 2022). Esta posición en el mercado global refleja su importancia económica y alimentaria, así como su amplia adaptación a diversas condiciones agroclimáticas.

Enfermedades transmisibles por injerto (ETI) en la citricultura

Las enfermedades transmisibles por injerto (ETI) en la producción de cítricos se consideraban tradicionalmente como patologías de etiología viral. No obstante, los avances en técnicas de diagnóstico molecular han permitido identificar un espectro más amplio de agentes patógenos, incluyendo viroides, bacterias y otros microorganismos aún no completamente caracterizados, todos ellos capaces de inducir sintomatologías similares (Lee y Garnsey, 1996).

La infección por ETI convierte a los árboles de cítricos en hospederos sistémicos permanentes, transformándolos en fuentes de inóculo potencial para la diseminación de enfermedades. Estas infecciones comprometen significativamente el rendimiento productivo como la viabilidad a largo plazo de los especímenes afectados (Lee *et al.*, 2021). La propagación vegetativa mediante material obtenido de plantas infectadas constituye una vía de transmisión particularmente eficiente, representando un riesgo fitosanitario crítico para nuevos establecimientos citrícolas.

Esta problemática ha impulsado el desarrollo de protocolos rigurosos de saneamiento y protección de tejidos vegetales. Los programas contemporáneos incorporan técnicas avanzadas de biotecnología y sistemas de certificación estandarizados, orientados a garantizar la producción de material de propagación en ambientes controlados (Vidalakis *et al.*, 2010b; Ross, 2014).

HLB (Huanglongbing), dragón amarillo, o “greening”

Agente causal, epidemiología y manejo

El Huanglongbing (HLB), también conocido como dragón amarillo o “greening”, es una enfermedad causada por tres especies bacterianas del género *Candidatus Liberibacter*:

- *Candidatus Liberibacter asiaticus* (CLAs): de origen asiático, es la especie más agresiva y ampliamente distribuida a nivel global (Wang *et al.*, 2021).
- *Candidatus Liberibacter africanus* (CLaf): restringida al continente africano (Bové, 2006)
- *Candidatus Liberibacter americanus* (CLam): restringido al cinturón cítrico de Brasil (Bové, 2006).

Estos patógenos son transmitidos por dos insectos vectores: *Trioza erytreae* (limitado a África) y *Diaphorina citri* (psílido asiático de los cítricos, PAC), de distribución global y principal responsable de la diseminación en América (Santivañez *et al.*, 2013).

La propagación del HLB se ve favorecida por el uso de material vegetal infectado en procedimientos de propagación asexual, esto convierte a los viveros en focos críticos de dispersión (Gottwald, 2010).

Mecanismos patogénicos y respuesta de la planta

Candidatus Liberibacter asiaticus (CLas) es una bacteria gramnegativa que coloniza exclusivamente el floema de los cítricos (Bové, 2006). Su presencia desencadena una respuesta inmunitaria hiperactiva en la planta, caracterizada por la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS, siglas en inglés) que inducen inflamación y colapso del tejido vascular (Ma *et al.*, 2022). Este daño altera el transporte de nutrientes, reduciendo la capacidad fotosintética, debilita el sistema radical, aumentando la susceptibilidad a estrés biótico y abiótico y provoca decadencia progresiva, especialmente en árboles jóvenes y variedades sensibles como la naranja dulce.

No obstante, estudios recientes (Peña, 2024) sugieren que CLas actúa más como un parásito crónico que como un patógeno letal. Esto hace sugerir que sería factible gestionar la enfermedad por medio del control de factores de estrés a propósito de prolongar la productividad de los árboles infectados.

***Diaphorina citri* (PAC): vector clave y dinámica de transmisión**

El psílido asiático de los cítricos (Liviidae) es un insecto hemíptero de 2–3 mm (García *et al.*, 2016) que completa su ciclo biológico en brotes tiernos de rutáceas. PAC adquiere y transmite la carga bacteriana al alimentarse, tanto como ninfa y/o adulto, de plantas infectadas (EFSA PHL, 2021).

Entre las principales medidas de control del vector se enfatizan el uso de mallas anti-áfidos en viveros, monitoreo constante de poblaciones y aplicaciones de insecticidas selectivos (OIRSA y ICDF, 2015).

Factores antrópicos y riesgo fitosanitario en Costa Rica

Aunque el PAC es el principal vector, la diseminación a larga distancia del HLB está impulsada por el movimiento de material vegetal infectado. En Costa Rica, la falta de controles fitosanitarios rigurosos en viveros ha facilitado:

- La introducción del HLB en zonas libres de la enfermedad.
- Pérdidas económicas severas en a nivel de producción y agroindustria.

Por lo anterior, es imperativo la ejecución de acciones urgentes como sería la emisión de una política moderna en materia de certificación de viveros, con carácter de regulación obligatoria (Vapnek, 2009) así como la promoción de estrategias de manejo integrado de HLB para reducción de costos y aumento de la productividad (manejo del vector, uso de material de siembra certificado, incorporación de fertirriego, uso de drones, paquetes agronómicos validados).

Impacto del HLB en la citricultura continental y su efecto en Costa Rica

El Huanglongbing (HLB), o enverdecimiento (“greening”) de los cítricos, fue detectado por primera vez en el continente americano en el estado de São Paulo, Brasil, en 2004 (Teixeira *et al.*, 2010). Desde entonces, su diseminación ha sido documentada en prácticamente todos los países de la región, incluyendo Costa Rica, donde se reportó en 2011. En Costa Rica el HLB se encuentra bajo vigilancia oficial del Servicio Fitosanitario del Estado (SFE, 2024). De acuerdo con el director del SFE, Ing. Morera (comunicación personal, octubre de 2024), el HLB está ampliamente distribuido y constituye una amenaza crítica para la sostenibilidad de la citricultura en el mediano plazo.

Efectos del HLB en las principales regiones productoras del mundo

Los impactos del HLB a escala global han sido catastróficos. En Florida (EE. UU.), la producción de la temporada 2022-2023 registró su mínimo histórico en un siglo, con apenas 16 millones de cajas (40,8 kg cada una), atribuido al efecto combinado de

huracanes y el HLB (Jones, 2024; USDA, 2024). Esta cifra contrasta drásticamente con los más de 200 millones de cajas cosechadas dos décadas atrás. Paralelamente, en São Paulo (Brasil), la incidencia de la enfermedad aumentó un 56% en 2023, alcanzando una tasa general de infección del 38,06% de los árboles productivos, equivalente a 77 millones de unidades (Fundecitrus, 2024).

Situación en Costa Rica: pérdidas económicas y riesgo social

En Costa Rica, las regiones de La Cruz, Upala y Los Chiles han sido las más afectadas. Solo en La Cruz, la empresa Del Oro eliminó 1.500 hectáreas de cultivos por causa de la enfermedad (Ing. Rodríguez, comunicación personal, enero de 2024). Aunque no existen datos oficiales precisos, se estima que el país existe entre 16.000 y 18.000 hectáreas dedicadas al cultivo de cítricos (principalmente naranja, limón y mandarina), y entre 1.100 y 1.500 pequeños productores.

La estructura productiva nacional está altamente concentrada: cerca del 70% de la superficie corresponde a dos grandes agroindustrias (Del Oro, con cerca de 3.000 ha, y Tico Frut, con alrededor de 10.000 ha.), mientras que el restante está en propiedad de pequeños y medianos citricultores, la implementación de estrategias integrales de control de la enfermedad se vuelve urgente para preservar los empleos e ingresos en las zonas productoras.

Normativa fitosanitaria relacionada con el HLB

El marco legal costarricense para la producción y comercialización de plantas de cítricos se fundamenta en la Ley 7664 y su cuerpo reglamentario, que incluye:

- El Reglamento de la Ley 7664 (Decreto Ejecutivo 26921-MAG).
- El Reglamento de viveros, almácigos, semilleros y bancos de yemas (Decreto 33927-MAG y su reforma 42167-MAG).
- El Reglamento para el combate del Huanglongbing y su vector *Diaphorina citri* (Decreto 41593-MAG).

- Reglamento para la certificación fitosanitaria de material propagativo de cítricos (Decreto 38891-MAG).

Un análisis comparativo del Decreto 38891-MAG (2015) sobre certificación fitosanitaria de cítricos contra estándares internacionales (Kesinger, 2013; OIRSA y ICDF, 2015; UCR, 2007) revela importantes deficiencias en el sistema nacional, entre las que destacan:

- Requisitos técnicos insuficientes y desactualizados.
- Ausencia de infraestructura crítica (bancos de germoplasma, instalaciones fundacionales).
- Falta de sistemas de trazabilidad y registros nacionales.
- Carencia de protocolos estandarizados para limpieza de tejidos y diagnóstico de plagas.

Esta situación regulatoria genera tres consecuencias principales para el sector cítrico nacional:

- Aumento del riesgo económico para los productores.
- Dificultades en el manejo integrado de plagas y enfermedades.
- Restricciones para la exportación a mercados internacionales.

El Huanglongbing (HLB) está clasificado en Costa Rica como enfermedad no cuarentenaria bajo control oficial en cumplimiento de la Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias (NIMF) No. 16. (CIPF, 2002). Costa Rica, como miembro de la Organización Mundial del Comercio (OMC) y signataria del Acuerdo de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias (MSF), debe armonizar su marco regulatorio en materia fitosanitaria en respecto a los estándares internacionales establecidos por la Convención Internacional para Protección Fitosanitaria (CIPF), organismo rector en materia de protección vegetal de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por siglas en inglés).

Según Vapnek (2009) para la FAO, los sistemas de certificación de material propagativo de cítricos demuestran una alta eficacia en el control de patógenos, pero requieren implementación obligatoria para ser efectivos. La actual normativa costarricense permite el uso de yemas de árboles con resultados negativos para HLB en un plazo de 30 días desde su emisión, medida que presenta severas falencias ya que no garantiza la ausencia de otros patógenos. El riesgo de falsos negativos por errores de muestreo y de procedimiento es inusualmente alto. Actualmente se carece de controles integrales de calidad, validación o seguimiento de las plantas de viveros.

Sistemas de producción de material propagativo certificado en citricultura

Los sistemas de producción de material propagativo certificado en citricultura, conocidos como protocolos de protección vegetal (en el caso del presente proyecto denominado Sistema de Producción de Planta Sana de Cítricos), presentan variaciones según las condiciones socioeconómicas y técnicas de cada país o región, pero se rigen por principios operativos básicos relacionados a estándares técnicos internacionales (Alferez, 2024; Vidalakis *et al.*, 2010; Navarro, 1992; OIRSA, 2019).

Componentes fundamentales de los protocolos de protección vegetal:

Fase de cuarentena inicial

El material vegetal promisorio, tanto de introducción externa como de selección local, ingresa a un período de aislamiento controlado. Durante esta fase se implementan protocolos rigurosos de diagnóstico fitosanitario mediante técnicas estandarizadas de indexación biológica y molecular.

Procesos de diagnóstico y saneamiento

Se aplican metodologías validadas internacionalmente, incluyendo:

- Técnicas de biología molecular para detección de patógenos.

- Sistemas de indexación mediante injerto en indicadores biológicos.
- Protocolos de limpieza vegetal que combinan termoterapia y microinjerto apical.

Establecimiento de material certificado

El material vegetal certificado como sano se destina a:

- Bancos de Germoplasma para conservación genética.
- Bloques Fundacionales para multiplicación primaria de las variedades de mayor interés.
- Ingreso acelerado (“bypass”) a Unidades de Multiplicación para situaciones de emergencia fitosanitaria que requiera una reducción de los tiempos de producción.

Infraestructura especializada requerida

Los programas exitosos requieren la implementación de:

- Unidades de germoplasma con condiciones controladas.
- Áreas fundacionales con niveles progresivos de bioseguridad.
- Módulos de multiplicación masiva con capacidad escalable.
- Instalaciones complementarias para manejo de material sexual y asexual.

Sistema de certificación y trazabilidad

El modelo incluye mecanismos estrictos para garantizar:

- Monitoreo fitosanitario periódico mediante muestreo estadístico.
- Registro detallado de parámetros agronómicos y sanitarios.
- Documentación completa de la cadena de custodia.
- Emisión de certificados con validez oficial.

Impacto sectorial

La implementación de estos sistemas permite:

- Reducción de pérdidas por enfermedades sistémicas.
- Incremento en la productividad y calidad frutícola.
- Acceso a mercados con exigentes requisitos fitosanitarios.
- Sostenibilidad a largo plazo de los sistemas citrícolas.

Estos protocolos representan la base técnica para el desarrollo de sistemas nacionales de certificación que cumplan con los estándares de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria y las exigencias de los acuerdos comerciales internacionales.

Certificación de plantas de cítricos

El concepto de certificación fitosanitaria engloba el conjunto de regulaciones técnicas y legales destinadas a garantizar la sanidad, calidad genética y autenticidad varietal del material vegetal destinado a producción (Gómez, 2006; Zamora-Rodríguez *et al.*, 2016). En Costa Rica, el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE) ostenta la competencia legal para certificar la condición fitosanitaria de las plantas, conforme a lo establecido en la Ley 7664. Los sistemas de certificación, según Zamora-Rodríguez *et al.* (2016), se estructuran típicamente en tres fases secuenciales: (1) fase agronómica, identificación y selección de material genético promisorio; (2) fase de cuarentena, aislamiento y saneamiento del material seleccionado; y (3) fase de certificación, que asegura la calidad fitosanitaria de los propágulos distribuidos a viveros y, consecuentemente, de las plantas destinadas a campo.

Antecedentes internacionales y situación nacional

El desarrollo de los sistemas modernos de certificación tiene su origen en el programa establecido en la década de 1950 por la Universidad de California en Riverside. Este

modelo sentó las bases técnicas y científicas para los sistemas de producción de viveros de cítricos a nivel global (Vidalakis *et al.*, 2010b; Lee *et al.*, 2021; Passos *et al.*, 2000).

En contraste con estos estándares internacionales, Costa Rica carece de un sistema nacional que permita certificar plantas cítricas conforme a parámetros internacionalmente reconocidos. Si bien el país cuenta con el Decreto 38891-MAG (2015), "Reglamento para la certificación fitosanitaria de material propagativo de cítricos", su implementación enfrenta limitaciones sustantivas.

La ausencia de bancos de germoplasma con genotipos trazables y la imposibilidad real de poder cumplir con ciertas regulaciones como la identificación precisa de propágulos (inciso h, De-38891) revelan la necesidad de un sistema verdaderamente articulado en conjunto con una modernización del marco normativo vigente.

Competencias institucionales y desafíos regulatorios

El Decreto 38891-MAG designa al SFE como ente rector en materia de sanidad vegetal. No obstante, se han generado interpretaciones contradictorias respecto a las competencias entre el SFE y la Oficina Nacional de Semillas (ONS). Cabe destacar que las "Normas Técnicas para la Certificación de Semillas, Yemas y Plantas de vivero de Cítricos" de la ONS (2018) reconoce expresamente la competencia del SFE en aspectos fitosanitarios, en lineamiento con el marco legal establecido. La ONS centra su actuación en la trazabilidad genética del material.

La realidad para todo lote de plantas de cítricos producido en viveros bajo vigilancia y control oficial por parte del SFE en Costa Rica, hace improcedente la denominación "planta certificada", siendo el termino más apropiado el de "plantas de viveros registrados", dado que, con los recursos técnicos y legales disponibles, no es posible garantizar la inocuidad del material vegetal. La implementación de un sistema de certificación efectivo requeriría, como mínimo, la aplicación de protocolos de tamizaje periódico al 100% de las plantas donadoras, conforme a los estándares establecidos por organismos internacionales como el OIRSA (2019). Esta medida constituiría un primer

paso fundamental hacia la adecuación del sistema nacional a los parámetros internacionales de calidad y sanidad vegetal.

Sistemas internacionales de certificación de material propagativo de cítricos: modelos y aplicaciones

Estados Unidos: “National Clean Plant Network for Citrus” (NCPN-Citrus, 2024)

Estados Unidos alberga el programa de protección de material propagativo de cítricos más antiguo y consolidado en el mundo. El NCPN constituye un sistema descentralizado que opera a través de centros especializados en diferentes estados:

- California: “California Citrus Clonal Protection Program” (CCPP) y el “National Clonal Germplasm Repository for Citrus y Dates”. En California se ubica la oficina central del NCPN-Citrus.
- Florida: “Citrus Budwood Program”.
- Arizona, Texas, Luisiana, Alabama, Hawái, Puerto Rico y Maryland: programas universitarios y gubernamentales especializados.

Este modelo federal garantiza la producción de material vegetal certificado adaptado a las condiciones agroecológicas específicas de cada región cítrica del país.

Brasil: excelencia en investigación y desarrollo

Como principal productor mundial de naranja para industria, Brasil ha establecido centros de referencia internacional en citricultura:

- Fundecitrus: organización privada sin fines de lucro líder en investigación aplicada.
- Estación Experimental Centro de Citricultura Sylvio Moreira: referente tecnológico ubicado en “São Paulo”.
- EMBRAPA: Corporación Brasileña de Investigación Agrícola, que articula los esfuerzos nacionales.

Esta sinergia institucional ha permitido desarrollar un sistema robusto de producción de material vegetal certificado, factor clave para la competitividad del sector (Carvalho *et al.*, 2019).

Europa: el modelo del IVIA en España

El Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) implementa desde 1979 uno de los programas de certificación más efectivos en Europa. Su sistema ha logrado controlar eficientemente las Enfermedades de Transmisión por Injerto (ETI), convirtiéndose en referente para la citricultura mediterránea (Pina *et al.*, 2015).

Centroamérica: la iniciativa del OIRSA

El Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA) coordina un programa regional para la producción de plantas libres de enfermedades en Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Panamá. A pesar de limitaciones tecnológicas y financieras, este sistema:

- Ha superado desafíos técnicos significativos.
- Provee material certificado, a diferencia de Costa Rica.
- Adapta exitosamente el modelo taiwanés de control de HLB a condiciones centroamericanas (OIRSA, 2017, 2019; OIRSA y ICDF, 2015).

El Caribe: experiencia cubana

Cuba ha desarrollado su Sistema de Producción de Material de Propagación Certificado de Cítricos (SPMPCC), demostrando la viabilidad de implementar programas de certificación efectivos en contextos de recursos limitados (Zamora-Rodríguez *et al.*, 2016).

Análisis comparativo

Estos modelos internacionales comparten características clave:

- Articulación interinstitucional.
- Adaptación a condiciones locales.
- Enfoque preventivo contra patógenos.
- Sistemas de trazabilidad robustos.

Su éxito contrasta con la situación costarricense, donde persisten desafíos significativos en la certificación de material propagativo, particularmente en lo referente a infraestructura tecnológica y coordinación institucional.

Condición socioeconómica del cantón citricultor de Hojancha

Según datos recopilados por organizaciones productivas locales, Hojancha cuenta con un área citrícola de 350 hectáreas, distribuida entre 102 productores (Agencia Extensión Agropecuaria Hojancha, 2024). Los ingresos generados por la zafra oscilan entre ₡400 y ₡1500 millones por temporada en la península de Nicoya (Salazar y Vásquez, 2024), constituyendo un motor clave para la economía local, especialmente en distritos con bajo desarrollo social (MIDEPLAN, 2023; ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Distritos productores de cítricos de la Península de Nicoya, clasificación por quintil de desarrollo y su posición a nivel nacional.

Cantón	Distrito	Quintil	Posición nacional
Nicoya	Nicoya	III	273
Nicoya	Belén Nosarita	I	429
Nandayure	Zapotal	I	439
Nandayure	Porvenir	II	354
Nandayure	Bejuco	II	385
Hojancha	Monte Romo	II	374
Hojancha	Puerto Carrillo	II	382
Hojancha	Huacas	II	319
Puntarenas	Lepanto	II	366
Puntarenas	Paquera	II	362

Un análisis del Índice de Desarrollo Social (IDS) (MIDEPLAN, 2023) revela que la actividad citrícola en la península se concentra predominantemente en distritos de los quintiles I y II, lo que demuestra su alta dependencia socioeconómica de este sector. En particular, Nandayure y Hojancha, que aportan el 76% de la producción regional, son los más expuestos a impactos derivados de una reducción en el área cultivada. Esta vulnerabilidad se corrobora al examinar los componentes del Índice de Desarrollo Humano cantonal (IDHc), (ver Cuadro 2), donde destacan limitaciones en bienestar material, y conocimiento o educación.

Cuadro 2. Comparativo del Índice de Desarrollo Humano (IDH) cantonal y sus componentes para cantones de la Península de Nicoya.

Cantón	IDH	<i>IDH-D</i>	IBM	<i>IBM-D</i>	IEV	<i>IEV-D</i>	IC	<i>IC-D</i>
Puntarenas	55	65	66	65	68	64	53	52
Nicoya	46	47	56	43	65	55	56	54
Santa Cruz	56	60	57	35	57	45	78	73
Hojancha	62	80	65	81	43	32	73	80
Nandayure	71	77	63	80	5	7	71	79

Nota: Índice de Bienestar Material (IBM), Índice de Esperanza de Vida (IEV), Índice de Conocimiento (IC) y sus versiones ajustadas por desigualdad (-D). Fuente IDHc, 2019.

Estos hallazgos resaltan la doble función de la citricultura en la región: como sustento económico y como factor de cohesión social. Por ello, se recomienda diseñar políticas públicas que fortalezcan la resiliencia del sector, mitigando riesgos asociados a fluctuaciones en la producción.

Marco metodológico

Enfoque y tipo de investigación

Contexto y justificación metodológica.

La ausencia de un programa nacional de certificación de material propagativo de cítricos en Costa Rica, contrario a lo que puede extraerse de cultivos con industrias consolidadas como el café y banano, ha generado una notable carencia de datos oficiales. Esta situación ha llevado a adoptar un enfoque metodológico cualitativo integrado, diseñado específicamente para:

- Recopilar información actualmente fragmentada y dispersa.
- Sistematizar conocimientos no documentados formalmente.
- Analizar los obstáculos históricos para implementar un sistema de certificación.

Diseño metodológico tripartito.

Abordaje integral del objeto de estudio a través de la ejecución de tres modelos a continuación descritos.

Estudio comparativo de casos

El estudio comparativo de casos (ver Figura 1), basado en el modelo conceptual de Gomes (2008), permite:

- Analizar experiencias internacionales exitosas en certificación citrícola.
- Identificar factores críticos de éxito transferibles al contexto costarricense.
- Establecer parámetros comparativos para evaluar la viabilidad de desarrollar un proyecto de protección de material propagativo de cítricos a nivel local.

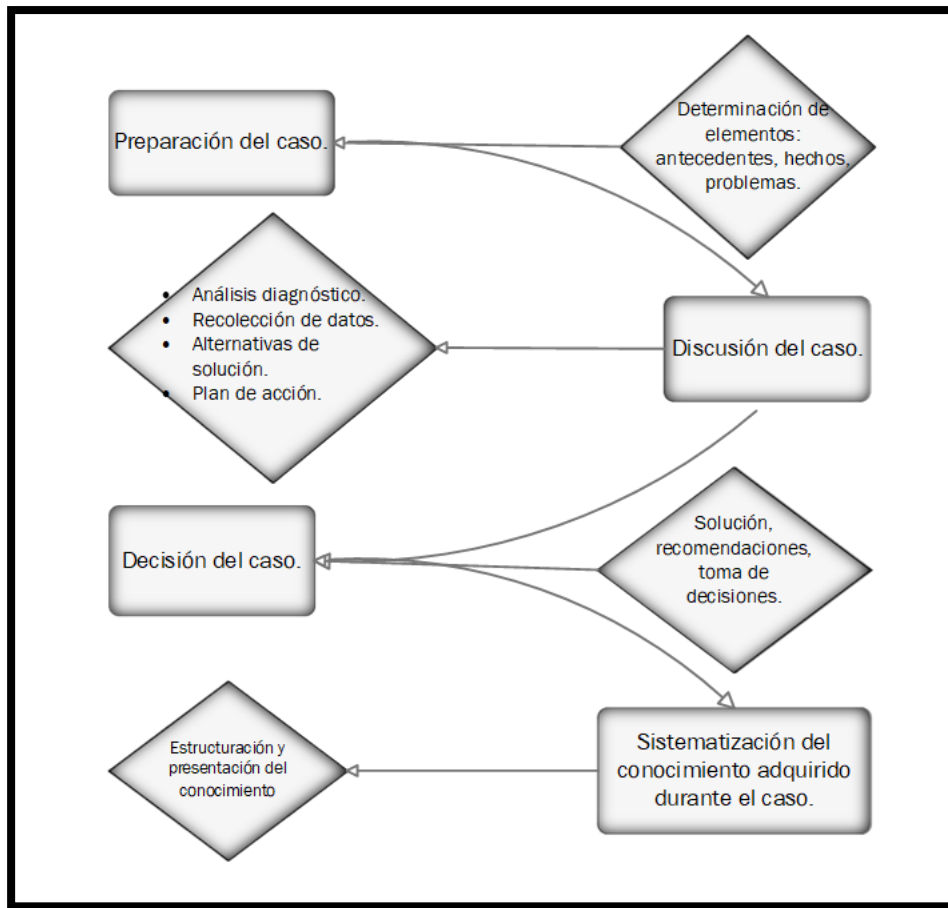


Figura 1. Modelo de estudio de casos adaptado de Estrada y Alfaro (2015).

Investigación-acción participativa

La investigación-acción participativa (ver Figura 2) en cumplimiento del modelo cíclico propuesto por Latorre (2004), facilita:

- El desarrollo conceptual de diseños y prototipos de certificación de cítricos.
- Validación de conocimiento empírico mediante consulta a actores clave.
- Retroalimentación continua para mejora del modelo de investigación durante su ejecución.

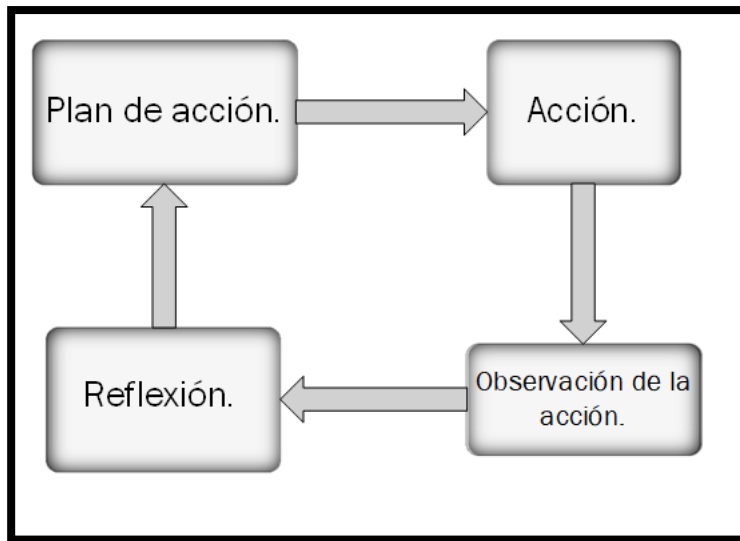


Figura 2. Ciclo de investigación-acción según Latorre (2004).

Análisis documental sistemático

Siguiendo la propuesta de análisis documental sistemático (ver Figura 3) de Vega y Martí (2005), el proceso metodológico incluye:

- Revisión crítica de literatura científica y técnica.
- Evaluación de normativas internacionales.

- Identificación de mejores prácticas de producción certificada de cítricos adaptables a nuestro contexto.

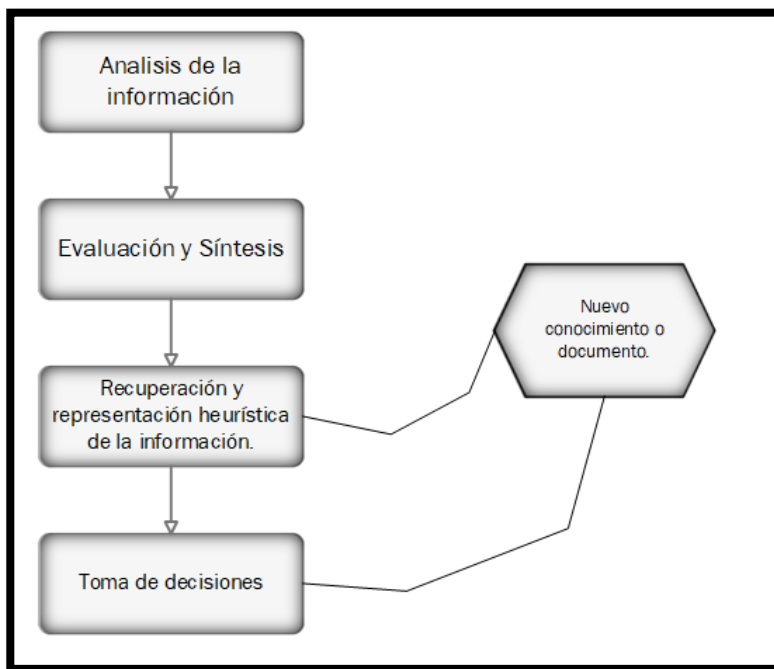


Figura 3. Modelo de análisis documental adaptado de Vega y Martí (2005).

Integración de perspectivas multi-actor.

El estudio enfrenta el reto particular de conciliar intereses diversos entre:

- Instituciones académicas y de investigación.
- Entidades gubernamentales.
- Sector productivo privado.
- Agricultores y viveristas.

Para ello, la metodología incorpora mecanismos de mediación técnica, procesos de validación participativa y triangulación constante de información.

Potencial transformador.

Esta aproximación metodológica mixta ofrece ventajas clave:

- Rigor científico: Combina análisis teórico y empírico.
- Aplicabilidad práctica: Genera soluciones contextualizadas.
- Sostenibilidad: Fomenta apropiación por actores locales.

Proyección y adaptabilidad

El diseño metodológico propuesto:

- Permite ajustes dinámicos según hallazgos intermedios.
- Facilita la incorporación de nuevos actores.
- Genera insumos para política pública.
- Establece bases para futuros estudios cuantitativos.

Este enfoque integral (ver Figura 4) no solo busca comprender la situación actual, sino que pretende transformar la realidad de la producción citrícola nacional mediante la creación de un sistema de certificación viable, técnicamente sólido y socialmente aceptado.

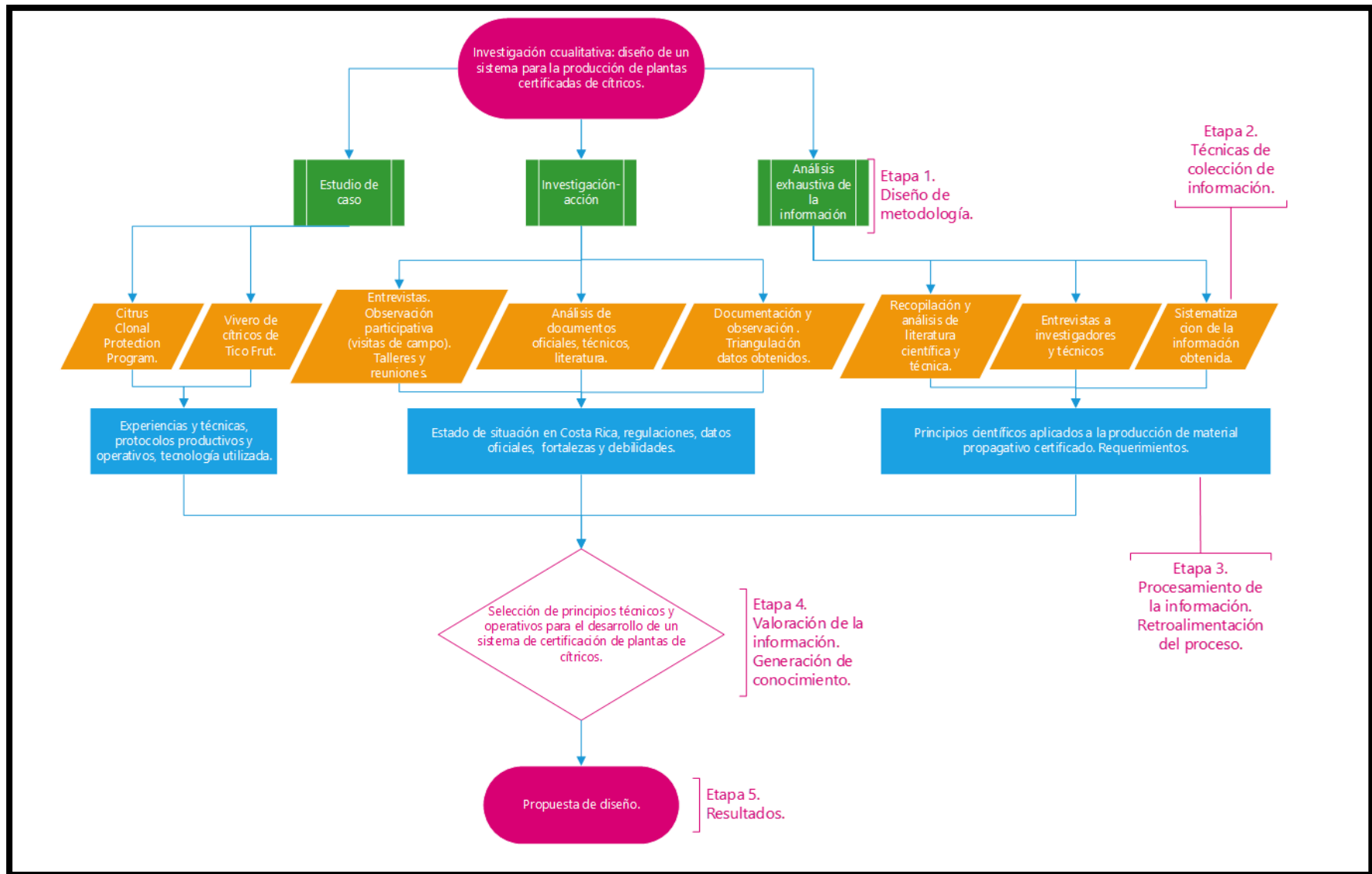


Figura 4. Proceso metodológico de la investigación del presente estudio.

Marco espacial y temporal

El estudio toma como modelo las instalaciones y terrenos del ITCR en Santa Clara, San Carlos, donde se propone el establecimiento de un sistema de producción de plantas sanas de cítricos. Este sistema busca brindar sostenibilidad a zonas productoras de cítricos como aquellas definidas por las delimitaciones de la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas, ubicadas en el cantón de Hojancha, Guanacaste, Costa Rica (Figura 5). Ambas cuencas hidrográficas vierten sus aguas al océano Pacífico, lo que subraya su importancia ecológica y productiva para la región.

A continuación, se detallan las extensiones de las cuencas en sistemas de coordenadas:

Cuenca alta del río Nosara (CarNs)

CRTM05 (EPSG: 5367):

- Latitud: 338373.7927 m a 1106089.6212 m.
- Longitud: 348412.4761 m a 1114588.3193 m.

Subcuenca del río Lajas (SrLj)

CRTM05 (EPSG: 5367):

- Latitud: 338323.7867 m a 348412.4760 m.
- Longitud: 1095448.5631 m a 1114588.31930 m.

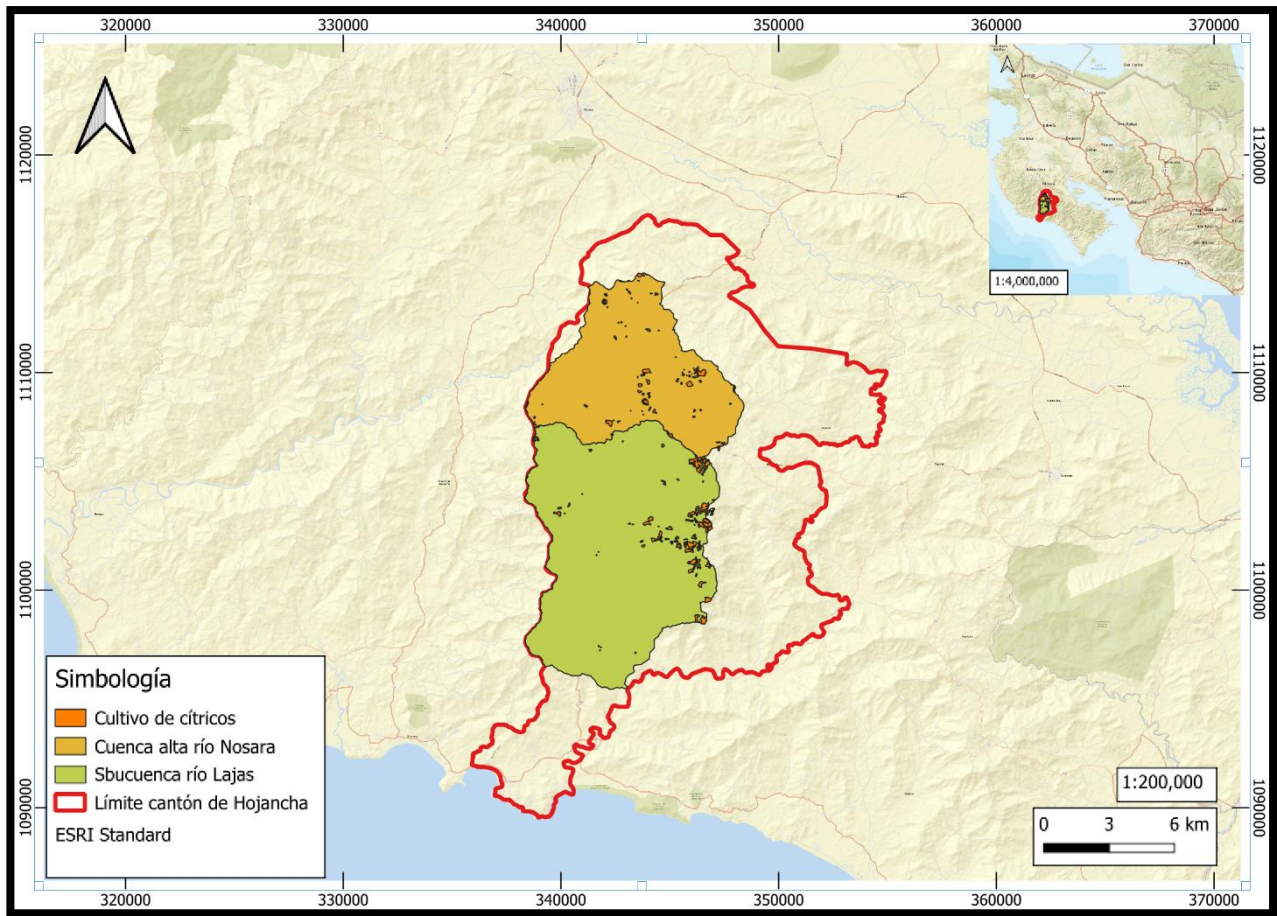


Figura 5. Delimitación del área de estudio. Elaboración propia.

Finca La Vega (10°04'N, 84°45'O) ha sido el sitio seleccionado para el potencial establecimiento del Sistema de Producción de Plantas Sanas de cítricos (SPS), propiedad de la Escuela de Agronomía del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Local San Carlos (ver Figura 6). La ubicación se seleccionó mediante un proceso de evaluación que consideró su representatividad agroclimática para la citricultura, la infraestructura disponible, las condiciones de bioseguridad y la accesibilidad logística.

La finca se encuentra ubicada a 75 metros sobre el nivel del mar (msnm) y presenta características climáticas típicas del trópico húmedo. La temperatura media anual es de 26°C, con un rango entre 20 y 32.5°C, y una humedad relativa que oscila entre 76% y 88%. La precipitación anual alcanza los 3500 mm, con una estación lluviosa que se

extiende de mayo a enero y una estación seca entre febrero y abril. El balance hídrico muestra una evapotranspiración potencial de 1150 mm por año y una evapotranspiración real de 950 mm anuales, resultando en un excedente hídrico de 2550 mm.

Esta ubicación ofrece múltiples ventajas para la producción de material vegetal sano. Con una extensión superior a las 350 hectáreas, la finca permite un adecuado aislamiento fitosanitario, la escalabilidad del sistema y el desarrollo de proyectos de investigación y validación en campo. Su topografía predominantemente plana facilita el manejo mecanizado, el diseño eficiente de infraestructura y el control de escorrentías. Además, las condiciones ambientales estables, con ausencia de vientos fuertes y parámetros climáticos dentro del rango óptimo para cítricos, garantizan un desarrollo vegetativo adecuado.

El estudio se desarrolló entre junio y diciembre de 2024 (ver Anexo 1). La selección consideró como un recurso significativo el acceso a la infraestructura de investigación del ITCR.

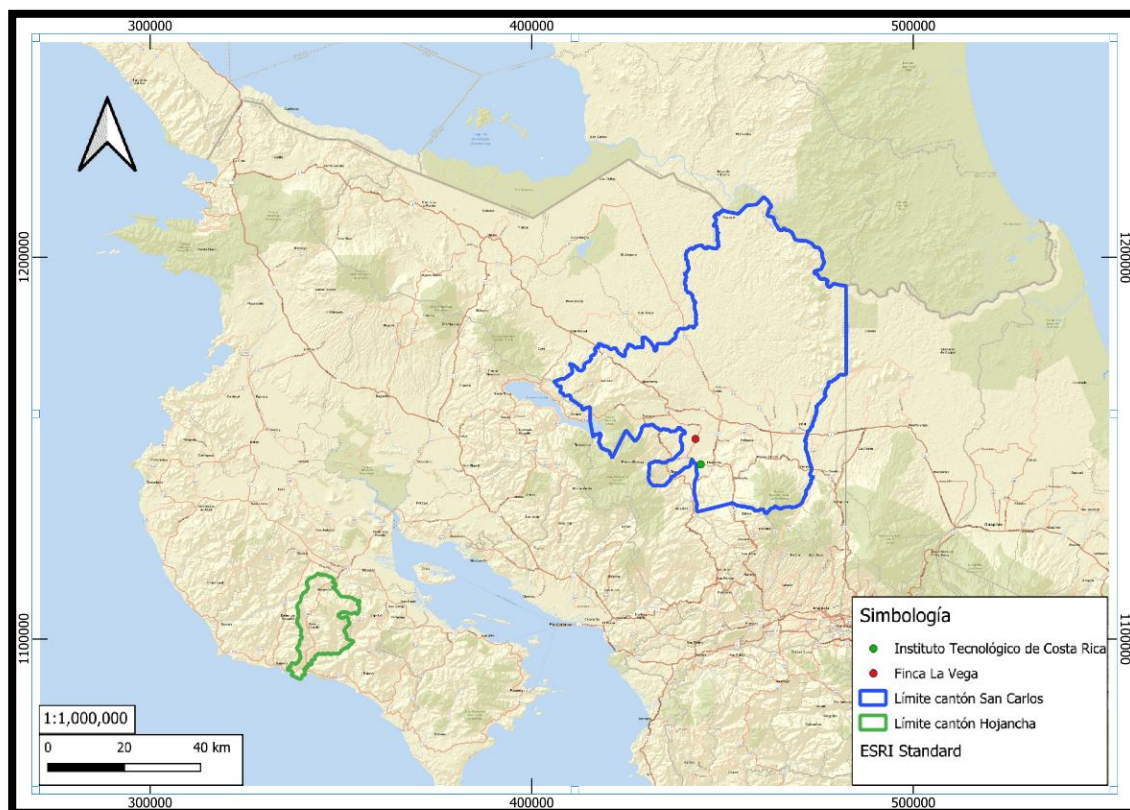


Figura 6. Mapa de ubicación ITCR y Finca La Vega, San Carlos. Elaboración propia.

Metodología para la sistematización de los objetivos

El proceso de investigación se desarrolló mediante un enfoque integral que combinó diversas estrategias metodológicas para garantizar la recopilación exhaustiva de información relevante. Se implementó un protocolo sistemático que incluyó:

- 1. Consultas a expertos:** se realizaron entrevistas estructuradas con especialistas en citricultura de instituciones clave, entre ellas:
 - Organismos gubernamentales (SFE, MAG, ONSI, INTA, OIRSA).

- Centros académicos (Universidad de Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica).
- Laboratorios especializados en sustratos, biología celular, biotecnología y agricultura sostenible.
- Representantes del sector productivo (Agrisoluciones, Covertech, Naandanjain, Netafim, Tico Frut, Del Oro).

2. Revisión documental: Se ejecutó una búsqueda sistemática en:

- Bases de datos académicas (Wiley, Springer, Taylor y Francis, ScienceDirect).
- Plataformas de investigación (Google Académico).
- Documentación oficial del sector cítrico.

3. Trabajo de campo: Se llevaron a cabo visitas técnicas a diversas instalaciones productivas y de investigación:

- Infraestructuras del ITCR (Escuela de Ingeniería Agrícola, Santa Clara).
- Viveros comerciales (El Punto, La Garita, Centro Agrícola Cantonal de Atenas).
- Centros experimentales (Estación Experimental Fabio Baudrit, INTA Guanacaste).
- Empresas productoras (Inversiones AGMOL, Cartago).

4. Participación en eventos internacionales:

- Visita a la colección de variedades de cítricos Givaudan (Riverside, California).
- Asistencia al VII Congreso Internacional de HLB (California, marzo 2024).
- Participación en la Semana de la Citricultura (Sao Paulo, junio 2024).

5. Análisis técnico:

- Entrevistas con investigadores y consultores especializados.
- Evaluación de equipos y materiales.
- Caracterización y requerimientos técnicos.

Como resultado de este proceso metodológico, se estableció un conjunto de procedimientos técnicos para el diseño de un sistema de producción de plantas certificadas de cítricos en Costa Rica. Los detalles específicos de estas metodologías, así como las variables y actividades asociadas se presentan en los Cuadros 3 y 4 respectivamente, que corresponde al marco operativo desarrollado para la consecución de los objetivos planteados en la investigación.

Cuadro 3. Metodologías técnicas utilizadas para el diseño de un sistema para la producción de plantas certificadas de cítricos.

Metodología	Preguntas de investigación	Instrumentos de trabajo	Actividades	Fuentes clave
Investigación-acción participativa	¿Existe en Costa Rica un sistema de producción certificada de material propagativo de cítricos? ¿Qué debe realizar Costa Rica para poseer un sistema de producción certificada de cítricos?	Entrevistas semiestructuradas (con guía de preguntas flexible y transcripción de ideas principales). Observación participante. Análisis documental (procesamiento con inteligencia artificial Gemini Advance). Aplicaciones de fotografía (Iphone 13 pro, almacenamiento, georreferenciación).	Realizar entrevistas a una muestra representativa de actores clave (viveristas, citricultores, técnicos, funcionarios, investigadores) utilizando una selección dirigida por grado de experiencia profesional y empírica. Participar en talleres y reuniones con los actores involucrados. Realizar giras de campo a sitios de producción en invernadero del sector privado, académico e institucional. Analizar documentos oficiales, informes técnicos y literatura científica. Documentar las observaciones de campo mediante fotografías y notas de campo. Triangular los datos obtenidos de las diferentes fuentes.	Funcionarios y técnicos de instituciones públicas y privadas relacionadas a la citricultura (SFE, MAG, ONS, INTA, OIRSA, UCR, ITCR). Productores de cítricos. Expertos en ambientes protegidos, sustratos, fitosanidad y biotecnología. Empresas especializadas en construcción de invernaderos y textiles agrícolas. Empresas dedicadas a la producción en invernadero (viveristas y similares).
Estudio de caso (Citrus Clonal Protection Program de California, programa pionero a nivel mundial y referente en la materia. Producción de plantas de TICO FRUT como líder del sector en Costa Rica).	¿Qué requiere un programa o protocolo para la protección de material propagativo de cítricos?	Análisis documental (especificando el tipo de documentos). Consultas a expertos (producción ambiente protegido, sustratos, biotecnología, fitosanidad). Visitas de campo (con registro fotográfico).	Seleccionar un caso de estudio relevante (CCPP y Tico Frut) Analizar documentos relacionados con el caso de estudio (legislación, informes, publicaciones). Realizar consultas a expertos en certificación de material propagativo. Visitar el lugar del caso de estudio y documentar las observaciones.	Organismos internacionales (FAO, OIRSA) Programas de certificación de cítricos iextranjeros (CCPP en California, CBP en Florida, USDA-ARS National Clonal Germplasm Repository for Citrus & Dates,). Expertos en protección de material vegetal de cítricos y citricultura en general (Instituto Valenciano Investigaciones Agrarias, Fundecitrus, Centro de la Citricultura Sylvio Morera).
Análisis documental exhaustivo (especificando el alcance)	¿Cómo se puede producir material propagativo de cítricos certificado?	Entrevistas semiestructuradas (con guía de preguntas flexible y transcripción de ideas principales). Análisis documental (procesamiento con inteligencia artificial Gemini Advance).	Recopilar y analizar exhaustivamente la literatura científica y técnica sobre producción de material propagativo de cítricos. Realizar entrevistas a investigadores y técnicos con experiencia en la temática. Sistematizar la información obtenida y elaborar un informe técnico.	Bases de datos de literatura científica (Wiley, Springer, Taylor & Francis, ScienceDirect, Google Académico). Instituciones de investigación (UCR, ITCR, INTA). Organizaciones internacionales (FAO, IICA).

Cuadro 4. Variables y actividades para la consecución del objetivo.

Variable	Definición	Instrumento	Descripción del instrumento	Actividad	Descripción de la actividad	Indicador	Definición del indicador
Marco regulatorio y normativo actual	Leyes, decretos, normas y reglamentos relacionados con la producción y certificación de material propagativo de cítricos en Costa Rica.	Análisis documental	Revisión exhaustiva de documentos legales y normativos, utilizando software de inteligencia artificial Gemini Advance.	Recopilación y análisis de la legislación vigente.	Búsqueda de documentos en bases de datos legales (Sistema Costarricense de Información Jurídica) y sitios web oficiales (Ministerio de Agricultura y Ganadería).	Índice de cumplimiento normativo	Evaluación del grado en que la legislación actual contempla los requisitos para la certificación de material propagativo de cítricos.
Esquema de producción de material propagativo certificado de cítricos	Descripción detallada del proceso de producción de material propagativo de cítricos, desde la selección de árboles madre hasta la obtención de plantas certificadas.	Estudio de caso	Análisis de un programa de certificación exitoso en otro país (ej. CCPP en California), incluyendo entrevistas a expertos y revisión de documentos.	Análisis de un caso de estudio.	Selección del caso de estudio, recopilación de información (documentos, entrevistas), análisis y comparación con la situación en Costa Rica.	Flujo del proceso de certificación	Representación gráfica del proceso de certificación, incluyendo las etapas, los actores involucrados y los requisitos.

Resultados

Establecimiento de un programa de certificación de material propagativo de cítricos: principios conceptuales fundamentales.

Un sistema eficaz de certificación de material de propagación cítrica debe garantizar dos aspectos críticos en toda su cadena productiva: trazabilidad absoluta y bioseguridad integral. Los protocolos internacionales establecen cuatro componentes esenciales para este proceso:

- Selección genética rigurosa.
- Detección exhaustiva de Enfermedades Transmisibles por Injerto (ETI).
- Aplicación de terapias de limpieza tisular.
- Propagación masiva controlada.

El proceso de diagnóstico debe incorporar metodologías complementarias, donde la bio-indexación y las pruebas de laboratorio proporcionen diferentes niveles de especificidad para una detección patogénica confiable.

Marco regulatorio obligatorio

La implementación exitosa requiere establecer normativas de cumplimiento estricto para todos los eslabones de la cadena:

- Bancos de germoplasma certificados.
- Bloques de fundación controlados.
- Áreas de multiplicación supervisadas.
- Viveros comerciales autorizados.

El acceso al material certificado debe restringirse exclusivamente a viveristas que demuestren conformidad con los requisitos establecidos en un manual técnico oficial, el

cual debe actualizarse periódicamente para incorporar los avances científicos y tecnológicos.

Adaptación agroclimática y gobernanza

El programa debe considerar:

- Evaluación agronómica: identificación de variedades y patrones óptimos para las condiciones locales.
- Zonificación productiva: delimitación de regiones ideales mediante investigación liderada por el Ministerio de Agricultura.
- Gobernanza colaborativa: formación de una comisión público-privada para:
 - Definición de políticas sectoriales.
 - Establecimiento de estrategias de implementación.
 - Creación de equipos ejecutivos operativos.
 - Armonización con estándares internacionales.

El diseño del programa debe basarse en:

- Benchmarking de los sistemas más avanzados en el mundo.
- Adopción de las mejores prácticas disponibles.
- Implementación de los protocolos más exigentes.
- Adaptación contextualizada de los modelos exitosos.

Este enfoque garantizará el desarrollo de un sistema competitivo, técnicamente robusto y adaptado a las necesidades específicas de la citricultura costarricense (ver Figura 7).

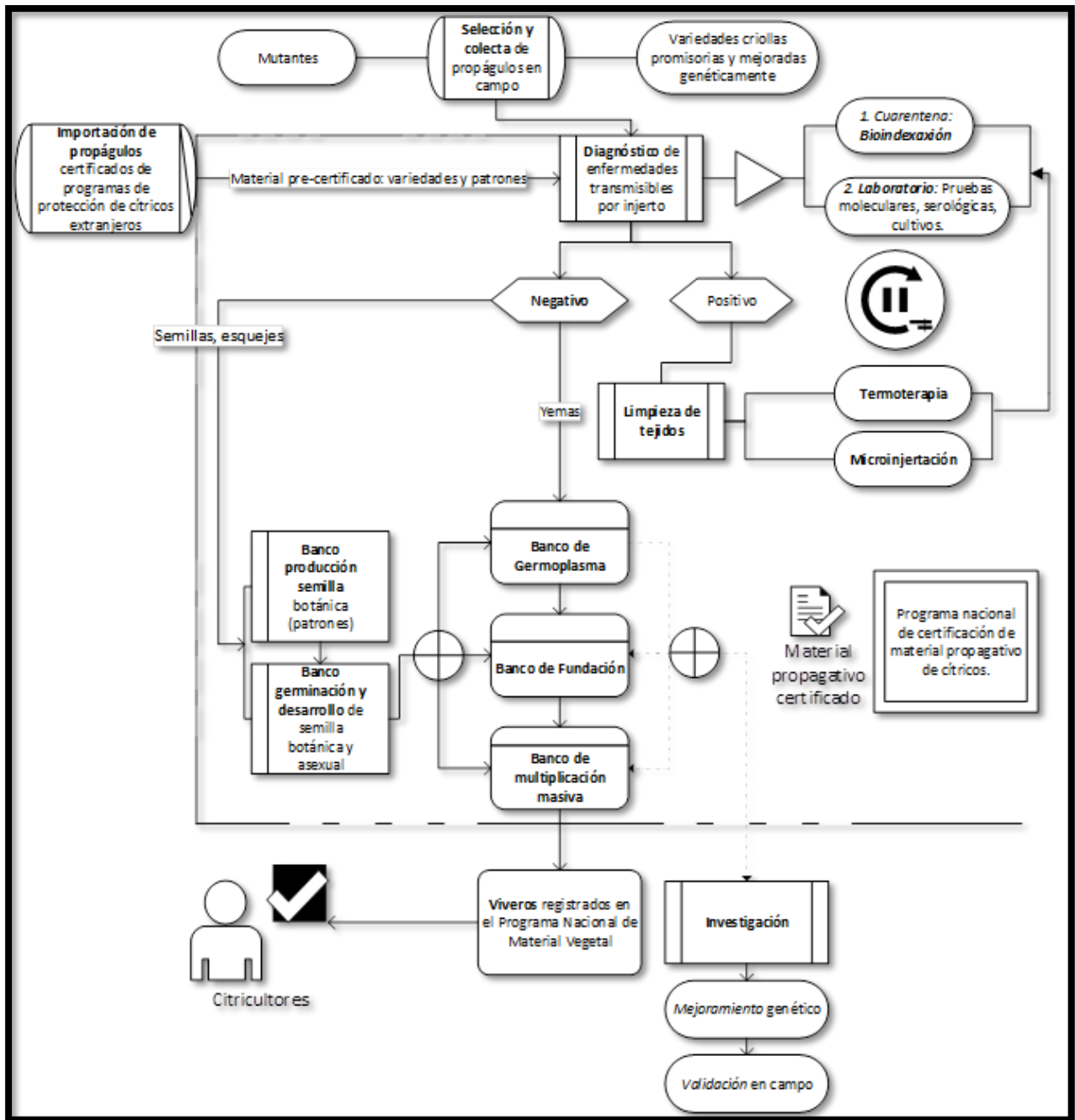


Figura 7. Esquema conceptual para el establecimiento de un programa de propagación de material propagativo de cítricos, también denominado planta sana.

Principios operativos esenciales del SPS

Un sistema de certificación eficaz debe sustentarse en tres pilares fundamentales:

1. Excelencia fitosanitaria: garantía de sanidad vegetal mediante protocolos de diagnóstico y control.
2. Trazabilidad integral: sistema de registro y seguimiento desde el material parental hasta la planta terminada.
3. Potencial agronómico superior: selección de materiales con características genéticas y fisiológicas óptimas.

Implementación por fases estratégicas.

Como se ilustra en la Figura 8, el proceso de certificación requiere el concatenamiento de diversas fases: regulatorias, operativas, productivas y de control.

- Fase de planificación y regulatoria:
 - Definición de protocolos técnicos.
 - Establecimiento de estándares de calidad.
 - Diseño de mecanismos de verificación.
- Fase operativa y productiva:
 - Implementación de controles en campo y laboratorio.
 - Capacitación de personal técnico.
 - Monitoreo continuo de procesos.
- Fase de mejora continua y control:
 - Evaluación periódica de resultados.
 - Actualización de procedimientos.

Incorporación de avances tecnológicos.

Este marco conceptual garantiza el desarrollo de un programa de certificación que no solo cumpla con los requisitos normativos, sino que además impulse la competitividad del sector citrícola mediante la producción de material vegetal de calidad superior.

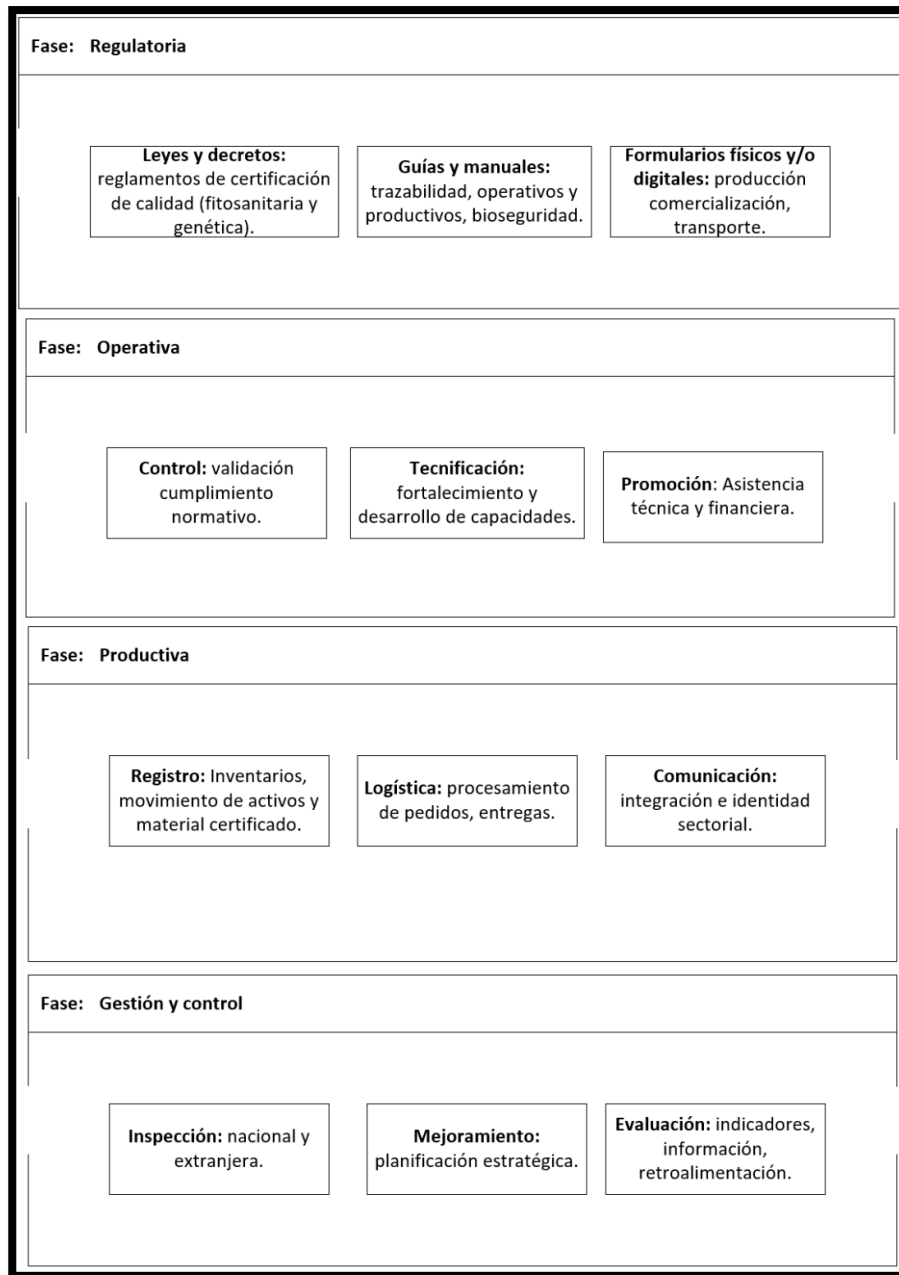


Figura 8. Fases de conceptualización de un programa de certificación de cítricos.

Diseño de un programa de certificación de material propagativo de cítricos: sistema de planta sana (SPS)

A continuación, se establece la sistematización para el diseño de un programa de material certificado de cítricos.

Justificación

El presente documento establece los lineamientos técnicos para la implementación de un programa nacional de certificación de material propagativo de cítricos, denominado Sistema de Planta Sana (SPS). Este sistema busca garantizar la producción de material vegetal libre de patógenos, constituyéndose como pilar fundamental para:

- La sostenibilidad del sector citrícola nacional.
- El desarrollo socioeconómico de las regiones productoras.
- La seguridad fitosanitaria del país.

La iniciativa surge como respuesta a las necesidades identificadas por la Cámara Nacional de Cítricos (Canacítricos), particularmente en regiones citricultoras como las del cantón de Hojancha, donde se requiere urgentemente la renovación de plantaciones existentes. El programa pretende la integración de esfuerzo colaborativo público y privado para el fortalecimiento competitivo de la citricultura nacional.

Infraestructura propuesta

El diseño contempla la construcción de instalaciones especializadas en la Finca La Vega de la Escuela de Agronomía del ITCR, en una superficie estimada de 10,000 m² que albergaría las siguientes unidades:

Unidades de producción vegetal:

1. Banco de Germinación y Desarrollo de Propágulos (194 m²): capacidad para 10,000 propágulos sexuales/asexuales.

2. Bloque de Cuarentena (62 m²): para el resguardo de material propagativo de condición fitosanitaria desconocida.
3. Banco de Germoplasma (524 m²): conservación de dos individuos de 52 variedades de interés económico y científico (104 plantas).
4. Banco de Fundación (1,048 m² total): dos estructuras de iguales características a la del banco de Germoplasma destinadas al incremento primario de variedades de máximo interés comercial (capacidad para 208 plantas).
5. Banco de Multiplicación (324 m²): capacidad para 5,440 plantas multiplicadoras en maceta. Principio de producción: una planta una vareta (de 6 yemas).
6. Banco Productores de Semilla Sexual (1,440 m²): 44 árboles en sistema 5×5 m en invernadero.

Entre las unidades de soporte técnico o infraestructura colateral se destacan:

- Área de indexación (56 m²) con cuartos acondicionados climáticamente.
- Bodega de almacenamiento (70 m²).
- Oficina administrativa (21 m²).
- Sistema de captación pluvial (500 m³ capacidad).

Capacidad productiva y proyecciones

El SPS contará con una capacidad inicial de producción de 130,000 yemas anuales, diseñada bajo los siguientes parámetros técnicos:

- Cobertura del 10% de reemplazo anual para 1 millón de árboles en regiones Chorotega y Huetar Norte.
- Margen del 20% para contingencias operativas.
- Potencial de expansión para satisfacer demanda nacional estimada en 400,000-500,000 yemas/año (Ulises Jiménez, coordinador Comisión Nacional para el Combate de Plagas de los Cítricos, comunicación personal, 2021)

El sistema incorpora tecnologías innovadoras para garantizar su autosuficiencia operativa:

- Implementación de energías renovables: uso paneles solares.
- Sistemas eficientes de cosecha y aprovechamiento hídrico.
- Protocolos de producción con mínimo impacto ambiental: fertirriego de precisión automatizado (internet de las cosas).

El programa está diseñado para:

- Abastecer la demanda de viveros certificados (ver Cuadro 5).
- Reducir la dependencia de material importado.
- Establecer estándares nacionales de calidad fitosanitaria.
- Posicionar a Costa Rica como referente regional en producción cítrica sostenible.

Esta iniciativa representa un avance estratégico para la modernización del sector cítrico nacional, asegurando la disponibilidad de material vegetal de calidad superior que garantice la competitividad y sostenibilidad a largo plazo de la actividad.

Cuadro 5. Total, de fincas con cultivo de naranja por extensión sembrada y en edad de producción en hectáreas, y cantidad de plantas dispersas, según provincia.

Provincia	Total de Fincas	Extensión Sembrada (ha)	Extensión en Producción (ha)	Cantidad de Plantas Dispersas
Costa Rica	12,913	19,595.70	16,305.70	255,624
San José	4,168	417.8	357.6	125,151
Alajuela	2,934	9,907.00	8,721.80	43,827
Cartago	848	77.9	76.4	18,004
Heredia	531	8.8	8.1	4,579
Guanacaste	1,385	8,989.60	6,967.70	27,454
Puntarenas	1,886	120.3	115.3	21,092
Limón	1,161	74.3	58.8	15,517

Fuente: INEC. VI Censo Nacional Agropecuario, 2014.

Modelo de comercialización del sistema propuesto

El diseño operativo del sistema se concentra específicamente en la producción de yemas certificadas para abastecimiento exclusivo de viveros comerciales, sin contemplar la comercialización directa al productor final. Sin embargo, como parte del protocolo de renovación de material vegetal, que según Kesinger (2013) debe realizarse cada 36 meses para garantizar estándares fitosanitarios, las plantas retiradas de los Bancos de Multiplicación mantendrán su valor agronómico y podrán ser ofertadas al mercado. Se estima que el costo de una yema proveniente del SPS tendrá un valor de ₡170-₡200 por unidad, datos no publicados del Centro Mesoamericano de Desarrollo Sostenible del Trópico Seco (CEMEDE) de la Universidad Nacional (UNA). Las plantas retiradas podrían venderse a precio de mercado entre ₡2500-₡3000 al por mayor (más de 50 plantas).

Estructura de precios de referencia de plantas de cítricos

El análisis de mercado revela una clara diferenciación de precios según tipología de material vegetal:

- Variedades tradicionales (naranja, limón, mandarina): rango mayorista: ₡2,200 - ₡3,000 por unidad que dependerán del volumen de compra, costos logísticos de transporte y número de injertos por planta.
- Cultivares especiales (ornamentales y variedades premium): la cotización promedio ronda los ₡5,000 por unidad, por lo que presentan una prima de valorización de entre 78-150% sobre variedades tradicionales y responden a tendencias del mercado.

El Cuadro 6 presenta un análisis histórico-proyectivo de precios que abarca una serie temporal 2010-2023 (datos reales) y una proyección 2024-2035 (modelo predictivo). Entre los factores incidentes en la valoración predictiva se indica la inflación sectorial, costos de insumos y dinámica de la oferta y la demanda.

La identificación de los precios de mercado para los diferentes materiales propagativos es requerida para garantizar la sostenibilidad financiera del SPS, para cubrir costos de mantenimiento y renovación de materiales y estructuras.

Cuadro 6. Precio histórico y proyectado en vivero por planta de cítrico tradicional: naranja, limones y mandarinas.

Provincia	2010 a 2015 (€)	2015-2020 (€)	2020-2025 (€)	2025-2030 (€)	2030-2035 (€)
Por planta de al menos 12 meses	500-800	800-1200	1200-2800	2500-3200	2800-3800

Los mayores viveristas productores de plantas de cítricos se encuentran en el valle central, como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Cantidad de viveristas de cítricos por cantón y/o provincia.

Provincia	Cantón	Principales viveros productores de cítricos
San José	Acosta, Aserrí, Perez Zeledón	6
Alajuela	Atenas, Grecia, Alajuela, Orotina	7
Guanacaste	Hojancha, Nandayure	4
Puntarenas	Esparza, Quepos	2
Limón	Guácimo, Guápiles	2

Fuente: Registros del Programa Nacional de Material Vegetal, SFE.

Producción y comercialización de material propagativo certificado en el sistema de planta sana (SPS)

El SPS se especializará en la producción de:

- Varetas certificadas de cítricos (15-20 cm de longitud × 1 cm de diámetro).
- Semillas certificadas para patrones (producción a mediano plazo).

Cada vareta contiene en promedio 6-8 yemas axilares viables con capacidad para generar plantas completas mediante injerto de características genéticas superiores y de trazabilidad fitosanitaria garantizada.

Estructura de costos y valor de mercado de yemas y semillas certificadas

Precio unitario estimado para el SPS (CEMEDE, datos no publicados):

- Vareta completa: ₡1,360 - ₡1,600 (equivalente a ₡170-₡200/yema).
- Considerando el descarte de las yemas en los extremos por menor viabilidad.

Comparativo internacional de precios de yemas certificadas:

En Estados Unidos el costo unitario de una yema certificada ronda entre USD 0.25 para consumidores locales y USD 2.00/yema para clientes extranjeros a lo que debe sumarse costos adicionales legales y logísticos (USD 150 por certificación), (https://www.fdac.gov/Agriculture-Industry/Pests-and-Diseases/Plant-Pests_and-Diseases/Citrus-Health-Response-Program/Citrus-Budwood_Registration/Citrus-Budwood-Ordering).

En Panamá el costo se sitúa en los USD 0.30/yema (datos OIRSA, 2023). Para Costa Rica los cálculos realizados para el SPS ubican el precio entre USD 0.34-0.40/yema (proyectado). En cuanto a semillas certificadas (mercado internacional), el rango de precios varía entre USD 0.02 - USD 0.05/unidad, dependiendo del volumen y el proveedor (ver Cuadro 8), (<https://www.citrustreesource.com/seeds>, <https://lyncitrusseed.com/rootstock-seed/>).

Problemática del mercado no regulado

Actualmente existe un comercio informal de yemas de "plantas madre" sin certificación, con precios que varían entre los ₡80-₡300/yema (protegidas en casa malla) y los ₡20-₡100/yema (extracción de campo abierto).

Esta práctica presente serios riesgos asociados:

- Alta probabilidad de contaminación patogénica.
- Potencial diseminación de HLB (con consecuencias económicas graves).
- Falta de trazabilidad genética y fitosanitaria.

Estrategia de abastecimiento de material certificado para el establecimiento del SPS

Debido a que el desarrollo secuencial de un sistema de certificación de cítricos en condiciones normales requeriría de al menos 5 años, el país requiere realizar un “*bypass*” técnico, destinando yemas y semillas certificadas directamente a multiplicación masiva mientras que de manera paralela se erige las restantes unidades del sistema.

La adquisición de material de fundación debe provenir de la importación de yemas y semillas de programas certificados de protección de materiales propagativos de cítricos oficiales, con los que se establecerían los lotes de “plantas madre” en el Banco de Multiplicación y en paralelo los lotes de los Bancos de Germoplasma y Fundación que suplirían al SPS una vez alcancen su madurez operativa.

En resumen, se opera por urgencia nacional en tres pasos iniciales:

1. Injerto de yemas certificadas sobre patrones de semilla certificada de importación para conformar el Banco de Multiplicación.
2. Paralelamente se injertan los lotes que conformarán los Bancos de Germoplasma y Fundación, indispensables para cumplir con las prácticas de certificación internacionalmente reconocidas.
3. Alcanzado la madurez operativa, el SPS produciría su propio material.

Es importante tomar en consideración que los patrones se desarrollan durante siete meses antes de ser injertados, la yema una vez injertada debe madurar por cinco meses. Transcurridos doce meses de iniciado el proceso, se obtiene una vareta con alrededor seis yemas viables. Por lo anterior, para cumplir con los objetivos de producción descritos

(130 mil yemas anuales) se debe de importar yemas certificadas para injertar 5440 plantas multiplicadoras, considerando una merma de operación de 15-20%.

Entre las ventajas competitivas del SPS se indican:

- Beneficios económicos: reducción de costos en ~40% vs. Importación, eliminación de gastos logísticos y certificación internacional.
- Garantías de calidad: sanidad vegetal comprobada, potencial genético certificado y trazabilidad documentada.
- Sostenibilidad sectorial: reducción de dependencia externa, fortalecimiento de la citricultura nacional y prevención de riesgos fitosanitarios.

Los precios proyectados consideran amortización de infraestructura, costos operativos y márgenes de sostenibilidad del sistema, posicionándose como alternativa económicamente viable frente al mercado informal y las importaciones

Cuadro 8. Cantidad de semillas de portainjertos por litro de las principales variedades utilizadas en la citricultura, precios por volumen en dólares americanos.

Variedad	Semillas aproximadas por cuarto (1 cuarto = 0.95 litros)	1 a 3 litros	4 a 19 litros	20 a 99 litros	100 o más
Citranges					
Benton*	3,200-4,600	\$120.00	\$117.00	\$117.00	\$117.00
C-22 Bitters*	5,000				
C-32	3,000-3,150	\$140.00	\$135.00	\$135.00	\$135.00
C-35	4,000-4,200	\$120.00	\$115.00	\$110.00	\$110.00
C-54 Carpenter	6,400				
C-57 Furr	5,000				
Carrizo	2,600-2,730	\$105.00	\$103.00	\$100.00	\$97.00
Kuharski	3,000				
Troyer	3,400	\$105.00	\$103.00	\$100.00	\$97.00
Citrumelos					
4475	3,000				
Swingle	3,000-3,150	\$105.00	\$103.00	\$100.00	\$100.00
Sacaton (Yuma Citrange)*	4,600				
Lemons and Limes					
Mexican Lime (Citrus aurantifolia)	5,000				
Rangpur Lime (Citrus limonia, Cravo Lemon)	9,000				
Volkamer Lemon (Citrus volkameriana)	9,450	\$105.00	\$103.00	\$100.00	\$97.00
Schaub Rough Lemon (Citrus jambheri, Jatti Khatti)					
Mandarins					
Cleopatra (Citrus reshni)	6,000-6,300	\$105.00	\$103.00	\$100.00	\$100.00
Sunki* (Citrus reticulata var. austera, suenkat)	6,000				
Sun Chu Sha* (Citrus reticulata)	5,600				
Sour Orange (Citrus x aurantium)					
Brazilian	3,400				
Sicilian*	3,400				
Smooth Flat Seville*	3,300				
Sweet Orange (Citrus sinensis)					
Madam Vinus*	2,700				
Pineapple*	2,700				
Trifoliates (Poncirus trifoliata)					
Flying Dragon	4,200-4,410	\$105.00	\$103.00	\$100.00	\$97.00
Pomeroy	3,200				
Rich 16-6	3,700-3,885	\$105.00	\$103.00	\$100.00	\$97.00
Rubidoux	3,600-3,780	\$105.00	\$103.00	\$100.00	\$97.00
Others					
African Shaddock x Rubidoux Trifoliata*	2,900				
Sour Orange		\$105.00	\$103.00	\$100.00	\$100.00
Citrus moi* (Citrus pennivesiculata, Gajanamma)	4,800				
Citrus oboveidea* (Kinkoji)	2,900				
CRC 343 Grapefruit*	2,700-3,500	\$115.00	\$110.00	\$105.00	\$105.00
Cuban Shaddock* (Citrus maxima, similar to Ponderosa Lemon)	7,500				
Citrus macrophylla (Alemow)	5,000-5,200	\$160.00	\$155.00	\$145.00	\$145.00
Citrus taiwanica* (Nansho Daidai sour orange)	2,500				
Yuzu (Citrus junos)*	1,700				
X-639* (Cleopatra mandarin X trifoliata)	7,600				

Nota * disponible en poca cantidad.

Selección y compatibilidad de materiales cítricos promisorios para Costa Rica

Criterios de selección para patrones. Los patrones de cítricos deben cumplir con requisitos esenciales de adaptabilidad:

- Adecuación genética a las condiciones agroecológicas locales.
- Resistencia a factores bióticos y abióticos específicos.
- Compatibilidad fisiológica con variedades comerciales.

Estos parámetros se detallan técnicamente en el Cuadro 9. En el Cuadro 10 se presenta un resumen de compatibilidad entre patrones y variedades de mayor consumo.

Selección de variedades comerciales. La elección de variedades se basa en:

- Potencial de mercado y valor comercial.
- Rendimiento productivo comprobado.
- Características organolépticas.
- Adaptación a demandas del consumidor.

Material promisorio para investigación. El SPS además debe incorporar:

- Material genético con características especiales para validación en campo.
- Variedades con potencial comercial aun no presentes en el país.
- Acciones y patrones para el desarrollo de investigaciones, independientemente de su valor comercial inmediato.

Cuadro 9. Patrones con características de interés para la citricultura nacional.

Patrón	Año de disponibilidad	Germinación de semillas	Uniformidad de plántulas	Tamaño del árbol	Espaciamiento (metros)	Rendimiento por árbol	Rendimiento por ha.	Calidad del jugo	Tamaño de la fruta	Salinidad	pH alto	Suelo arcilloso	Suelo húmedo	Sequia	Incidencia de HLB	Tizón (Blight)	Phytophthora	Complejo picudo-P. palmivora	Nematodo barrenador	Nematodo de los cítricos	Tristeza
x-639	1994	80%-90%	80%-90%	G	2.4 - 3.7	I	I-Ao	Ao/Ao	I	B	(I)	(B)	(B)		Bj		T	(S)	(S)		T
Volkamer lemon	1970	>90%	98%	G	3.7 - 4.6	Ao	I-Ao	Bj/Bj	G	I	T	I	I-B	B		S	T	(S)	S	S	T
US-942	2010	>90%	96%	Pq-I	2.4 - 3.0	Ao	Ao	Ao/Ao	I		(B)	(B)	(B)	(B)	Bj	T+	T	T			T+
US-897	2007	>90%	98%	Pq	2.4 - 3.0	Bj	Ao	Ao/Ao	Pq-I		(I)	(B)	(I)		I	I	T	T			T
US-896	2015	>90%	97%	Pq-I	2.4 - 3.0	Ao	Ao	Ao/Ao	I-G						I	T	T	(S)			T
US-812	2001	>90%	96%>	I	3.0 - 3.7	Ao	Ao	Ao/Ao	I		B	(I)	(I)		I	T+	T	(S)			T+
US-802	2007	>90%	98%	G	3.7 - 4.3	Ao	I	Bj-I/I	G		(I)	(B)	(I)		Bj	T	T	T			T
US-1516	2015	80%-90%	73%	I-G	3.0 - 4.3	Ao	Ao	Bj-I/I	I-G						Bj		T	(I)			T
US-1284	2014	>90%	95%	I	3.0 - 3.7	Ao	Ao	I/I	I-G						Bj		T	(I)			T
US-1283	2014	>90%	96%	Pq-I	2.4 - 3.0	Ao	Ao	Ao/Ao	I-G						Bj		T	(I)			T
US Super Sour 3	2019			Pq-I	2.4 - 3.0	(Ao)	(Ao)	I/I	I						Bj		T				(T)
US Super Sour 2	2019			Pq-I	2.4 - 3.7	(Ao)	(Ao)	I/I	I						Bj		T				(T)
US Super Sour 1	2019	>90	<5%	Pq-I	2.4 - 3.8	(Ao)	(Ao)	I/I	I-G						Bj		T				(T)
Swingle citrumelo	1974	>90	95%	I	2.4 - 3.7	I	I	I/I	I	P	P	P	(B)	P-I	I	T	T+	S	(S)	R	T
Rusk citrange	1960	80%-90%**	80%-90%	Pq-I	1.8 - 2.4	I	I-Ao	Ao+I	I	P	P		P	(P)		(I)	T	(S)	S		T
Kuharske citrange	1932	>90%	80%-90%	G	2.4 - 3.7	(Ao)	I-Ao	I/I	I/G	(P-I)	(P)				(B)		I	(S)	(R)	S	(T)
Kinkoji	1986	80%-90%	86%	I	2.4 - 3.0	(I)	I	Bj-I/Bj	I		(I)	(B)	(B)				T	(S)	(S)		T
Goutou	1994	80%-90%	80%-90%	I	2.4 - 3.0	(Bj-I)	(I)	Bj-I/Bj	G		(I)	B	(B)				S	(S)	(S)		T+
Flying Dragon TF	1978	80%-90%	80%-90%	Pq	1.5 - 2.1	Bj-I	Ao	Ao/Ao	Pq-I	P	P	B	I	P		P	T	(I)	S	R	T
Cleopatra mandarin	1932	>90%	99%	G	2.4 - 4.6	Bj-I	I	Ao/Ao	Pq	B	I	B	P	I-B	Bj	S-T	S	(S)	S	S	T
Carrizo citrange	1932	>90%	90%	G	2.4 - 3.7	Ao	I-Ao	I-Ao/I	I-G	P	P	P	I	B	I-H	I	I	(S)	(S)	S	T
C-57 Furr	2009	80%-90%	80%-90%	I	2.4	(Ao)	(Ao)	Ao/I	I		I				(Bj)		B			B	I
C-54 Carpenter	2009	80%-90%	80%-90%	I	2.4	(Ao)	(Ao)	Ao/I	I		I				(Bj)		I			B	I
C-35 citrange	1994	80%-90%	80%-90%	I	2.4 - 3.0	I	I-Ao	Ao/I	I	(P-i)	P	(P)	(I)				T+	(S)	(S)	R	T
C-22 Bitters	2009	80%-90%	80%-90%	Pq-I	1.8 - 2.4	(I)	(I)	Ao/I	I		B+				(I)		I			S	I
C-146	2009	80%-90%	80%-90%	I	2.4	(Ao)	(Ao)	Ao/I	I						(Bj)		(B)			(B)	(I)

Fuente: Adaptado de la guía de patrones de la Universidad de la Florida. Nomenclatura: Pequeño (Pq). Intermedio (I). Grande (G). Bajo (Bj). Alto (Ao). Excelente (E). Bueno (B). Pobre (P). Alto (Ao). Moderada (M). Susceptible (S). Tolerante (T). Resistente (R). Entre paréntesis, calificación esperable.

Cuadro 10. Compatibilidad entre variedades de cítricos y patrones de uso común.

Variedad \ Patrón	Citrange Carrizo	Citrange Troyer	Swingle Citrumelo	Mandarino Cleopatra	Naranja Amargo	Volkameriano	Limón Rugoso	Macrophylla	Flying Dragon	US-942	US-802	US-812	US-897	C-35	Sunki
Naranja: Valencia, Navel, Sanguina	COM	COM	COM	COM (Puede haber problemas de incompatibilidad con algunas variedades de mandarinas, especialmente en suelos con alto pH).	COM (Se recomienda precaución en áreas con alta incidencia de CTV (tristeza))	COM	COM	REG	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM
Mandarina: Clementina, Satsuma, Tangerina	COM	COM	COM	COM	COM (Algunas variedades de mandarinas pueden presentar incompatibilidad con el naranja amargo, especialmente en climas cálidos)	COM	COM	REG	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM
Limón: Eureka, Lisbon Meyer.	COM (Se ha reportado incompatibilidad con algunas variedades de limón, especialmente en suelos con deficiencia de hierro.	COM (Se ha reportado incompatibilidad con algunas variedades de limón, especialmente en suelos con deficiencia de hierro).	COM	COM (La compatibilidad puede variar según la variedad de limón).	COM	COM	REG	INCOM	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM
Pomelo: Marsh Star Ruby, Rio Red	COM	COM	COM	COM (El mandarino Cleopatra puede ser un buen injerto para mejorar la compatibilidad con algunos pomelos).	COM	COM	COM	REG	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM
Lima: Ácida Tahiti, Bearss	COM	COM	COM	COM (Algunas variedades de lima pueden presentar incompatibilidad con el mandarino Cleopatra.)	COM	COM	REG	INCOM	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM
Toronja Marsh	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM	REG	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM
Kumquat Nagami	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM	REG	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM
Limón Rugoso	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM	REG	COM	COM	COM	COM	COM	COM	COM

Nomenclatura: COM (Compatible) INCOM (Incompatible), REG (Regular compatibilidad)

Selección estratégica de variedades para injertos intermedios y mejoramiento productivo

Uso de variedades para injertos intermedios

La implementación de injertos intermedios (ver Cuadro 11), se fundamenta en criterios técnicos específicos:

- Compatibilidad trifásica (patrón-intermediario-variedad).
- Control del vigor vegetativo.
- Resistencia a patógenos del suelo.
- Influencia en parámetros cualitativos del fruto.
- Adaptación a condiciones edafoclimáticas particulares.

Variedades promisorias para el desarrollo citrícola nacional

La selección de variedades es presentada en el Cuadro 12, incluye materiales con potencial para:

- Incrementar significativamente la productividad y mejorar la calidad comercial de la producción.
- Diversificar la oferta varietal del país y fortalecer la competitividad del sector.
- Reducir la dependencia de material importado.

Estas variedades han sido evaluadas bajo criterios de:

- Adaptación agroecológica comprobada y rendimiento productivo sostenido.
- Resistencia a enfermedades clave y aceptación en mercados objetivo.

La implementación de este portafolio varietal representa una oportunidad estratégica para modernizar la base productiva de la citricultura nacional, respondiendo a las demandas actuales del mercado y anticipándose a los desafíos fitosanitarios futuros

Cuadro 11. Genética utilizada en procedimientos de interinjerto en producción de plantas de cítricos.

Tipo de Cítrico	Patrón	Interinjerto	Copa	Beneficios
Lima	Citrango Carrizo	Naranja amargo	Lima ácida Tahiti	Tolerancia a sequía, resistencia a Phytophthora. El interinjerto puede mejorar la calidad de la fruta.
	US-942	Swingle Citrumelo	Lima Bearss	Tolerancia a HLB, Phytophthora y CTV.
Limón	Citrumelo 4475	Volkamer Lemon	Limón Eureka	Tolerancia a salinidad y Phytophthora. El interinjerto puede mejorar la tolerancia a la sequía y la calidad del fruto.
	US-802	-	Limón Meyer	Patrón vigoroso, adecuado para suelos húmedos.
Naranja	US-942	Swingle Citrumelo	Naranja Valencia	Tolerancia a HLB, Phytophthora y CTV.
	Citrango Carrizo	Naranja amargo	Naranja Hamlin	Tolerancia a sequía y suelos con alto pH. El interinjerto puede mejorar el vigor y la calidad de la fruta.
Toronja	US-802	-	Toronja Star Ruby	Patrón vigoroso con cierta tolerancia a la humedad.
	Citrumelo 4475	Swingle Citrumelo	Toronja Marsh	Tolerancia a la salinidad, Phytophthora y CTV.
Pomelo	US-897	Mandarino Cleopatra	Pomelo Chandler	Patrón que induce un tamaño de árbol más pequeño. El interinjerto puede mejorar la calidad de la fruta.
	Citrango Carrizo	Naranja amargo	Pomelo Red Marsh	Tolerancia a sequía y suelos calizos.
Mandarina	Flying Dragon	-	Mandarina Satsuma Owari	Patrón enanizante, ideal para plantaciones de alta densidad.
	Cleopatra mandarin	-	Mandarina Clementina	Patrón común para mandarinas, con buena tolerancia a la salinidad.

Cuadro 12. Variedades de cítricos de interés (accesiones) y cantidades propuestas de material propagativo de importación para el establecimiento del SPS.

No.	Nombre científico	Cultivar ID	Número Germoplasma	No. Varetas	No. Yemas	Motivo selección
		Pomelos y Toronjas				
1	<i>Citrus paradisi</i>	Río Red	PI 539485	4	24	Jugo, fruta
2	<i>Citrus maxima</i>	Kao Panne	PI 539400	4	24	Confitura
3	<i>Citrus maxima</i>	Red Aranyan	PI 539384	4	24	Injerto intermedio
		Mandarinas				
4	<i>Citrus reticulata</i>	Honey	PI 539503	16	96	Fruta
5	<i>Citrus reticulata</i>	Dancy	PI 539683	16	96	Fruta
6	<i>Citrus unshiu</i>	Okitsu Wase	PI 436688	20	120	Fruta
7	<i>Citrus unshiu</i>	Frost Owari	PI 539689	20	120	Fruta
8	<i>Citrus clementina</i>	Clemenules	PI 654845	20	120	Fruta
9	<i>Citrus clementina</i>	Fina Sodea	PI 539186	20	120	Fruta
10	<i>Citrus reticulata</i>	Seedless Kishu	PI 539530	20	120	Fruta
11	<i>Citrus reticulata</i>	Dweet tangor*	PI 539240	8	48	Fruta
12	<i>Citrus reticulata</i>	Selma Satsuma	PI 654902	8	48	Fruta
13	<i>Citrus reticulata</i>	Temple X Dancy	PI 600653	20	120	Fruta
		Limones y limas				
14	<i>Citrus latifolia</i>	Persian lime SPB-7	PI 658363	160	960	Fruta
15	<i>Citrus aurantifolia</i>	Mexican lime*	PI 539151	80	480	Jugo, fruta
16	<i>Citrus limon</i>	Frost nucellar Eureka	PI 539318	20	120	Fruta
17	<i>Citrus limon</i>	Limoneira & A Lisbon	PI 539305	20	120	Fruta
18	<i>Citrus hystrix</i>	Kaffir lime	PI 539248	4	24	Esencias
		Naranjas				
19	<i>Citrus sinensis</i>	Rhode Red Valencia*	PI 539696	240	1440	Jugo, fruta
20	<i>Citrus sinensis</i>	Olinda Nucellar	PI 539656	20	120	Jugo, fruta
21	<i>Citrus sinensis</i>	Valencia Late	PI 654865	184	1104	Jugo, fruta
22	<i>Citrus sinensis</i>	Salustiana	PI 539632	32	192	Jugo, fruta
23	<i>Citrus sinensis</i>	Frost Valencia	PI 539660	32	192	Jugo, fruta
24	<i>Citrus sinensis</i>	Culler	PI 539659	8	48	Jugo, fruta
25	<i>Citrus sinensis</i>	Rohde	PI 654872	8	48	Jugo, fruta
26	<i>Citrus sinensis</i>	Cara Cara	PI 539580	8	48	Fruta
27	<i>Citrus sinensis</i>	Navelina	PI 600880	28	168	Fruta
28	<i>Citrus sinensis</i>	Lane Late	PI 362329	16	96	Fruta
29	<i>Citrus sinensis</i>	Rhode Navel	PI 654872	8	48	Fruta
		Kumquats				
30	<i>Fortunella crassifolia</i>	Nagami	PI 539729	4	24	Fruta, confitura
		Híbridos				
31	<i>XCitrafortunella microcarpa</i>	Calamondin	PI 539349	4	24	Fruta
32	<i>Citrus reticulata</i>	Ortanique	PI 539243	8	48	Fruta
33	<i>Citrus reticulata</i>	Ellendale	PI 539536	4	24	Fruta
34	<i>Citrus reticulata</i>	W. Murcott Alourer	PI 539533	8	48	Fruta
35	<i>Citrus Xtangelo</i>	Orlando	PI 539711	4	24	Fruta
36	<i>Citrus Xtangelo</i>	Page	PI 539710	4	24	Fruta
37	<i>Citrus reticulata X C. paradisi</i>	Cocktail	PI 539219	4	24	Fruta
		TOTAL		1088	6528	

Nota: * Especies también incluidas en la lista de patrones de interés para el SPS.

Protocolo operativo del sistema de producción de plantas sanas (SPS)

Capacidad productiva y metas de producción.

El sistema está diseñado para mantener un “stock” permanente de 5,540 plantas madre en la unidad de Multiplicación, con capacidad para generar:

- Producción inicial: 32,640 yemas certificadas (primera cosecha).
- Producción cíclica: 32,640 yemas trimestrales.
- Producción anual proyectada: 130,560 yemas certificadas.

Estrategia de implementación acelerada.

Para cumplir con los requerimientos urgentes del sector, se propone la importación controlada de material certificado (que de igual manera debe pasar por inspección oficial)

- Volúmenes suficientes para iniciar producción inmediata.
- Desarrollo paralelo de las unidades fundacionales (Germoplasma y Fundación).
- Destino directo a la unidad de Multiplicación.

Las ventajas comparativas de esta acción acelerada yacen en:

- Reducción del tiempo de implementación a 12 meses (vs. 36-60 meses en métodos tradicionales).
- Capacidad de abastecimiento temprano de la demanda regional/nacional.

Estructura operativa por niveles

Esta estructura escalonada asegura la trazabilidad y calidad del material en cada fase del proceso, desde la conservación genética hasta la distribución comercial.

Entre las consideraciones técnicas para el proceso operativo se pueden mencionar:

- Protocolos estrictos de trazabilidad en todos los niveles.

- Control fitosanitario permanente.
- Capacidad de escalamiento progresivo según demanda.
- Evaluación continua de parámetros de calidad.

Este modelo operativo garantiza la producción eficiente de material certificado, combinando rapidez de implementación con los más altos estándares de calidad fitosanitaria.

Arquitectura del sistema de planta sana (SPS): componentes y funcionalidad

Este sistema se fundamenta en una estructura multinivel (ver Figura 9), en la que cada etapa desempeña funciones específicas bajo rigurosos controles de calidad a fin de asegurar la sanidad del material vegetal:

- Nivel 0. Selección y cuarentena de propágulos: abastecimiento (selección) y cuarentena del material de propagación, asegurando su trazabilidad y estado fitosanitario.
- Nivel 1. Diagnóstico y limpieza de tejidos: contempla el uso de laboratorios de diagnóstico fitosanitario (por biotecnología, serología e indexación) y de saneamiento vegetal (cultivo de meristemas, quimioterapia, termoterapia, crioterapia, microinjertación).
- Nivel 2. Conservación y Protección de material vegetal: almacenamiento y protección del material vegetal en Bancos de Germoplasma, Bancos de Fundación y Bancos de Semillas. Las “plantas madre” tendrán identidad única y abastecerán de tejido al Banco de Multiplicación para su masificación.
- Nivel 3. Multiplicación de tejidos: producción masiva de yemas certificadas mediante lotes de plantas certificadas destinadas de manera exclusiva a la reproducción intensiva de tejido.

- Nivel 4. Disponibilidad y distribución de plantas certificadas: a través de viveros comerciales que adquieren yemas y semillas certificadas para la producción y venta de plantas de cítricos debidamente certificadas al sector productivo y público en general.

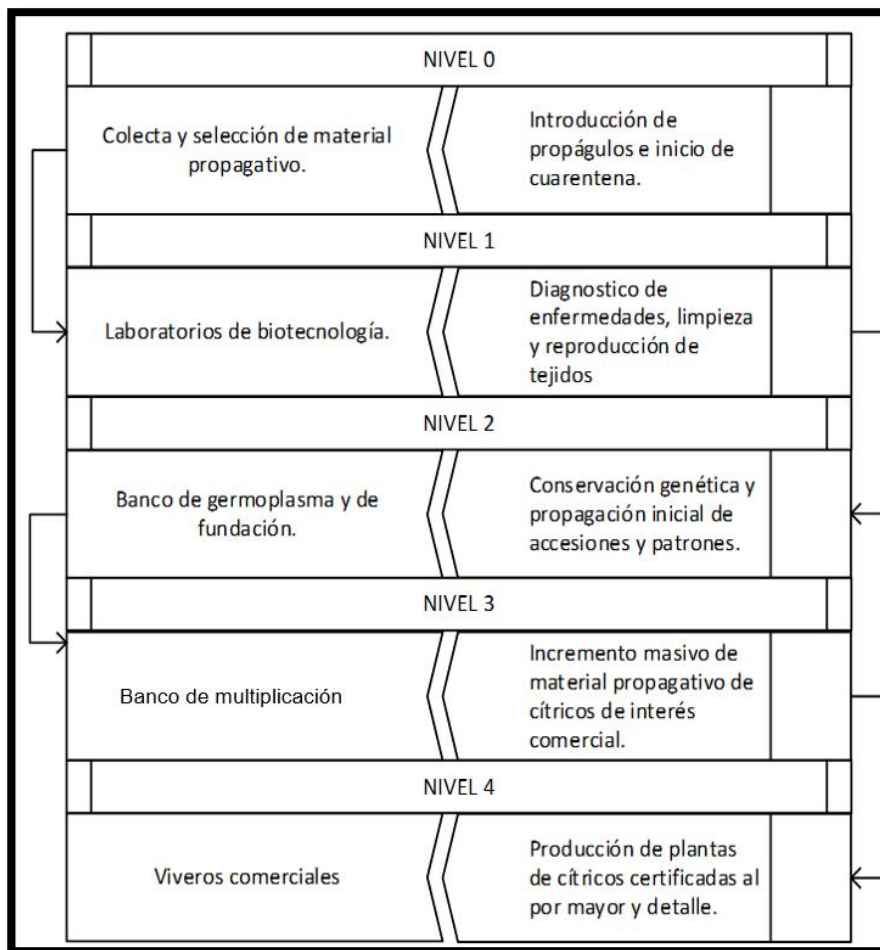


Figura 9. Flujograma operativo multinivel para el SPS.

Nivel 0. Selección, colecta y cuarentena de materia vegetal de interés

El sistema contempla dos fuentes principales de abastecimiento:

- Material nacional promisorio, procedente de plantas con características agronómicas destacadas en campos locales. Proceso de incorporación:
 1. Recolección de explantes.

2. Cuarentena inicial.
 3. Propagación preliminar (para preservar material genético limitado).
 4. Diagnóstico fitosanitario completo.
 5. Limpieza de tejidos (cuando sea necesario).
 6. Segundo diagnóstico de verificación.
 7. Incorporación final a Bancos de Germoplasma/Fundación.
- Material internacional certificado proveniente de programas de certificación reconocidos mundialmente. Requisitos de importación:
 - Varetas y semillas con certificación de un programa nacional o internacional reconocido.
 - Diagnóstico obligatorio según normativa fitosanitaria nacional, al nacionalizarse.
 - Validación de estándares de bioseguridad. Origen con autorización previa para la importación mediante resolución de ARP (Análisis de Riesgo de Plagas), unidad técnica que pertenece al SFE.

Medidas de bioseguridad asociadas:

Para la prevención de introducción de enfermedades económicamente relevantes (ver Cuadro 14) es imperativo el cumplimiento de protocolos estrictos de manejo y contención, enmarcados dentro de un sistema de trazabilidad documentada.

Unidades operativas del Nivel 0:

Bloque de Cuarentena

La función del Bloque de Cuarentena es la preservación temporal de variedades seleccionadas de condición fitosanitaria incierta. Entre las características de la unidad se menciona:

- Área de 62 m².
- Infraestructura tipo invernadero.

- Sistema de aislamiento biológico.

Entre los beneficios que brinda esta unidad puede indicarse que evita la pérdida de material genético valioso para posteriores usos.

Bodega de almacenamiento

La función de esta estructura está en dar custodia organizada de insumos y materiales.

Entre las especificaciones se señala:

- Superficie: 70 m².
- Sistema de inventario controlado.
- Acceso restringido.

Las ventajas que ofrece la bodega al SPS está el uso optimizado y disponibilidad inmediata de recursos y suministros.

Oficina administrativa

La oficina administrativa tendría a cargo la gestión documental y operativa. Se caracteriza por los siguientes criterios de construcción:

- Espacio de 21 m².
- Área para registros y documentación.
- Centro de coordinación operativa.

La utilidad de este recinto está en el mantenimiento de los registros fitosanitarios y la organización de actividades programadas.

Nivel 1. Laboratorio de diagnóstico fitosanitario y limpieza de tejidos

Esta fase, garantía de fitosanidad y procesamiento de material vegetal, constituye un componente crítico del sistema, como se detalla en la Figura 10, requiriendo:

- Inversión significativa en equipamiento de laboratorio especializado.

- Infraestructura técnica adecuada.
- Personal altamente calificado en fitopatología y biotecnología vegetal.

Proceso de saneamiento de material vegetal:

Todos los tejidos, independientemente de su origen (nacional o internacional), son sometidos en el Nivel 1 a:

- Protocolos estandarizados de detección de patógenos.
- Procesos de eliminación de agentes transmisibles por injerto.
- Verificación de calidad fitosanitaria.

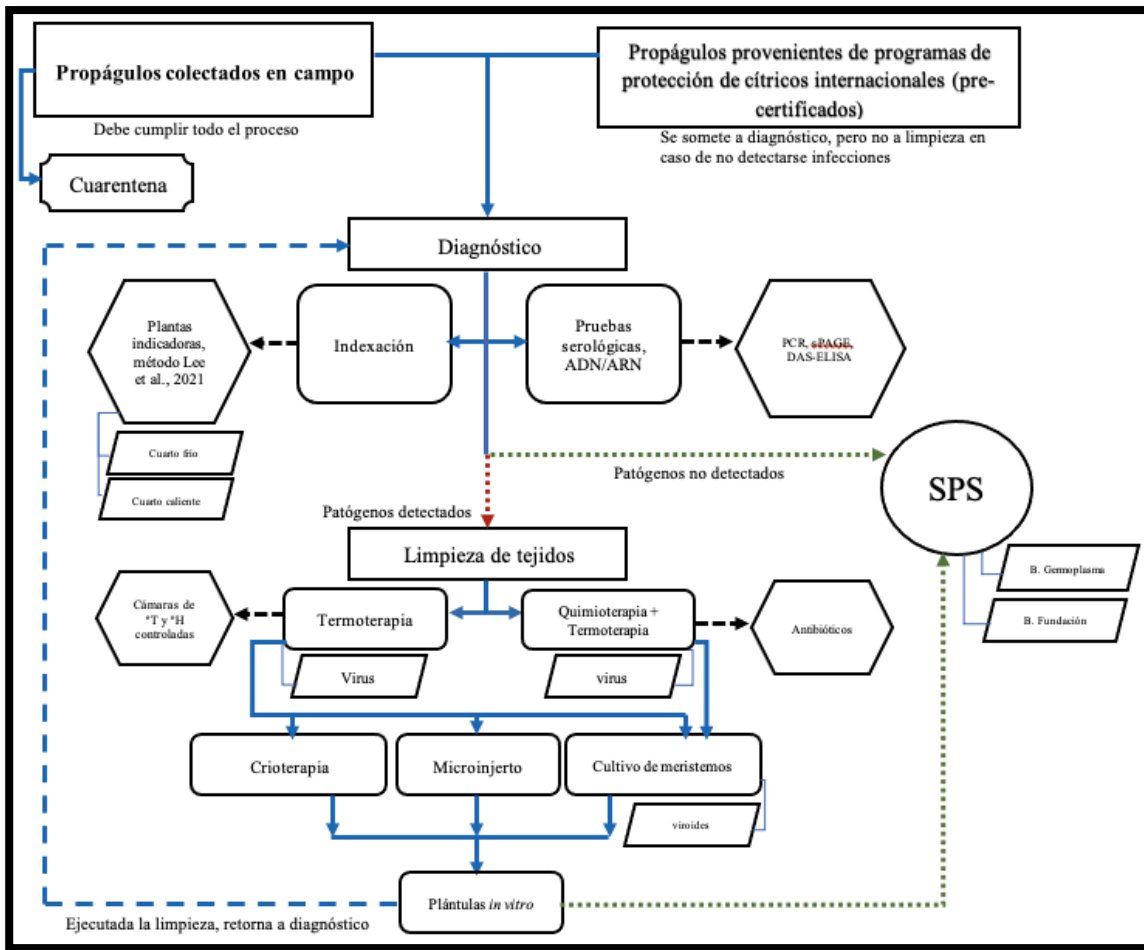


Figura 10. Flujo de introducción y procesamiento de accesiones de cítricos y variedades promisorias. Adaptado de: CCPP, 2014; Alves *et al.*, 2019; Vidalakis *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2021.

Potencial del SPS como centro de cuarentena y de conservación de material vegetal

El Sistema de Producción de Plantas Sanas de Cítricos (SPS) está estratégicamente posicionado para operar como:

- Centro autorizado de cuarentena vegetal:
 - Recepción y procesamiento de material importado.
 - Validación fitosanitaria según normativas internacionales.

- Unidad especializada en conservación de germoplasma:
 - Servicios de crioconservación (-196°C) para preservación a largo plazo.
 - Banco activo de tejidos meristemáticos.
 - Recuperación de variedades en riesgo de extinción.

Protocolo de transferencia de material certificado:

Los clientes deberán cumplir con ciertos requisitos para obtener yemas certificadas del SPS:

- Deben estar inscritos ante el PNMV del SFE.
- Contar con infraestructura certificada para preservación de tejido vegetal (invernaderos bioseguros).
- Capacidad técnica demostrada en propagación vegetal.
- Sistemas de trazabilidad documentada.

La entrega de material certificado es un proceso que cumple una serie de pasos:

- El material debe ser previamente sometido a:
 - Diagnóstico molecular completo.
 - Terapia de limpieza tisular.
 - Cuarentena confirmatoria.
- Documentación de acompañamiento:
 - Certificado fitosanitario.
 - Protocolo de manipulación.
 - Registros genéticos.

Este modelo garantiza la provisión de material vegetal de alto valor genético con garantías fitosanitarias, fortaleciendo la investigación y producción comercial de cítricos en el país.

Laboratorio de diagnóstico fitosanitario

El proceso inicia con pruebas de diagnóstico fitosanitario que incluyen:

- Indexación: técnica que utiliza plantas indicadoras altamente sensibles (lima mexicana, otras) en la detección de patógenos infecciosos (Lee *et al.*, 2021).
- Pruebas serológicas (ELISA): detectan la presencia de anticuerpos específicos contra patógenos.
- Pruebas moleculares (PCR): identifican patógenos a través de su material genético.
- Cultivo en medios selectivos: aísla e identifica patógenos fúngicos y bacterianos.

Bloque de indexación

El presente proyecto implementará el innovador protocolo de indexación desarrollado por Lee *et al.* (2021), destacándose por su superior eficiencia técnica y operativa. Este método reduce sustancialmente el tiempo de evaluación a tan solo tres meses, logrando simultáneamente una densidad de siembra de 240 plantas/m². Estas cifras contrastan marcadamente con los parámetros del método convencional, que requiere de nueve meses para completar el proceso de evaluación y una densidad significativamente menor de 30 plantas/m², demostrando una clara desventaja en términos de eficiencia operativa y aprovechamiento de recursos.

Este enfoque metodológico posibilita la detección temprana de patógenos de importancia cuarentenaria que podrían evadir otros sistemas de diagnóstico convencionales. Según los hallazgos reportados por Lee *et al.* (2021), esta capacidad de identificación precoz representa una mejora sustancial en la efectividad de los programas de protección fitosanitaria para cítricos.

Estas plantas bio-indicadoras son de un genotipo igual o similar a las mencionadas en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Lista de plantas utilizadas para indexación.

Temperatura	Planta indicadora	Nombre científico	Patogeno transmitido por injerto detectado
Fría	Mexican lime	<i>Citrus aurantiifolia</i> (Christm.) Swingle	Tristeza, psorosis, and vein enation
Fría	Sweet orange (Madam Vinous)	<i>C. sinensis</i> (L.) Osbeck	Psorosis, concave gum, cristacortis, impietratura, stem pitting, and infections variegation
Fría	Dweet tangor	<i>C. reticulata</i> Blanco x <i>C. sinensis</i> L.	Citrus leaf blotch (Dweet mottle), psorosis, concave gum, cristacortis, impietratura
Fría	<i>Citrus excelsa</i>	<i>Citrus excelsa</i> Wester	Tatter leaf y tristeza
Fría	Rusk Citrange	<i>C. sinensis</i> L. x <i>Poncirus trifoliata</i> L.	Tatter leaf
Fría	Standard sour orange	<i>C. aurantium</i> L.	Psorosis, seedling yellows-tristeza, vein enation
Fría	Arizona 861-S1 Etrog citron	<i>C. medica</i> L.	Infectious variegation, varios otros virus
Caliente	Citron/rough lemon	<i>C. medica</i> L./ <i>C. jambhiri</i> Lush.	Exocortis, Cachexia, other citrus viroids seguido por sPAGEb

Fuente: Lee, *et al.* (2021).

El éxito del proceso de indexación depende críticamente del manejo preciso de las variables ambientales en el bloque de evaluación, con especial énfasis en los parámetros de iluminación y temperatura. Las plantas indicadoras requieren un Integral Diario de Luz (DLI) de 16 horas, condición que en ambientes controlados se alcanza mediante sistemas de iluminación artificial con tecnología LED. Esta solución tecnológica presenta ventajas operativas y técnicas demostradas.

La eficiencia energética de los sistemas LED reduce sustancialmente el consumo eléctrico y los costos operativos asociados, mientras que su mayor durabilidad en comparación con sistemas convencionales disminuye tanto la frecuencia de reemplazo como el impacto ambiental subyacente. Adicionalmente, la capacidad de modular el espectro lumínico permite optimizar las longitudes de onda emitidas, privilegiando los rangos azules (450-495 nm) y rojo (620-750 nm), que han demostrado mayor eficiencia fotosintética y promotora del crecimiento vegetal (Dannehl *et al.*, 2021; Dou y Niu, 2020).

Cada ensayo bioindicador incorpora controles positivos (material infectado de referencia) y negativos (injertos certificados como sanos), mantenidos en idénticas condiciones ambientales. Este diseño experimental permite diferenciar con precisión entre síntomas patogénicos y posibles respuestas fisiológicas a factores abióticos. La determinación del DLI óptimo para cada material vegetal posibilita el ajuste fino de los regímenes lumínicos, evitando tanto el estrés por exceso como por deficiencia de luz, lo que se traduce en mayor vigor vegetal y mejor desempeño productivo de los indicadores biológicos.

Protocolos de diagnóstico molecular y gestión de material vegetal

El sistema de certificación implementa un esquema integral de diagnóstico que complementa la indexación biológica con técnicas avanzadas de laboratorio para la detección precisa de patógenos. Esta batería de pruebas incluye metodologías validadas internacionalmente: ELISA (*“Enzyme-Linked Immunosorbent Assay”*), SDS-PAGE (Electroforesis en gel de poliacrilamida con dodecilsulfato de sodio), la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR) y el cultivo en medios nutritivos para el aislamiento e identificación fenotípica de patógenos fúngicos y bacterianos

El Cuadro 14 presenta un compendio de las Enfermedades Transmisibles por Injerto (ETI) de mayor relevancia para la citricultura nacional, junto con los recursos diagnósticos disponibles en los laboratorios de biología molecular del Servicio Fitosanitario del Estado y Centro de Investigaciones en Biología Celular y Molecular de la Universidad de Costa Rica (CIBM-UCR), capacidades que reforzadas permitirían el establecimiento de un protocolo de tamizaje alineado con los estándares internacionales para la certificación de material propagativo de cítricos. Este enfoque multi-método garantiza la detección confiable de patógenos.

Cuadro 14. Enfermedades transmisibles por injerto en cítricos, método de detección y disponibilidad de prueba a nivel nacional.

Enfermedad	Patógeno	Tipo de patógeno	Método de detección	Planta indicadora	LDP-SFE	CIBCM-UCR
Clorosis variegada de los cítricos	<i>Xylella fastidiosa</i>	Bacteria	PCR/ELISA	-	PCR y ELISA <i>X. fastidiosa</i> general	CVC
HLB	<i>Candidatus Liberibacter</i> sp.	Bacteria	PCR, planta indicadora	Naranja dulce	PCR Ca. <i>Liberibacter asiaticus</i>	HLB
Stubborn	<i>Spiroplasma citri</i>	Bacteria	Cultivo, planta indicadora	Naranja dulce o mandarina	x	Podrían pero no se está haciendo
Escoba de bruja	<i>Candidatus Phytoplasma aurantifolia</i>	Fitoplasma	PCR, planta indicadora	Lima mexicana	PCR Ca. <i>Phytoplasma</i> spp. (universal)	Fitoplasma general
Infección variegada, hoja rugosa	<i>Citrus variegation ilarivirus</i> , <i>Citrus leaf rugose ilarivirus</i> ,	Virus	Planta indicadora	Naranja Agrio, Citron Etrog	x	x
Hoja moteado difuminado	<i>Citrus leaf blotch virus (CLBV)</i> cc <i>Dweet mottle</i>	Virus	Planta indicadora	Dweet Tangor	x	x
Psorosis A y B	<i>Citrus psorosis ophiiovirus (CPSV)</i>	Virus	Planta indicadora	Naranja dulce y Dweet tanqor. ELISA	*	Psorosis
Leprosis	<i>Citrus leprosis rhabdovirus</i>	Virus	Planta indicadora, PCR	Naranja dulce, PCR	CILV-C (CILV-N*)	Leprosis
Satsuma enana	<i>Satsuma dwarf virus (SDV)</i> group	Virus	Planta indicadora, ELISA	Mandarina Satsuma, Dweet tangor, Sesamo blanco (<i>Sesamum indicum</i>). ELISA	x	x
Decaimiento del citrange	<i>Apple stem grooving capillovirus (ASGV)</i> cc <i>Citrus tatter leaf virus (CTLV)</i>	Virus	Planta indicadora	Rusk citrange, Citrus excelsa	x	x
Tristeza	<i>Citrus tristeza closterovirus (CTV)</i>	Virus	Lima mexicana, Elisa Inmunoimpresión, DTBI	Lima mexicana	ELISA o Inmunostrip, *	CTV
Mosaico amarillo	<i>Citrus yellow mosaic badnavirus</i>	Virus	Planta indicadora, ELISA	Naranja dulce, pomelo, ELISA	x	x
Varias anomalías relacionadas a viroides	CEVd, HSVd, variantes HSVd, CVd-Ia, CVd-IIIb (incluido cachexia y exocortis y variantes)	Viroide	Planta indicadora, sPage	Citron Etrog Arizona 861-S1/RL	CEVd, CVdII	CEVd, CVdII, viroides general
Australian dieback	Probable fitoplasma	Fitoplasma	Planta indicadora	Grapefruit, Naranja Dulce	x	x
Gomosis concava	Desconocido	-	Planta indicadora	Naranja dulce y Dweet tanqor	x	x
Enanismo clorótico	Desconocido	-	Planta indicadora	Naranja agrio y Dweet tangor	x	x
Protuberancias nerviales	Desconocido	-	Planta indicadora	Lima Mexicana y Dweet tanqor	x	x
Impietratura	Desconocido (probable <i>Coguvirus eburni</i>)	Virus	Planta indicadora	Naranja dulce y Dweet tangor	x	x

Nota: no disponible (x), no se realiza, pero puede implementarse contra pedido (*).

Protocolo de manipulación de material vegetal certificado

El material vegetal que supere satisfactoriamente la fase inicial de diagnóstico seguirá dos vías de procesamiento diferenciadas, según los requerimientos del sistema:

- Incorporación prioritaria (para casos de urgencia fitosanitaria nacional):

- Destinado a los Bancos de Multiplicación, Germoplasma y Fundación previo diagnóstico negativo para ETI.
- Implementado bajo protocolos de bioseguridad reforzados.
- Permite agilizar la disponibilidad de material sano certificado.
- Proceso de certificación estándar:
 - Indexación completa según protocolos internacionales.
 - Aplicación de terapias de saneamiento vegetal cuando sea requerido.
 - Re-evaluación mediante indexación confirmatoria.
 - Verificación final de cumplimiento de normativas de certificación.

Esta estrategia dual ofrece ventajas operativas significativas:

- Flexibilidad para responder a emergencias fitosanitarias.
- Mantenimiento de los más altos estándares de calidad.
- Optimización de recursos materiales y temporales.
- Garantía de trazabilidad en todo el proceso.

El modelo permite equilibrar la urgencia productiva con los requisitos técnicos exigidos para la certificación de material vegetal, asegurando tanto la rápida disponibilidad como la máxima confiabilidad fitosanitaria del material propagativo.

Protocolos de saneamiento vegetal: técnicas para la eliminación de patógenos

Una vez preservado y evaluado el material vegetal, se implementan procesos avanzados de limpieza tisular, destacando entre ellos:

Cultivo de meristemos apicales

Esta técnica biotecnológica representa un método eficaz para la recuperación de material vegetal infectado, fundamentado en las siguientes propiedades fisiológicas:

- Las células del domo apical mantienen un estado de indiferenciación celular temprana.
- Presentan mayor estabilidad genética comparada con otros tejidos indiferenciados.
- Ofrecen mejores condiciones para manipulación *in vitro* (Méndez Chávez, 2014).

El procedimiento aprovecha la totipotencia celular vegetal junto con dos fenómenos fisiológicos clave:

- Diferenciación asincrónica: la velocidad de división celular meristemática supera la tasa de replicación viral da como resultado gradientes decrecientes de concentración patogénica hacia el ápice.
- Barrera de diferenciación: los procesos de especialización celular actúan como filtro biológico limitando el movimiento sistémico de patógenos hacia los meristemas.

La efectividad de la técnica presenta una relación directamente proporcional entre:

- Tamaño del explante: óptimo: <0.15 mm (mayor probabilidad de eliminación viral) aunque por su tamaño se ve reducida su capacidad regenerativa.
- La capacidad de regeneración aumenta con el tamaño del meristemo, al tiempo que disminuye la probabilidad de obtener plantas libres de patógenos.

Esta relación crítica se ilustra en la Figura 11, demostrando el balance necesario entre tamaño del explante y potencial regenerativo para optimizar los resultados del saneamiento vegetal.

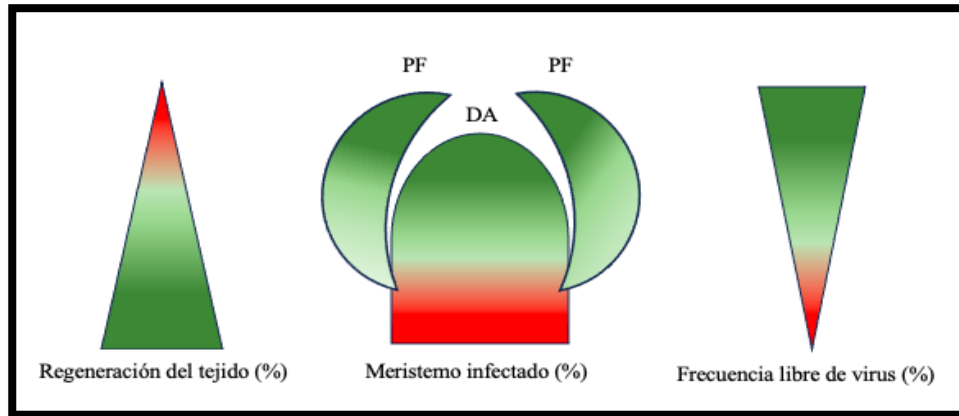


Figura 11. Relación entre el tamaño del meristemo, su capacidad de regeneración y presencia de patógeno. Wang *et al.* (2018).

En la figura anterior se distingue: domo apical AD, primordio floral PF. Este análisis gráfico demuestra la compensación necesaria entre ambos parámetros para optimizar los protocolos de saneamiento vegetal. Los meristemos de menor tamaño (<0.15 mm) muestran la mayor probabilidad de estar libres de patógenos, pero presentan limitaciones en su capacidad regenerativa, mientras que explantes más grandes favorecen la proliferación celular, pero con mayor riesgo de conservar infecciones virales.

Esta técnica puede ser utilizado sola, o en combinación con otras técnicas de saneamiento como quimioterapia, termoterapia, o crioterapia.

Quimioterapia

La quimioterapia en cultivo de tejidos es el empleo de productos antibióticos para eliminar patógenos, principalmente bacterias y virus. La eficacia de los tratamientos varía entre diferentes protocolos, ingredientes activos y especies (Abdelnour Esquivel *et al.*, 2006; Madariaga *et al.*, 2020).

Termoterapia

La técnica consiste en someter los tejidos vivos a temperaturas suficientemente elevadas para que inactiven los virus sin ocasionar daño a los tejidos vegetales (ver Figura 12).

La termoterapia es efectiva contra la mayoría de los virus, pero no contra los viroides, respecto al virus "*citrus tatter leaf*" ha mostrado resultados variables. Los viroides son eliminados por medio de la microinjertación, técnica que utiliza patrones cultivados *in vitro* (por lo general *Citrus jambhiri*) proveniente de tejidos nucelares microinjertados con meristemas apicales suficientemente pequeños (menor a 0,15 mm) como para garantizar de que el tejido no haya sido infectado por patógenos (Wang *et al.*, 2018).

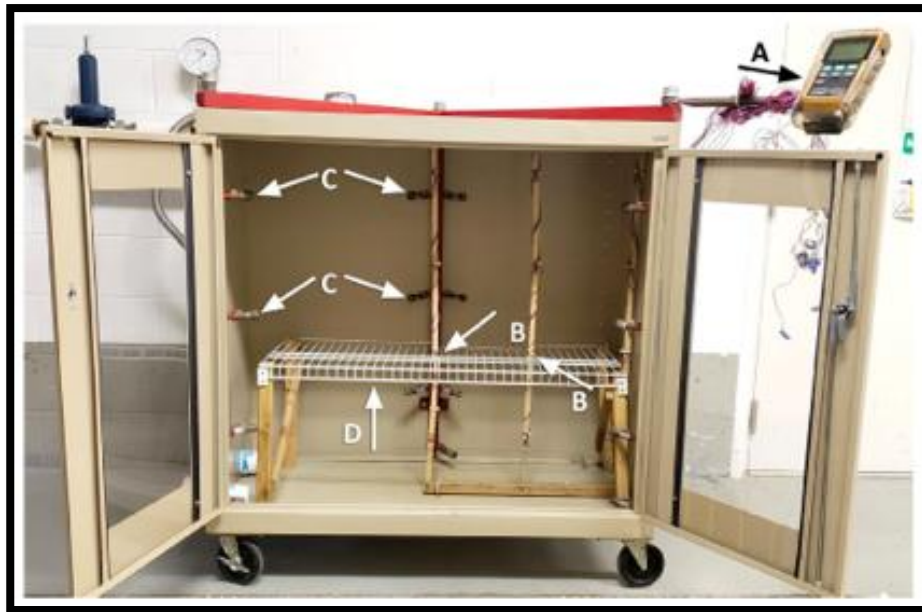


Figura 12. Cámara de vapor utilizada para el tratamiento de varetas. Thapa *et al.* (2021).

Las partes de la cámara de vapor se puede identificar de la siguiente forma: A) “*datalogger*” control del tiempo y temperatura en la cámara de vapor. B) sensores C) válvulas para introducir el vapor a la cámara. D) estantes para colocar las varetas.

Crioterapia

Esta técnica criogénica logra eliminar, virus, bacterias y fitoplasmas de tejido vegetal al someter el material a ultra baja temperatura en nitrógeno líquido (-196 °C). Esta metodología facilita la manipulación de una gran cantidad de muestras con la posibilidad de reducir el tiempo de exposición al tratamiento con un mayor tamaño del explante con respecto a la termoterapia (Cunha, 2021; Méndez, 2014; Wang y Valkonen, 2009).

Protocolo de microinjertación para producción de material vegetal certificado

El proceso de microinjertación, basado en Rolón *et al.*, (2023). representa una técnica avanzada de propagación vegetativa que permite la obtención de plantas libres de patógenos mediante la unión aséptica de meristemas apicales con portainjertos

cultivados in vitro. Este procedimiento se realiza bajo condiciones estrictamente controladas en laboratorio, siguiendo protocolos estandarizados

Preparación de material vegetal

- Desarrollo de portainjertos:
 - Siembra de semillas (ej. *Citrus jambhiri*) en medio de cultivo específico.
 - Incubación en oscuridad a 27°C para inducir germinación controlada, etiolación de plántulas y alargamiento hipocotilar.

- Obtención de meristemas donantes:
 - Selección de ramas juveniles (1-1.5 cm) de variedades objetivo.
 - Acondicionamiento en "fitotrón" (32°C, fotoperiodo 16/8 h).
 - Desinfección superficial mediante protocolos estandarizados.

Procedimiento quirúrgico de microinjertación

- Preparación del portainjerto:
 - Colocación en cámara de flujo laminar.
 - Escisión de cotiledones.
 - Seccionamiento del tallo (1.5-2 cm del cuello radical).
 - Ajuste del sistema radical (4-5 cm de longitud).

- Injerto propiamente dicho:
 - Realización de incisión en "T" invertida bajo magnificación.
 - Disección del meristemo donante (0.1-0.2 mm).
 - Inserción precisa en zona cambial del portainjerto.
 - Sellado con tejido cortical original.

Entre las ventajas técnicas del método se puede mencionar la eficiencia biológica con una tasa de éxito superior al 85%, la preservación de características genéticas y la eliminación de patógenos sistémicos. Por otra parte, la seguridad fitosanitaria se logra al

evitar el contacto con tejido vascular infectado, minimización de riesgos de transmisión patogénica y la garantía de trazabilidad del material.

Este protocolo establece un estándar de calidad para la producción de material vegetal certificado en programas de mejoramiento genético y propagación comercial.

Cultivo *in vitro*

Las plantas microinjertadas se cultivan en cámaras de cultivo bajo condiciones controladas de luz, temperatura y humedad que, al alcanzar una altura de 2 cm, se transfieren a cámaras húmedas para su aclimatación gradual a las condiciones *ex vitro* (ver Figura 13). Las plantas una vez aclimatadas se trasplantan a macetas en un ambiente protegido (invernadero) para su desarrollo final.

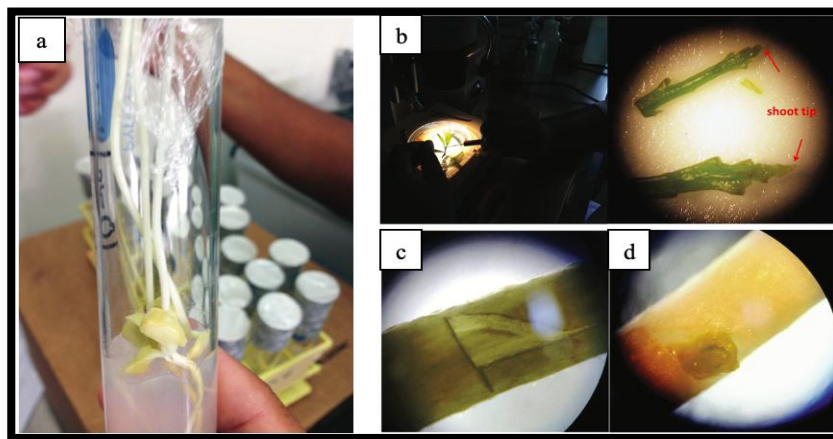


Figura 13. Microinjertación de cítricos para limpieza de patógenos sistémicos. Kesinger (2013).

En la imagen anterior se anota: a: planta *in vitro* de cítricos. b: disección de meristemo apical. c: corte para microinjerto. d: microinjerto.

Complementariedad de las técnicas de saneamiento vegetal

Las diferentes técnicas de saneamiento vegetal (termoterapia, cultivo de meristemos, quimioterapia, microinjertación) no son excluyentes entre sí, sino complementarias. Cada

técnica tiene ventajas y limitaciones, por lo que su combinación permite maximizar la eficacia del saneamiento y abordar un amplio espectro de patógenos (Singh *et al.*, 2018).

- Termoterapia: es un método rápido y efectivo contra la mayoría de los virus, pero no contra viroides. El material vegetal saneado por termoterapia puede utilizarse directamente en injertos tradicionales.
- Cultivo de meristemos y microinjertación: son efectivas contra virus y viroides, pero requieren mayor tiempo y presentan riesgos de contaminación e incompatibilidad entre patrón e injerto (Singh *et al.*, 2018).

La elección de la técnica o combinación de técnicas de saneamiento dependerá del tipo de patógeno, la especie vegetal y los recursos disponibles.

Procedimiento post-saneamiento

El tejido obtenido de cada procedimiento es sometido nuevamente a indexación y diagnóstico, hasta asegurar que las pruebas resulten negativas. Superada esta fase el material se introduce al Banco de Germoplasma y/o Fundación para su desarrollo.

Limpiar material contaminado dependiendo de la carga de patógenos, la eficacia en los procesos de saneamiento y la tasa de crecimiento vegetativo, podría tomar entre 24 y 36 meses (UCR, 2007).

Validación de campo

La validación en campo es una etapa esencial para confirmar la identidad genética y la sanidad del material vegetal obtenido *in vitro*. Estas plantas se siembran a campo abierto para evaluar:

1. Características fenotípicas: se observan y registran caracteres morfológicos (hábito de crecimiento, forma de hojas y frutos, etc.) para confirmar la identidad varietal.

2. Sanidad: se realizan inspecciones periódicas para detectar posibles síntomas de enfermedades.
3. Productividad: se evalúa el rendimiento y la calidad de los frutos.

Nivel 2. Banco de Germoplasma y Banco de Fundación: conservación e incremento inicial de material vegetal

El Nivel 2 del SPS cumple una función estratégica en la preservación y multiplicación inicial del material vegetal certificado proveniente del Nivel 1. Esta etapa se estructura en dos componentes principales:

Bancos de conservación:

- Banco de Germoplasma: para resguardo de diversidad genética.
- Banco de Fundación: para propagación primaria controlada de tejidos comerciales.

Unidades de apoyo especializadas:

- Banco de Producción de Semilla Sexual.
- Banco de Germinación y Desarrollo de Propágulos.

Protocolos de bioseguridad en el Nivel 2

La infraestructura debería contar con sistema de ingreso de doble puerta, antesala, cortinas anti-insectos, pediluvios, trampas contra insectos, ventanas cenitales mecanizadas, hermeticidad total, herramientas y equipo de uso exclusivo, plásticos con aditivos anti-insectos, aceras perimetrales, programa de control de plagas, acceso restringido, entre otros.

Selección y manejo de patrones

Los patrones por utilizar en los bancos del Nivel 2 suelen ser “Swingle” y “Flying Dragon” para no depender solamente de una línea genética a fin de mitigar riesgos fitosanitarios.

Para el abastecimiento de material inicial se requiere la importación de semillas certificadas, con el objetivo de desarrollar un banco de producción de semillas propio del sistema que permita su autoabastecimiento a seis u ocho años plazo, alternativamente, en caso de escases de semilla sexual a nivel local o internacional, es factible la propagación vegetativa (microestacas) de plantas madre certificadas, de las unidades de Germoplasma y Fundación del SPS.

Producción de varetas certificadas

El sistema de producción para los Bancos de Germoplasma y Fundación se rige por parámetros técnicos precisos. El ciclo productivo alcanza su declive entre el sexto o séptimo año de producción por lo que deben ser reemplazados por nuevas unidades. Los rendimientos esperados de varetas por “planta madre” es el siguiente:

- Año 2: 6 varetas/maceta/trimestre.
- Año 3+: 12 varetas/maceta/trimestre.

Impacto estratégico

La operación del Nivel 2 genera beneficios sustanciales como la autosuficiencia del SPS y la capacidad de escalamiento progresivo.

Esto permite el fortalecimiento sectorial referente a la provisión a viveros y productores autorizados, reducción de importaciones a partir del tercer año y la conservación de la perpetuidad de recursos genéticos.

Banco de Producción de Semilla Sexual Certificada

El Banco de Producción de Semilla Sexual constituye una instalación estratégica diseñada para el cultivo de árboles semilleros bajo condiciones de protección controlada (invernadero especializado). Su función principal es garantizar el suministro de semilla botánica certificada para:

- Abastecimiento continuo a los Bloques de Germinación y Desarrollo de Propágulos.
- Investigación y desarrollo de nuevos patrones.
- Operaciones productivas del sector citrícola nacional.

Aunque el agente causal del Huanglongbing (*Candidatus Liberibacter asiaticus*) no presenta transmisión seminal, la infección en árboles madre genera:

- Alteraciones metabólicas significativas.
- Mayor susceptibilidad a plagas secundarias.
- Reducción del ciclo productivo.
- Disminución en calidad y cantidad de semilla.

Estas consideraciones justifican la necesidad crítica de mantener un núcleo de árboles productores en condiciones de protección máxima (ver Figura 15).

Entre las ventajas estratégicas de producción local de semillas en el SPS podemos mencionar:

- Calidad fitosanitaria garantizada:
 - Patrones con mayor vigor y resistencia.
 - Material libre de enfermedades sistémicas.
- Adaptabilidad agronómica:
 - Selección de genotipos para condiciones específicas.
 - Desarrollo de patrones resistentes a estrés abiótico.
- Soberanía fitogenética:
 - Reducción de dependencia de importaciones.
 - Mitigación de riesgos comerciales externos.

Las características operativas que debe poseer esta unidad se resumen en los siguientes puntos:

- Protección física. Invernadero hermético con:
 - Malla anti-áfido (50 mesh) en paredes.
 - Cubierta plástica UV en techos.
 - Sistemas de doble acceso.
- Manejo integrado:
 - Control biológico de plagas.
 - Fertirriego de precisión.
 - Programa de podas especializadas: formación, saneamiento y producción.
- Diseño optimizado:
 - Capacidad: 44 árboles madre.
 - Distribución: marco real de siembra 5 × 5 m. directa a suelo.
 - Área total: 1,440 m².

Esta unidad representa un componente esencial para la sostenibilidad a largo plazo del sistema de certificación, asegurando la disponibilidad de material genético de calidad para el desarrollo de patrones en viveros.



Figura 14. Ejemplo de un banco productor de semillas. Kesinger (2013).

Banco de Germinación y Desarrollo de Propágulos

El sistema cuenta con una unidad especializada de 194 m² bajo condiciones de invernadero tecnificado, diseñada para la propagación controlada de material vegetal mediante técnicas sexuales y asexuales. Esta instalación permite:

- Control preciso de parámetros ambientales (temperatura: 25-28°C, humedad relativa: 70-80%, intensidad lumínica: 400-600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$).
- Mantenimiento de barreras fitosanitarias estrictas.
- Optimización de los procesos de germinación y desarrollo vegetativo.

Procedimientos de abastecimiento de material genético a desarrollar en esta unidad.

El material para desarrollar en el Banco de Germinación y Desarrollo de Propágulos pueden provenir de fuentes primarias certificadas, por ejemplo, de programas internacionales acreditados (ej. “*Citrus Clonal Protection Program, California*”), seleccionando material de acuerdo con la solidez de trazabilidad desde su origen dando como prioridad variedades y patrones según el Cuadro 15 de selección varietal.

Otras formas de propágulos la conforman aquellas creadas por técnica de esquejado (ver Figura 15) que requiere una adecuada selección de material vegetal (juvenil), el uso de reguladores de crecimiento (AIB 2000-4000 ppm) en condiciones controladas de enraizamiento (sustrato estéril, humedad controlada).

La biotecnología aplicada permite el cultivo de embriones nucelares especialmente para variedades poliembriónicas que permiten la conservación de la identidad genética y una eficiencia multiplicativa aumentada. En cuanto al cultivo de tejidos, es una solución propagativa para materiales recalcitrantes, aunque requiere de protocolos específicos por variedad. Todo lo anterior puede combinarse con técnicas de crio-preservación en caso de requerir el almacenaje para usos futuros.

Control de calidad y trazabilidad

El control de calidad en esta unidad se logra implementando:

- Sistema de registro individualizado por lote.
- Monitoreo fitosanitario continuo.
- Evaluación de parámetros morfo-fisiológicos.
- Certificación final mediante análisis moleculares.

Esta unidad representa una unidad de servicio para los Bloques de Germoplasma, Fundación y Multiplicación. Mediante la integración de tecnologías convencionales con biotecnologías modernas garantiza el suministro de material propagativo ya desarrollado, específicamente patrones, para las diversas unidades del SPS.

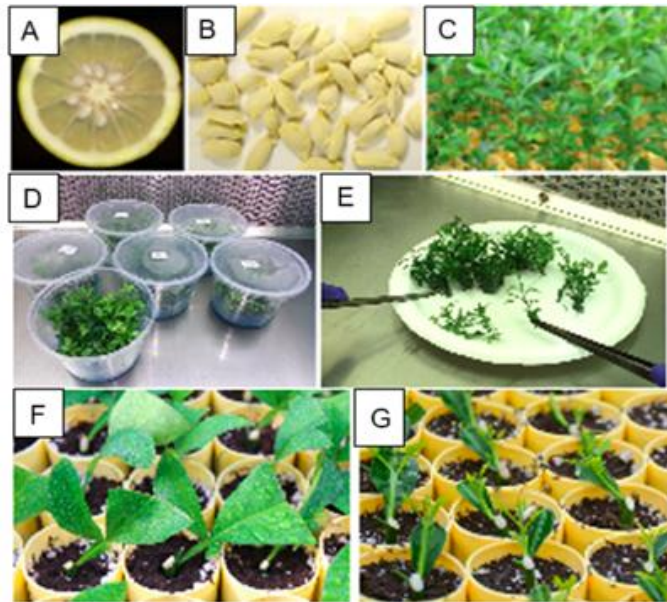


Figura 15. Multiplicación de patrones por medio de cultivo de tejidos. Albrecht *et al.*, (2021).

En la figura anterior se anota lo siguiente: A: corte de fruta para extracción de semilla. B: semilla botánica seca para germinación. C: patrones jóvenes desarrollados a partir de semillas. D: cultivo *in vitro* de embriones nucleares. E: separación de plántulas nucleares para desarrollo individual. F: enraizamiento de esquejes (clones). G: brotación de esquejes.

Cuadro 15. Patrones de cítricos de interés para el SPS.

No.	Especie	Cultivar	Número Germoplasma	Explante	Motivo
1	<i>Poncirus trifoliata</i> var. <i>monstrosa</i>	Flying Dragon (FD)	PI 539768	Semilla	En uso
2	<i>XCitroncirus</i> sp.	Swingle	PI 539828	Semilla	En uso
3	<i>XCitroncirus webberri</i>	Benton	PI 539819	Semilla	Bancos yemas
4	<i>Citrus paradisi</i>	Grapefruit	PI 539475	Semilla	Injerto intermedio
5	<i>Citrus reticulata</i> cv Sunki Mandarin x <i>Poncirus trifoliata</i> cv FD	US-942		Microestaca	Tolerancia HLB
6	<i>Citrus reticulata</i> cv Cleopatra x <i>Poncirus trifoliata</i> cv FD <i>Citrus grandis</i> cv Buntan	X639	PI 300256	Microestaca	Suelo calcáreo, tolerante a gomosis
7	pommelo x <i>Citrus reticulata</i> cv Cleopatra	US SS1		Microestaca	Tolerancia HLB
8	<i>Citrus limon</i>	Volkameriana	PI 539335	Semilla	Vigoroso, en uso
9	<i>Citrus medica</i>	S-1 Citron	PI 539441	Semilla	Indexación
10	<i>Citrus excelsa</i>	Limón real	PI 539192	Vareta	Indexación
12	<i>Citrus reshni</i>	Cleopatra	PI 539492	Semilla	Estándar mandarinas
13	<i>Citrus aurantifolia</i>	Mexican Lime*	PI 539151	Microestaca	Indexación
14	<i>Citrus sinensis</i>	Rhode Red Valencia*	PI 539666	Microestaca	Indexación
15	<i>Citrus aurantium</i>	Sour Orange	PI 539176	Semilla	Indexación
16	<i>Citrus reticulata</i>	Dweet tangor*	PI 539240	Microestaca	Indexación
17	<i>X Citroncirus</i> spp.	Rusk citrange	PI 539809	Microestaca	Microinjertación
18	<i>Citrus celebica</i>	Macrophylla	PI 539182	Semilla	Microinjertación

Manejo de Sustratos Inertes en el Sistema de Producción de Plantas Sanas (SPS)

El SPS emplea sustratos inertes de alta pureza que cumplen con los siguientes criterios:

- Composición controlada (fibra de coco, turba, vermiculita, perlita).
- Procesamiento especializado para eliminación de patógenos.
- Validación en el Laboratorio de Sustratos de la Estación Fabio Baudrit.
- Uniformidad física y química garantizada.

Estos materiales ofrecen ventajas críticas:

- Minimización de riesgos fitosanitarios (hongos, bacterias, nematodos).
- Reproducibilidad de condiciones de crecimiento.
- Optimización del desarrollo radicular.

El manejo nutricional en sustratos inertes requiere precisión técnica debido a su baja capacidad “buffer”. Se implementan los siguientes controles:

Monitoreo continuo de parámetros críticos en la solución nutritiva:

- pH (rango óptimo: 5.5-6.5).
- Conductividad Eléctrica (CE: 1.0-2.5 dS/m).
- Frecuencia de medición: 3 veces/semana.
- Sistema de corrección automática.

Estrategia de fertirrigación:

- Sistema: riego localizado por goteo.
- Frecuencia: múltiples eventos diarios (8-12).
- Volumen: basado en demanda evapotranspirativa.
- Control: sistemas automatizados con sensores de humedad.

En viveros generalmente se utiliza fertilizantes granulados de liberación controlada y/o solubles en agua (fertirrigación ver Cuadro 16). Normalmente una solución nutritiva que contenga la concentración (en mg L⁻¹) de N (200), P (18), K (152), Ca (140), Mg (29) y S (21) se considera balanceada para el cultivo de plantas de cítricos en sustrato con fertirriego (Bataglia *et al.*, 2008).

Cuadro 16. Parámetros de referencia para manejo nutricional en sustratos inertes, Bataglia *et al.* (2008).

Nutriente	Portainjerto trasplantado 'Rangpur', 'Cleopatra' y 'Sunki'	Swingle'	Árboles injertados 'Pera' en 'Sunki' y 'Valencia' en 'Swingle'	
			Fin del primer brote de crecimiento	Antes de la última poda
			%	
N	2.5-3.5	3.0-4.0	3.5-4.0	3.0-4.0
P	0.20-0.25	0.22-0.28	0.22-0.28	0.20-0.24
K	1.5-2.0	1.6-2.2	2.2-2.6	2.1-2.8
Ca	2.0-3.0	2.5-3.5	1.6-2.3	2-2.7
Mg	0.27-0.38	0.35-0.45	0.28-0.41	0.23-0.35
S	0.25-0.35	0.30-0.45	0.25-0.35	0.29-0.37
			mg/kg	
B	50-120	90-150	55-110	90-170
Cu	5-30	5-30	5-30	10-30
Fe	100-200	100-200	100-200	120-250
Mn	50-200	100-250	40-200	70-180
Zn	20-70	25-70	25-55	40-90

Nota técnica sobre el manejo volumétrico de sustratos

Los valores de referencia presentados en el Cuadro 17 corresponden exclusivamente al volumen de sustrato en estado seco. Es fundamental considerar que el comportamiento físico de los sustratos hace que experimenten una reducción volumétrica significativa durante el proceso de hidratación, esto debido a la compactación que varía según la composición del material, tamaño de partículas y el grado de humectación.

El rango típico del factor de compactación para mezclas estándar (perlita-turba) está entre 1.1-1.3, con la implicación práctica de generar una reducción volumétrica del 10-30% al humedecerse y, por tanto, la necesidad de ajustar los cálculos de requerimientos.

Cuadro 17. Tipos de contenedores y volumen de sustrato mínimos requeridos.

Unidad	Tipo de contenedor	Cantidad mínima	Volumen (L)
B germinación y desarrollo de propágulos	Tubete de 0,15 L	14400	2160
B. Germoplasma	Air pot 38 L	104	3952
B. Fundación	Air pot 38 L	208	7904
B. Multiplicación	Pot 2.8 L	10880	30464
Total			44480

Recomendaciones operativas:

Realizar pruebas de compactación específicas para cada lote de sustrato. Considerar el factor de compactación para el cálculo de necesidades de material, el diseño de sistemas de cultivo, la preparación de mezclas y documentar los coeficientes reales obtenidos para cada tipo de sustrato utilizado.

Este aspecto técnico es crítico para garantizar la precisión en la planificación de recursos y el correcto establecimiento de los sistemas de producción en el SPS.

Banco de Germoplasma: conservando la diversidad genética de cítricos

El Sistema de Producción de Plantas Sanas (SPS) integra un Banco de Germoplasma *in situ* como componente estratégico para la preservación de la diversidad genética de cítricos (fin ilustrativo Figura 17). Esta unidad consta de:

- Infraestructura especializada: invernadero de 524 m² hermético.
- Capacidad instalada: 104 plantas (52 variedades × 2 individuos por variedad).
- Sistema de cultivo: macetas "air-pot" de 38 litros (ver Figura 16). Su diseño favorece la aireación radical, la poda natural de raíces y la disposición en tresbolillo de las macetas optimizan el uso espacial.
- Identificación: cada accesión se identificará con un código alfanumérico único para asegurar la trazabilidad y gestión de la colección.

- Fertirriego: se implementará un sistema de fertirriego localizado para proporcionar a cada planta los nutrientes necesarios en la cantidad y frecuencia adecuadas.



Figura 16. Contenedor "air-pot" de 38 litros para cultivo de plantas madre. (Proptek: <https://www.proptek.com/product/008pifnd/>).

El Banco de Germoplasma cumple una funcionalidad estratégica, la conservación genética de variedades locales e introducidas y el resguardo de materiales con características agronómicas destacables como resistencia a patógenos, calidad organoléptica superior, adaptación climática específica.

Asimismo, juega un rol en procesos de investigación y desarrollo en cítricos al fungir como fuente primaria para programas de mejoramiento genético, por ejemplo, en:

- Evaluación de patrones y combinaciones varietales.
- Estudios fisiológicos y agronómicos.

El material propagativo producido en su unidad rinde de suministro prioritario al Bloque de Fundación y en menor medida para provisionar el Bloque de Multiplicación.



Figura 17. Ejemplo de siembra en maceta para un Banco de Germoplasma. Kesinger (2013).

Por su parte los protocolos operativos pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Selección y propagación.
 - Material vegetal certificado proveniente del Nivel 1.
 - Injertación sobre patrones certificados ('Swingle' o 'Flying Dragon').
 - Registro individualizado por accesión.
- Manejo agronómico.
 - Sistema de fertirriego localizado automatizado.
 - Programa integrado de nutrición.
 - Poda fitosanitaria y de formación.
- Monitoreo fitosanitario.
 - Pruebas periódicas según protocolo del Nivel 1.
 - Muestreo fitosanitario sistemático (Cuadro 41).
 - Inspecciones visuales programadas.
- Sistema de trazabilidad y bioseguridad:
 - Identificación y registro.
 - Código alfanumérico único por planta.

- Sistema de códigos QR/barras vinculado a base de datos.
- Bitácora electrónica que documenta:
 - Características morfológicas y agronómicas.
 - Historial de manejo (poda, fertilización, tratamientos).
 - Resultados de diagnóstico fitosanitario.
 - Movimientos de material vegetal.
- Control de acceso y bioseguridad.
 - Restricción a personal autorizado.
 - Protocolos de desinfección (ropa, herramientas, calzado).
 - Sistema de videovigilancia continua.
 - Barreras físicas contra vectores.
- Gestión de la información
 - Mapas digitales de ubicación actualizables.
 - Registro histórico permanente de ubicación e identificación (sin reemplazo de números de identificación).
 - Auditorías periódicas por entidades certificadoras.
 - Requisito de supervisión estatal para movimientos de material dentro de la misma unidad. Ningún material puede ser cambiado de sitio sin autorización.

Crioconservación de germoplasma citrícola: protocolos y aplicaciones

La crioconservación es una técnica avanzada de preservación biológica que utiliza nitrógeno líquido (-196°C) para mantener tejidos vegetales en estado de suspensión metabólica. A esta temperatura:

- Se detienen completamente los procesos bioquímicos.
- Se conserva la integridad celular indefinidamente.
- Se elimina el riesgo de degeneración genética.

El protocolo técnico cuenta de varias fases (según González-Arno y Engelmann, 2013; García-Rojas y Abdelnour-Esquivel, 2013; Roca y Mroginski, 1991):

- Selección de material biológico.
 - Ápices meristemáticos (óptimos por su alta tasa de regeneración y baja carga fenólica).
 - Yemas axilares (requieren protocolos específicos de aclimatación).
 - Embriones somáticos (ideal para materiales propagados *in vitro*).
- Fase de pretratamiento.
 - Aclimatación progresiva a medio líquido.
 - Aplicación de crioprotectores (DMSO/glicerol en concentraciones controladas).
 - Deshidratación osmótica controlada.
- Proceso de vitrificación.
 - Enfriamiento programado (1°C/minuto hasta -40°C).
 - Inmersión final en nitrógeno líquido.
 - Uso de equipos de control térmico certificados.
- Almacenamiento criogénico.
 - Tanques de vapor de nitrógeno con monitoreo continuo.
 - Sistemas de seguridad redundantes.
 - Protocolos estrictos de manipulación.
- Recuperación de muestras.
 - Descongelación rápida (baño termorregulado a 38°C).
 - Reactivación en medios de cultivo especializados.
 - Evaluación de viabilidad post-criopreservación.
- Control de calidad.
 - Pruebas periódicas de viabilidad celular.
 - Análisis de estabilidad genómica (marcadores moleculares).
 - Registros de trazabilidad completa.

Las ventajas estratégicas de esta técnica se fundamentan en la:

- Conservación genética.
 - Preservación indefinida de líneas puras.
 - Protección contra deriva genética.
 - Resguardo de materiales elite.
- Seguridad fitogenética.
 - Protección contra contingencias bióticas/abióticas.
 - Reducción de riesgos epidemiológicos.
 - Sistema de “backup” para colecciones vivas.
- Eficiencia operativa.
 - Alta densidad de almacenamiento (ver Figura 18).
 - Minimización de costos de mantenimiento.
 - Facilidad de intercambio internacional.

Implementación de la crioconservación en el SPS.

La integración de esta tecnología en el SPS permitirá complementar la conservación *in vivo*, garantizar la disponibilidad de germoplasma estratégico y cumplir con estándares internacionales de preservación.



Figura 18. Termo para crioconservación en nitrógeno líquido. (Cryospain: <https://cryospain.com/es/liquidos-criogenicos-toda-la-informacion>).

Banco de Fundación de cítricos: unidad estratégica de pre-multiplicación

Por motivo de espacio, el Banco de Fundación se concibe como una unidad de conservación y reproducción de yemas de las variedades de mayor interés comercial. El objetivo principal es aumentar el número de estas plantas en específico, mientras que las variedades de interés genético se mantendrán únicamente en el banco de Germoplasma.

El Banco de Fundación constituye una unidad especializada dentro del Sistema de Producción de Plantas Sanas (SPS), diseñada para:

- Conservación intensiva de material élite.
- Multiplicación primaria de variedades comerciales prioritarias.
- Generación de stock base para el Banco de Multiplicación.

Las características técnicas de esta unidad se mencionan a continuación:

- Capacidad instalada:
 - 208 plantas en contenedores de 38 litros.
 - Distribuidas en dos módulos independientes de 524 m² cada uno.
 - Área total efectiva: 1,048 m².
- Diseño de seguridad:
 - Duplicación de infraestructura como medida de gestión de riesgo.
 - Mitigación de riesgos por eventos catastróficos.
 - Compartimentalización de accesiones.
- Sistemas especializados:
 - Fertirrigación automatizada por goteo.
 - Control ambiental parametrizado.

Por su parte el protocolo operativo estándar de este bloque se puede resumir en los siguientes puntos:

- Selección de material genético (ver Cuadro 18):

- Criterios basados en valor comercial.
- Procedencia exclusiva del Banco de Germoplasma.
- Priorización de variedades con demanda comprobada.
- Propagación certificada:
 - Injertación sobre patrones certificados: “Swingle” y “Flying Dragón”.
 - Validación fitosanitaria pre-establecimiento.
- Manejo agronómico:
 - Programa de nutrición balanceada.
 - Poda fitosanitaria programada.
 - Monitoreo integrado de plagas.
- Control de calidad:
 - Muestreo sistemático según protocolos Nivel 1
 - Pruebas de tamizaje periódicas (ver Cuadro 40).
 - Trazabilidad individual por planta.

Entre los beneficios estratégicos de este bloque se pueden puntualizar los siguientes:

1. Preservación genética: conservación dinámica de materiales comerciales, reducción de presión sobre el Banco de Germoplasma.
2. Producción certificada: generación de material propagativo para Unidad de Multiplicación, garantía de sanidad vegetal y uniformidad genética asegurada.
3. Seguridad operativa: duplicación en conservación de accesiones comerciales, minimización de riesgos fitosanitarios y continuidad productiva garantizada.

Este diseño operativo permite al SPS mantener un flujo constante de material vegetal certificado, cumpliendo con los más altos estándares internacionales en la producción de propágulos de cítricos, mientras optimiza el uso de recursos físicos y genéticos disponibles. En la Figura 19 se ilustra un Banco de Fundación y el proceso de cosecha de yemas.



Figura 19. Ejemplo de un Banco de Fundación establecido en maceta. Stan (2022).

Cuadro 18. Variedades (accesiones) y cantidades propuestas para el Banco de Fundación.

No.	Nombre científico	Cultivar ID	#ID Germoplasma	No. Macetas	Potencial cosecha a partir 3er año	Uso
Toronjas y Pomelos						
1	<i>Citrus paradisi</i>	Rio Red	PI 539485	1	288	Jugo, fruta
2	<i>Citrus maxima</i>	Kao Panne	PI 539400	1	288	Confitura
3	<i>Citrus maxima</i>	Red Aranyan	PI 539384	1	288	Injerto intermedio
Sub total				3	864	
Mandarinas						
4	<i>Citrus reticulata</i>	Honey	PI 539503	4	1440	Fruta
5	<i>Citrus reticulata</i>	Dancy	PI 539683	4	1440	Fruta
6	<i>Citrus unshiu</i>	Okitsu Wase	PI 436688	4	1440	Fruta
7	<i>Citrus unshiu</i>	Frost Owari	PI 539689	4	1440	Fruta
8	<i>Citrus clementina</i>	Clemenules	PI 654845	4	1440	Fruta
9	<i>Citrus clementina</i>	Fina Sodea	PI 539186	4	1440	Fruta
10	<i>Citrus reticulata</i>	Seedless Kishu	PI 539530	4	1440	Fruta
11	<i>Citrus reticulata</i>	Dweet tangor	PI 539240	1	288	Fruta
12	<i>Citrus reticulata</i>	Selma Satsuma	PI 654902	1	288	Fruta
13	<i>Citrus reticulata</i>	Temple X Dancy	PI 600653	2	1440	Fruta
Sub total				32	12096	
Limones y limas						
14	<i>Citrus latifolia</i>	Persian lime SPB-7	PI 658363	28	10080	Jugo, fruta
15	<i>Citrus aurantifolia</i>	Mexican lime	PI 539151	5	1440	Jugo, fruta
16	<i>Citrus limon</i>	Frost nucellar Eureka	PI 539318	2	576	Fruta
17	<i>Citrus limon</i>	Limoneira & A Lisbon	PI 539305	2	576	Fruta
18	<i>Citrus hystrix</i>	Kaffir lime	PI 539248	1	288	Esencias
Sub total				38	12960	
Naranjas						
19	<i>Citrus sinensis</i>	Rhode Red Valencia	PI 539696	75	23040	Jugo, fruta
20	<i>Citrus sinensis</i>	Olinda Nucellar	PI 539656	2	1440	Jugo, fruta
21	<i>Citrus sinensis</i>	Valencia Late	PI 654865	30	10080	Jugo, fruta
22	<i>Citrus sinensis</i>	Salustiana	PI 539632	2	1152	Jugo, fruta
23	<i>Citrus sinensis</i>	Frost Valencia	PI 539660	4	1152	Jugo, fruta
24	<i>Citrus sinensis</i>	Culler	PI 539659	1	288	Jugo, fruta
25	<i>Citrus sinensis</i>	Rohde	PI 654872	1	288	Jugo, fruta
26	<i>Citrus sinensis</i>	Cara Cara	PI 539580	2	576	Fruta
27	<i>Citrus sinensis</i>	Navelina	PI 600880	2	576	Fruta
28	<i>Citrus sinensis</i>	Lane Late	PI 362329	2	576	Fruta
29	<i>Citrus sinensis</i>	Rhode Navel	PI 654872	1	288	Fruta
Sub total				122	39456	
Kumquats						
30	<i>Fortunella crassifolia</i>	Nagami	PI 539729	1	288	Fruta, confitura
Híbridos						
31	<i>XCitrafortunella microcarpa</i>	Calamondin	PI 539349	1	288	Fruta
32	<i>Citrus reticulata</i>	Ortanique	PI 539243	4	1152	Fruta
33	<i>Citrus reticulata</i>	Ellendale	PI 539536	2	576	Fruta
34	<i>Citrus reticulata</i>	W. Murcott Alourer	PI 539533	2	1152	Fruta
35	<i>Citrus Xtangelo</i>	Orlando	PI 539711	1	288	Fruta
36	<i>Citrus Xtangelo</i>	Page	PI 539710	1	288	Fruta
37	<i>Citrus reticulata X C. paradisi</i>	Cocktail	PI 539219	1	288	Fruta
Sub total				12	4032	
TOTAL GENERAL				208	57600	

Nota Id del NCPN-CITRUS.

Nivel 3: unidad de Multiplicación masiva de yemas certificadas

El Banco de Multiplicación representa el componente productivo central del SPS, diseñado para la generación a escala comercial de material vegetal certificado. Esta unidad especializada de 332 m² opera bajo principios de:

- Alta densidad productiva controlada.
- Estandarización de procesos.
- Trazabilidad documentada.
- Bioseguridad (igual a la definida para el Nivel 2).

Los criterios para la configuración técnica se indican a continuación:

- Capacidad instalada:
 - 20 bancas de cultivo especializadas.
 - Capacidad total: 5,440 plantas.
 - Densidad: 34 contenedores/banca (8 celdas/contenedor).
- Sistema de cultivo: contenedores "*pot-in-frame*" ya que permiten la optimización espacial (0.25 m²/planta), el manejo ergonómico y la poda aérea natural de raíces.
- Bancas elevadas (1.15×4.5×0.7 m): facilitan el aislamiento del suelo, la maximización de la aireación radical y las labores culturales.
- Infraestructura complementaria: sistema de fertirrigación automatizada.

Entre los principios de producción en el Banco de Multiplicación de yemas podemos mencionar:

- Selección varietal: basada en análisis de demanda de mercado, dando prioridad a materiales con valor comercial comprobado.
- Sistema de propagación: injerto profesional siguiendo el principio "una planta - una vareta" exclusivamente con material certificado, siguiendo protocolos de trazabilidad por lote.

- Manejo agronómico que comprenda al menos un programa de nutrición balanceada, poda fitosanitaria sistemática, monitoreo integrado de plagas.
- Control de calidad: evaluaciones periódicas de parámetros morfológicos, vigor vegetativo, estado fitosanitario
- Renovación cíclica de lotes: las plantas de multiplicación se renuevan por completo cada 36 meses.

Estrategia de implementación acelerada.

Ante la emergencia por HLB, se establece un protocolo especial para la incorporación directa de material certificado importado mediante la validación fitosanitaria expedita de estos tejidos por medio de coordinación institucional. Durante el proceso de establecimiento del Banco de Multiplicación se procede a desarrollar paralelamente los Niveles 1 y 2.

Las ventajas competitivas de esta estrategia son: suministro continuo al sector de viveros, reducción de tiempos de espera, alta capacidad de respuesta a demandas específicas, economías de escala (costo/unidad reducida), homogeneidad genética garantizada y trazabilidad documentada.

Este modelo operativo permite al SPS posicionarse como proveedor líder de material propagativo de cítricos certificado, respondiendo tanto a las necesidades inmediatas del sector productivo como a los requerimientos de largo plazo para la sostenibilidad de la citricultura nacional. La Figura 20 ilustra el principio productivo un patrón, una yema, una vareta.



Figura 20. Ejemplo de un Banco de Multiplicación de yemas. (Growingproduce: <https://www.growingproduce.com/citrus/varieties-rootstocks/maintaining-a-healthy-commitment-to-citrus-starts-at-the-roots/>).

Protocolo de producción de yemas certificadas

Ciclo productivo estandarizado.

- Fase de desarrollo de portainjertos (Mes 0-7).
 - Cultivo de patrones certificados a partir de semilla sexual: 0 a 4 meses en tubete para luego ser transferido a un “*citro-pot*” para posterior desarrollo por 3 meses más.
 - Crecimiento controlado en condiciones óptimas.
 - Preparación para injertación (diámetro mínimo de tallo: 6-8 mm).
- Proceso de injertación (Mes 7).
 - Inserción de yemas certificadas mediante técnica de escudete.
 - Uso exclusivo de material proveniente de bancos de fundación.
 - Tasa de prendimiento objetivo: >95
- Desarrollo de varetas (Mes 7-12).
 - Crecimiento dirigido de brotes injertados.
 - Manejo nutricional específico para formación de tejido leñoso.

- Poda de formación para estimular yemas axilares.

Los puntos claves referentes a la capacidad productiva del Banco de Multiplicación se describen a continuación:

- Producción estimada de 5440 varetas (principio una planta-una vareta).
- Cada vareta madura (5 meses post-injerto) se caracteriza por presentar:
 - Longitud mínima: 25 cm.
 - Diámetro basal: 8-10 mm.
 - 6-8 yemas viables certificadas.
- Producción anual de yemas:
 - Cosecha inicial (Año 1): 32,640 yemas.
 - Producción sostenida (Año 2+): 130,560 yemas/año, 4 ciclos trimestrales de 32,640 yemas cada uno.

Para asegurar la continuidad en la producción de yemas, la gestión del parque productivo requiere la renovación de plantas multiplicadoras con una vida útil de 36 meses. El reemplazo total de lotes debe planificarse considerando el desarrollo anticipado de los materiales de sustitución en una estructura complementaria de igual capacidad productiva. Esta estructura debe iniciar operaciones 12 meses antes de la finalización de la vida útil de las plantas actuales (es decir, al mes 24 del proyecto). La operación simultánea de ambos bloques, con el desfase indicado, permitiría un aumento en la producción durante su fase productiva compartida.

Las plantas retiradas (a los 36 meses) conservan valor agronómico residual y pueden ser destinadas a la venta al público, donación a instituciones educativas o utilizadas para investigación. Este sistema garantiza un flujo continuo de material certificado, el mantenimiento de altos estándares de calidad y la sostenibilidad a largo plazo del programa de certificación. El cuadro 19 muestra el ciclo de producción de yemas certificadas.

Cuadro 19. Producción estimada de yemas y plantas por ser reemplazadas en el banco de Multiplicación.

Producto	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4*	Año 5	Año 6	Año 7*	Año 8	Año 9	Año 10*
Yemas	32640	130560	130560	130560	130560	130560	130560	130560	130560	130560
Árboles	0	0	5440	0	0	5440	0	0	5440	

Nota: Los años con (*) indican la introducción del lote de nuevas plantas multiplicadoras para el reemplazo de las que finalizaron su vida útil.

Como componente central del SPS, el Banco de Multiplicación requiere una operación altamente especializada que combine:

- Eficiencia productiva con estrictos protocolos de bioseguridad.
- Trazabilidad absoluta de todo material vegetal.
- Flexibilidad operativa para responder a demandas del sector.

Ante la carencia de material certificado nacional, se implementará un plan de importación expedito que contemple la importación de 1,088 varetas certificadas para suplir un requerimiento estimado de 6,528 yemas (considerando 20% de descarte por control de calidad).

Este material propagativo será destinado inmediatamente a la Unidad de Multiplicación para acortar los procesos productivos de yemas certificadas a nivel local.

Criterios de selección de material propagativo a importar:

- Variedades comerciales: valencia, lima persa, mandarina.
- Material élite: cultivares modernos con tolerancia superior a HLB, adaptación a nuestras condiciones climática y que gocen de calidad comercial superior.

Existen proveedores de orígenes autorizados por nuestras autoridades fitosanitarias, por mencionar, los programas de protección de cítricos que forman parte del “*National Clonal Germplasm Repository for Citrus y Dates*” del Departamento de Agricultura de los

Estados Unidos (USDA). La importación de material certificado de esta fuente podría realizarse en convenio con el agregado de agricultura de la Embajada de EE. UU. y del Servicio Fitosanitario del Estado (SFE).

Los orígenes del material certificado deben contar con los correspondientes Análisis de Riesgos de Plagas (ARP) emitidos por el SFE y por tanto deben ya contar con requisitos establecidos. California, Florida en los Estados Unidos y España, son los estados que ya cumplen con esta regulación, por lo que la solicitud de importación y proceso respectivo puede realizarse digitalmente a través de la ventanilla única de comercio exterior (VUCE).

Es importante contar con un plan de contingencia en casos de retrasos en los procesos de importación al ser tejido vivo con caducidad acelerada, se recomienda:

- Coordinación internacional precisa:
 - Alineación con calendarios de cosecha de proveedores.
 - Ventanas de exportación preestablecidas.
 - Selección de servicios de transportes urgentes aéreos.

Ente las consideraciones técnicas de importación debe considerarse:

- Manejo post-importación:
 - Injertación dentro de las 72 horas posteriores a la liberación.
 - Cuarentena extendida para cierto porcentaje del material.
 - Muestreo aleatorio para verificación molecular.
- Documentación:
 - Registro digital de todo el proceso.
 - Certificados de origen y fitosanidad.
 - Informes de trazabilidad completa.

Este modelo operativo conceptualizado en la Figura 21 garantiza el establecimiento acelerado de la máxima capacidad productiva.

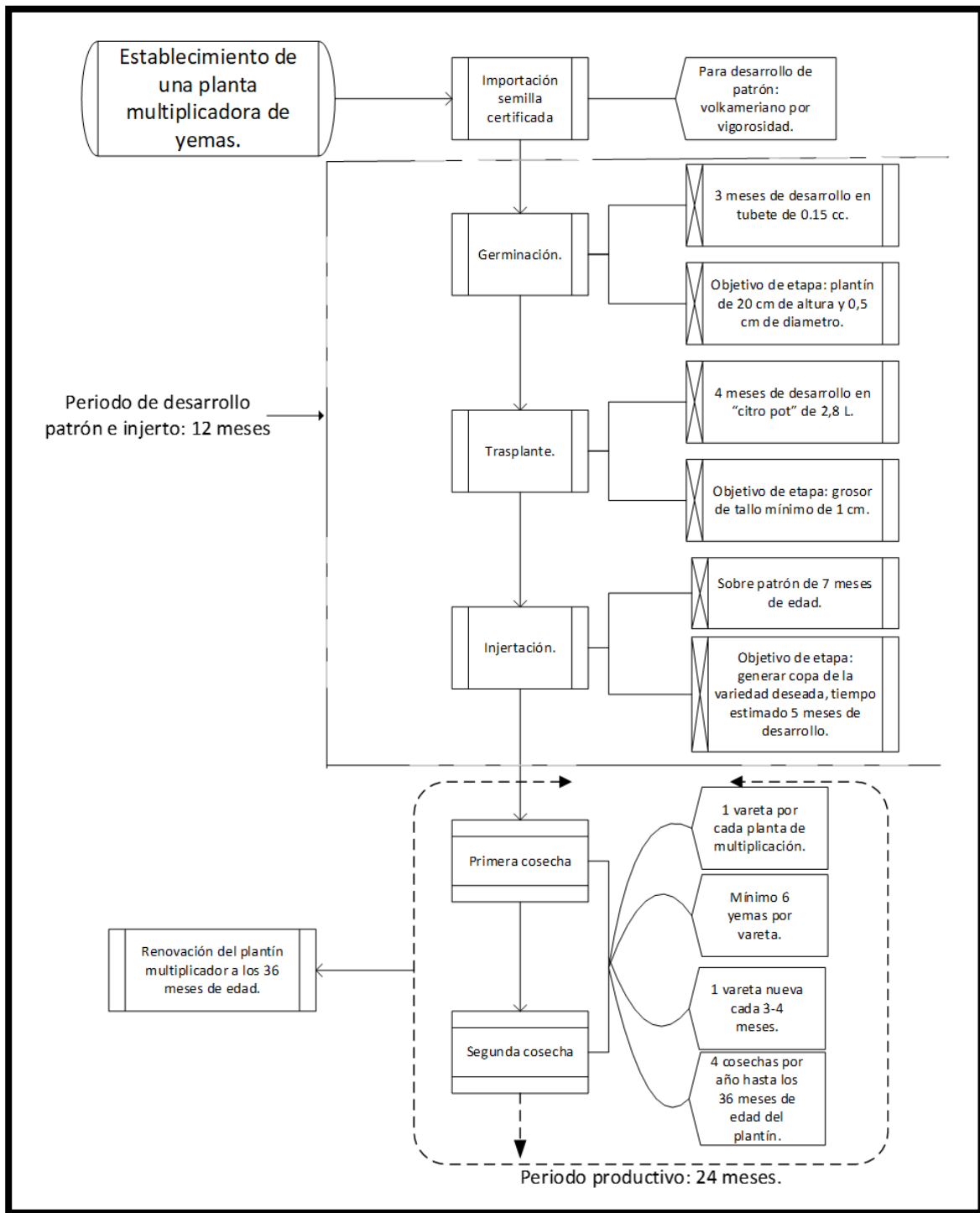


Figura 21. Esquema de multiplicación de accesiones en el Banco de Multiplicación de yemas.

Fases críticas en el proceso de multiplicación de yemas certificadas

Los momentos críticos son: germinación, trasplante a maceta (“*citro-pot*”), injerto y cosecha.

Germinación y desarrollo inicial.

- Material base: Semilla certificada de portainjerto Volkameriano.
- Sistema de propagación:
 - Contenedores: tubetes de 150 cm³ (ver Figura 22).
 - Densidad: 525 plantas/m² en bancas especializadas (1.2×4.5×0.7 m).
 - Duración: 90 días.
- Parámetros de calidad:
 - Altura mínima: 20 cm.
 - Diámetro de tallo: ≥0.5 cm.
 - Sistema radical desarrollado.
- Eficiencia del proceso:
 - Tasa de descarte: 40% (principalmente por malformaciones radiculares).
 - Producción requerida: 9,587 tubetes/año (168 m² de área operativa).



Figura 22. Tubete de 150 cm³ y porta-tubete de 120 espacios. Fuente: Agrisoluciones S.A.

Trasplante y acondicionamiento.

- Contenedores: macetas "citro-pot" de 2.8 L.
 - Ventajas: optimización del drenaje y aireación radical.
- Periodo de desarrollo: 120 días.
- Parámetros objetivo:
 - Diámetro de tallo: ≥ 1 cm (óptimo para injerto).
 - Arquitectura vegetal balanceada.
 - Descarte de plantas por problemas de calidad (ej, problemas radicales, ver Figura 23).

Proceso de injertación.

- Técnica empleada: injerto en "T" invertida, tasa de prendimiento de hasta 98%.
- Protocolos de sanidad:
 - Esterilización de herramientas.
 - Manejo aséptico de material vegetal.
- Periodo de desarrollo: 150 días post-injerto.



Figura 23. Defectos de raíz y tallo motivos de descarte.

El Bloque de Germinación y Desarrollo de Propágulos debe producir al menos 9.587 tubetes (área efectiva de trabajo mínima de 168 m²) para abastecer el consumo interno del SPS (ver Cuadro 20).

Cuadro 20. Requerimientos mínimos de producción en el banco de Germinación y Desarrollo de Propágulos.

Patrón	Unidad	Plantas	Merma (40%)
FD y SW	B. Germoplasma	104	173
FD y SW	B. Fundación	208	347
VOLK	B. Multiplicación	5440	9067
Total		5752	9587

Nota: FD: "Flying dragon", SW "Swingle".

Cosecha y postcosecha

- Primera cosecha: 12 meses post-siembra.
- Parámetros de calidad: longitud mínima de 20 cm y diámetro de tallo mínimo de 1 cm con al menos 6-8 yemas axilares viables.
- Ciclos productivos:
 - Producción inicial: 1 vareta/planta.
 - Producción sostenida: 4 cosechas/año (1 vareta/planta/trimestre).

La maceta generalmente utilizada en la producción de plantas de cítricos es la denominada "*citro pot*" (Figura 24).

Opciones para proyecto de vivero de cítricos – Costa Rica


AGRI SOLUCIONES
Agri Soluciones Internacionales S.A.

Bloque Multiplicación (Nivel 3)

Opción 1 COUNTRY PLASTICS

Maceta Citropot
Diámetro externo: 13,2 x 13,2 cm
Altura: 30,4 cm
Volumen: 2.800 ml

Porta macetas
Dimensiones de la bandeja: 26,7 x 54,1 cm
Numero de macetas por bandeja: 8
Plantas por m2: 55

 **Sustrato medio-grueso (con o sin perlita)**
Capacidad de aire: 20-30%


Ver: <https://youtu.be/V5FJ6WT5CJw>

Figura 24. Maceta y porta-maceta para banco de Multiplicación. Fuente: Agrisoluciones S.A

Control de calidad y trazabilidad

Cada fase incluye protocolos específicos de:

- Monitoreo fitosanitario.
- Registro de parámetros de crecimiento.
- Selección y descarte de material.
- Documentación de procesos.

Ciclo productivo y reemplazo.

El sistema establece un programa estricto de rotación basado parámetros técnicos como su periodo de vida útil tasada en una duración óptima de 36 meses esto producto de una disminución progresiva de productividad (15-20% anual post-primer año), cambios fisiológicos por estrés productivo continuo y pérdida de eficiencia en formación de yemas.

- Criterios de sustitución:
 - Evaluación trimestral de parámetros productivos.
 - Monitoreo de indicadores de vigor vegetativo.

- Análisis de relación costo-beneficio operativo.

El material vegetal retirado se le valora su estado fitosanitario para dar garantía de ausencia de patógenos, todo material debe contar con documentación de trazabilidad completa. Estas plantas pueden venderse para financiar costos operativos.

En la Figura 25 se ilustra una planta con características típicas de una planta multiplicadora.



Figura 25. Ejemplo de una planta desarrollada en un sistema “pot-in-frame”. (Thisfarmescare.org <https://www.thisfarmcares.org/brite-leaf-citrus-nursery>).

Nivel 4: sistema de producción en viveros comerciales certificados

Este nivel no forma parte del SPS, pero conforma el núcleo de clientes o mercado meta, la justificación del proyecto. Los requisitos fundamentales para que un vivero cumpla con criterios de certificación vendrían a ser los siguientes:

- Abastecerse de material propagativo certificado tanto de yemas y semillas proveniente del SPS o importado de programas de protección internacionales:
- Deben estar registrados ante el Programa Nacional de Material Vegetal (PNMV).
- Contar con Infraestructura que cumplan estándares de bioseguridad (ver Figura 26), por ejemplo, contar con sistemas de protección contra vectores (mallas anti-insectos, cortinas de viento, trampas, y otros).

- Áreas delimitadas para diferentes etapas de producción.

Es imperativo que los viveros cuenten con protocolos de bioseguridad que si bien menos estrictos a los requeridos en los niveles anteriores (1-3), deben respetar criterios básicos:

- Hermeticidad del recinto productivo.
- Programa de mantenimiento preventivo.
- Control de acceso al área de producción.
- Gestión de personal: capacitación continua en protocolos, desarrollo de una cultura de cumplimiento normativo, reforzamiento de la responsabilidad compartida en control fitosanitario entre todo el personal.

En cuanto a trazabilidad esta debe estar orientada a los siguientes puntos:

- Organización interna:
 - Distribución espacial ordenada de lotes.
 - Identificación precisa de materiales.
 - Registros digitales actualizados.
 - Documentación de transacciones.
- Formulario técnico de compraventa (emitido por SPS) que incluye:
 - Datos de la transacción (fecha, cantidades).
 - Identificación de productor y cliente.
 - Origen genético del material (patrón/copa).
 - Destino final del material.
 - Métodos de propagación utilizados.

Los viveristas deben considerar, en caso de importación de material certificado, el procedimiento respectivo:

- Verificación de documentación oficial.
- Inspección por ONS y SFE.
- Periodo de cuarentena cuando aplique.

Finalmente, la certificación final y comercialización de las plantas requerirá el acompañamiento de documentación:

- Boleta técnica/pasaporte fitosanitario con:
 - Ubicación georreferenciada del vivero.
 - Registro PYMPA (pequeño y mediano productor agropecuario) otorgado por el MAG.
 - Historial fitosanitario (tratamientos aplicados).
 - Resultados de análisis de laboratorio.

Este documento tiene como finalidad ser utilizado como guía para transporte autorizado, documento de referencia para inspecciones posteriores y determinar el historial fitosanitario del material.



Figura 26. Ejemplo de vivero comercial certificado. (Harris Citrus Nursery, Florida: <https://www.facebook.com/people/Harris-Citrus-Nursery/100063665526118/>).

Fundamentos del sistema de trazabilidad y marco operativo

La implementación de un sistema de trazabilidad ágil, simple y confiable constituye un pilar fundamental para el éxito de este proyecto, tal como se ilustra en la Figura 27. El Sistema de Producción de Plantas Sanas (SPS) está diseñado para operar bajo infraestructura especializada y la adopción de principios de ingeniería operativa. Esto incluye la elaboración de manuales técnicos, protocolos administrativos y operativos estandarizados, controles de calidad rigurosos y un sistema de indicadores de desempeño que permitan evaluar la eficiencia del proceso en todas sus etapas.

Como parte de la estructura operativa, el proyecto contempla la construcción de una oficina administrativa de 21 m², destinada a la gestión documental, coordinación logística y seguimiento de los procesos internos. Este espacio servirá como centro de mando para el cumplimiento de los protocolos establecidos y la correcta implementación de los sistemas de trazabilidad.

Marco normativo y certificación

Es fundamental destacar que el sistema propuesto requiere del respaldo de una normativa actualizada en materia de certificación de material propagativo de cítricos en Costa Rica. Un manual de certificación de viveros debe incorporar, como mínimo, los elementos detallados en el Cuadro 21, asegurando que los procesos de producción, distribución y comercialización cumplan con los más altos estándares de calidad y bioseguridad. La armonización de estos lineamientos con las regulaciones internacionales garantizará la competitividad del sector cítrico nacional y facilitará el acceso a mercados exigentes.

La integración de estos componentes, infraestructura, protocolos estandarizados y un marco regulatorio robusto, posicionaría al SPS como un referente en la producción de material vegetal certificado en la región.

Cuadro 21. Elementos por considerar en la elaboración de un manual de certificación de plantas de cítricos.

Nivel	Proceso
General	Definición de las características de los sitios de producción: entorno.
General	Definición de los criterios para la construcción de las estructuras de acuerdo con cada nivel.
General	Sistema de trazabilidad: identificación y nomenclatura.
General	Procedimiento de incorporación al programa de certificación.
General	Formularios y formatos.
General	Tarifas de certificación.
General	Sistema de trazabilidad.
Nivel 0	Metodología para la selección y colección de material de campo.
Nivel 0	Metodología para la selección y procedimiento de importación de material propagativo.
Nivel 1	Metodología y cronograma de pruebas de diagnóstico de patógenos para el programa de certificación.
Nivel 1	Metodologías y protocolos de limpieza de tejidos.
Nivel 2	Sistema de registro y administración de accesiones en banco de germoplasma y fundación.
Nivel 2	Procedimiento de producción e incremento de accesiones en banco de germoplasma y fundación.
Nivel 2	Procedimiento de producción en banco productor de semilla botánica.
Nivel 3	Sistema de registro y administración de lotes de reproducción en bancos de multiplicación.
Nivel 3	Procedimiento de producción en bancos de multiplicación.
Nivel 4	Sistema de registro y administración de lotes productivos en viveros comerciales.
Nivel 4	Procedimiento de producción en viveros comerciales.
Nivel 4	Procedimiento para venta al detalle.
Nivel 1 a 4	Procedimientos para el desarrollo de los árboles de SPS (incluidos aquellos para validación en campo).
Nivel 1 a 4	Procedimientos de compraventa.
Nivel 1 a 4	Procedimientos de exportación.
Nivel 2 a 4	Protocolos de sanidad y descontaminación de ingresos, instrumentos y otros.
Nivel 2 a 4	Procedimientos para la corta de yemas.
Nivel 2 a 4	Procedimiento de injertación

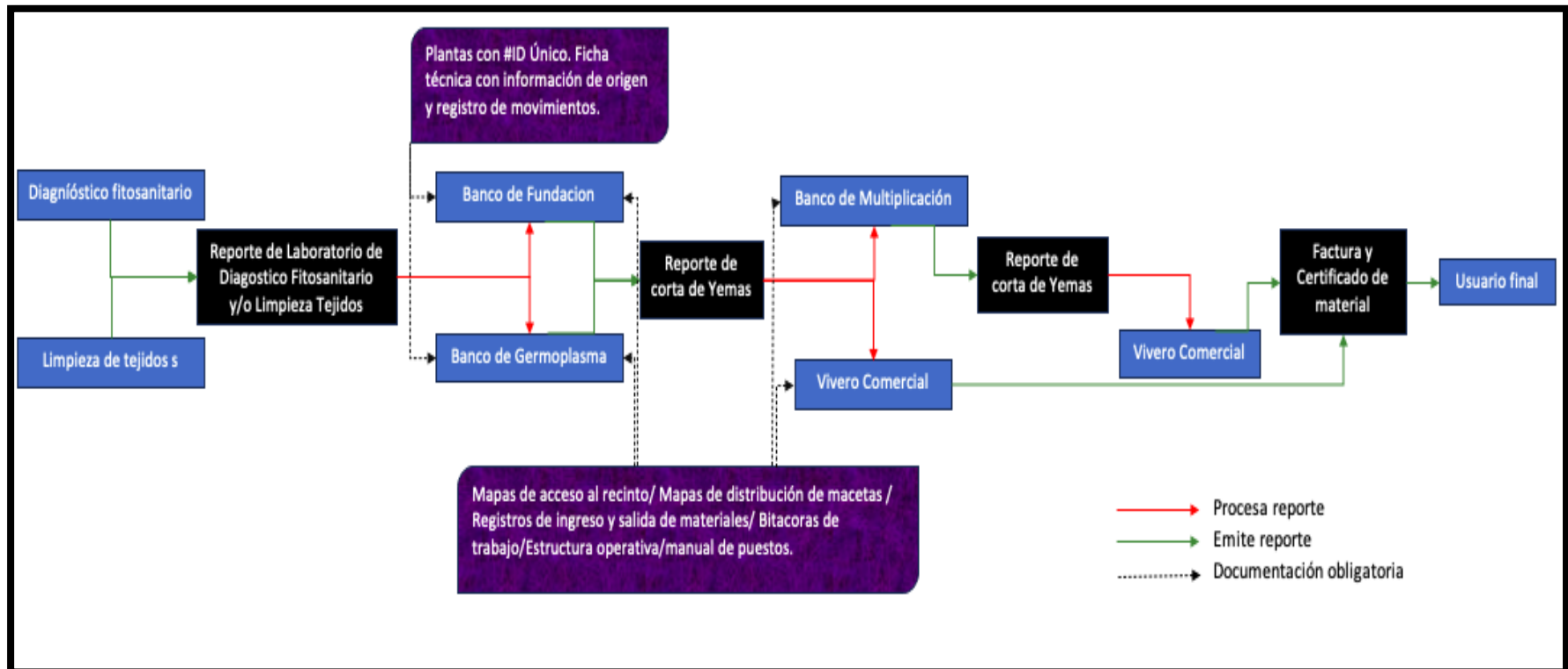


Figura 27. Esquema básico de trazabilidad del SPS.

El Sistema de Planta Sana (SPS) incorpora un riguroso sistema de trazabilidad, particularmente en los bloques de los Niveles 2 y 3, fundamentado en los siguientes componentes esenciales:

- Mapas de distribución: se implementan planos detallados que registran la ubicación exacta de cada planta o lote, facilitando su identificación y manejo eficiente (ver Figura 28). Estos mapas permiten una gestión espacial optimizada y una rápida localización del material vegetal cuando sea necesario.
- Supervisión oficial: todo movimiento de material vegetal ya sea para trasplante, injerto o cosecha, debe ser autorizado y monitoreado por un representante del Servicio Fitosanitario del Estado (SFE). Esta supervisión garantiza el cumplimiento de los protocolos establecidos y la integridad del proceso de trazabilidad.
- Control de espacios: se mantiene un registro preciso de la disposición física de las plantas, incluyendo filas, columnas, bancas y espacios vacíos. Este sistema evita alteraciones no autorizadas en la distribución original y previene errores en el manejo del material.
- Rotulación y etiquetado: cada unidad de producción (maceta o contenedor) cuenta con identificación individual mediante etiquetas permanentes que incluyen información crítica como:
 - Variedad.
 - Patrón utilizado.
 - Fecha de injerto.
 - Código único de trazabilidad.
- Separación física: en situaciones donde diferentes lotes deban compartir una misma estructura (banca, fila o columna), se establece una separación mínima de 50 cm entre ellos. Esta medida previene la mezcla accidental de materiales y mantiene la integridad genética y fitosanitaria de cada lote



Figura 28. Ejemplo de un mapa de distribución de variedades en un bloque de Fundación. (OIRSA y ICDF, 2015).

Registro y documentación de material propagativo: fundamentos y aplicaciones

El sistema de registro y documentación de movimientos de material propagativo constituye un componente esencial del proceso de certificación, tanto para operaciones de recepción como de envío (ver Figuras 29 y 30). Este mecanismo de trazabilidad integral proporciona:

- Transparencia informativa para productores
 - Acceso completo al historial fitosanitario.
 - Datos precisos sobre origen genético (variedad/patrón).
 - Registro cronológico de procesos (fechas de injerto, tratamientos).
 - Certificación de calidad en todas las etapas productivas.
- Valor legal y financiero
 - Sustento documental para garantías de inversión.
 - Aval para gestiones crediticias y seguros agrícolas.

- Cumplimiento de requisitos regulatorios y normativos.
- Utilidad operativa extendida
 - Funcionalidad como guía de transporte autorizado.
 - Base para análisis estadísticos sectoriales.
 - Soporte para decisiones técnicas y gerenciales.
 - Comunicación oficial estandarizada con autoridades.

Este sistema de registro, al integrar información técnica, legal y comercial, establece un estándar de transparencia que fortalece la confiabilidad del material certificado y optimiza los procesos administrativos asociados a la producción cítrica.

SPS				REPORTE DE CORTA DE YEMAS EN BANCO DE FUNDACIÓN				RCYF 00001	
ORIGEN				DESTINO					
Registro de corta				Registro injertación					
Accesión #ID	Patrón	Variedad	# Yemas	Cód. uso	Patrón	Bloque	Ubicación interna	Unidades a injertar	
001	SW	Valencia	200	3	VOLKA	1	Ban.1	85	
003	SW	Lima Persa	100	3	VOLKA	1	Ban. 1	85	
007	FD	Lima Persa	100	3	FD	2	Ban.2	85	
012	FD	Orthanique	100	3	FD	2	Ban. 2	85	

		# Oficio aprobación investigación / # Certificado de Exportación:	
INFORMACION DEL PROVEEDOR		INFORMACIÓN DEL USUARIO	
# REG PNMV	0000	# REG PNMV	0000
Nombre	_____	Nombre	_____
Georreferencia	X _____ Y _____	Georreferencia	X _____ Y _____
Fecha de Corta	_____	Fecha de injerto	_____
Nombre y Firma Responsable	_____	Nombre y Firma Responsable	_____
Nombre y Firma Inspector SFE	_____	Nombre y Firma Inspector SFE	_____
Nombre y Firma testigo	_____	Nombre y Firma testigo	_____

Cód. Uso: 1. B.Germoplasma. 2. B. Fundación. 3. B. Multiplicación. 4. V.Comercial. 5. Investigación. 6. Exportación. 7. Particular Cod. 1,2,3,4: Requieren estar registrados y certificados ante PNMV.
Cód 5: Requiere aprobación protocolo por SFE. Cód 6: Requiere certificado de exportación. Abreviaturas: NA: No aplica. F: Fila. C: Columna. Ban: Banca. L: Original. SFE. Copia 1: Proveedor. Copia 2: Usuario

Figura 29. Ejemplo de formato para reporte de corta de yemas para la trazabilidad en Nivel 2 del SPS. Adaptado Kesinger, (2013).

ORIGEN				DESTINO				
Registro de corta				Registro injertación				
Entrada	Patrón	Variedad	# Yemas	Cód. uso	Patrón	Bloque	Ubicación interna	Unidades a injertar
RCYF00001	VOLKA	Valencia	1200	4	VOLKA	1	F1C1 a F5C1	1100
RCYF00001	VOLKA	Lima Persa	600	4	VOLKA	1	F6C1 a F7C1	500
RCYF00001	FD	Lima Persa	600	4	FD	1	F8C2 a F10C2	500
RCYF00001	FD	Orthanique	600	4	FD	1	F12C2 a F12 C2	500
				# Oficio aprobación Investigación / # Certificado de Exportación:				
INFORMACION DEL PROVEEDOR				INFORMACIÓN DEL USUARIO				
# REG PNMV	0000			# REG PNMV	0000			
Nombre	_____			Nombre	_____			
Georreferencia	X	_____		Georreferencia	X	_____		
	Y	_____			Y	_____		
Fecha de Corta	_____			Fecha de injerto	_____			
Nombre y Firma Responsable	_____			Nombre y Firma Responsable	_____			
Nombre y Firma Inspector SFE	_____			Nombre y Firma Inspector SFE	_____			
Nombre y Firma testigo	_____			Nombre y Firma testigo	_____			
Cód. Uso: 1. B. Germoplasma. 2. B. Fundación. 3. B. Multiplicación. 4. V. Comercial. 5. Investigación. 6. Exportación. 7. Particular				Cod. 1,2,3, 4: Requieren estar registrados y certificados ante PNMV.				
Cód 5: Requiere aprobación protocolo por SFE. Cód 6: Requiere certificado de exportación. Abreviaturas: NA: No aplica. F: Fila. C: Columna. Ban: Banca. L: Lote Original: SFE. Copia 1: Proveedor. Copia 2: Usuario								

Figura 30. Ejemplo de formato para reporte de corta de yemas para la trazabilidad en Nivel 3 del SPS. Adaptado Kesinger, (2013).

Sistema de nomenclatura para identificación de material vegetal

El protocolo de identificación en las instalaciones del Nivel 2 se basa en un sistema de codificación único por planta, cuyo esquema detallado se muestra en la Figura 31. Este sistema de identificación consta de los siguientes componentes:

- Prefijo de ubicación:

- BG: Banco de Germoplasma.
- BF: Banco de Fundación.
- BS: Banco de Semillas.
- BGD: Banco de Germinación y Desarrollo (para bandejas de tubetes).
- Coordinadas espaciales de ubicación:
 - Plantas en maceta o suelo: #Fila/#Columna (considerando como fila la línea de mayor longitud).
 - Bancas de germinación/multiplicación: Número de banca/bandeja.
- Identificación genética:
 - Portainjertos: SW: “Swingle”, FD: “Flying Dragon”, Vk: Volkameriano.
 - Variedades: abreviatura estandarizada (ej. VaRR para Valencia Rhode Red).
- Datos cronológicos: año de ingreso al sistema, número consecutivo único por combinación variedad/patrón/fecha de injerto.

Ejemplo de identificación según el sistema de nomenclatura del SPS

Caso para planta individual en banco de Fundación: *código completo*, BF/12/08/SW/VaRR/2023-015, donde:

- BF: banco de Fundación.
- 12/08: fila 12, Columna 08.
- SW: patrón “Swingle” citrumelo.
- VaRR: variedad “Valencia Rhode Red”.
- 2023-015: ingresó en 2023, ejemplar #15 de esta combinación.

Interpretación: planta ubicada en el banco de Fundación, posición F12-C08, injerto de Valencia Rhode Red sobre Swingle, ingresada en 2023 como la décimo quinta unidad de este tipo.

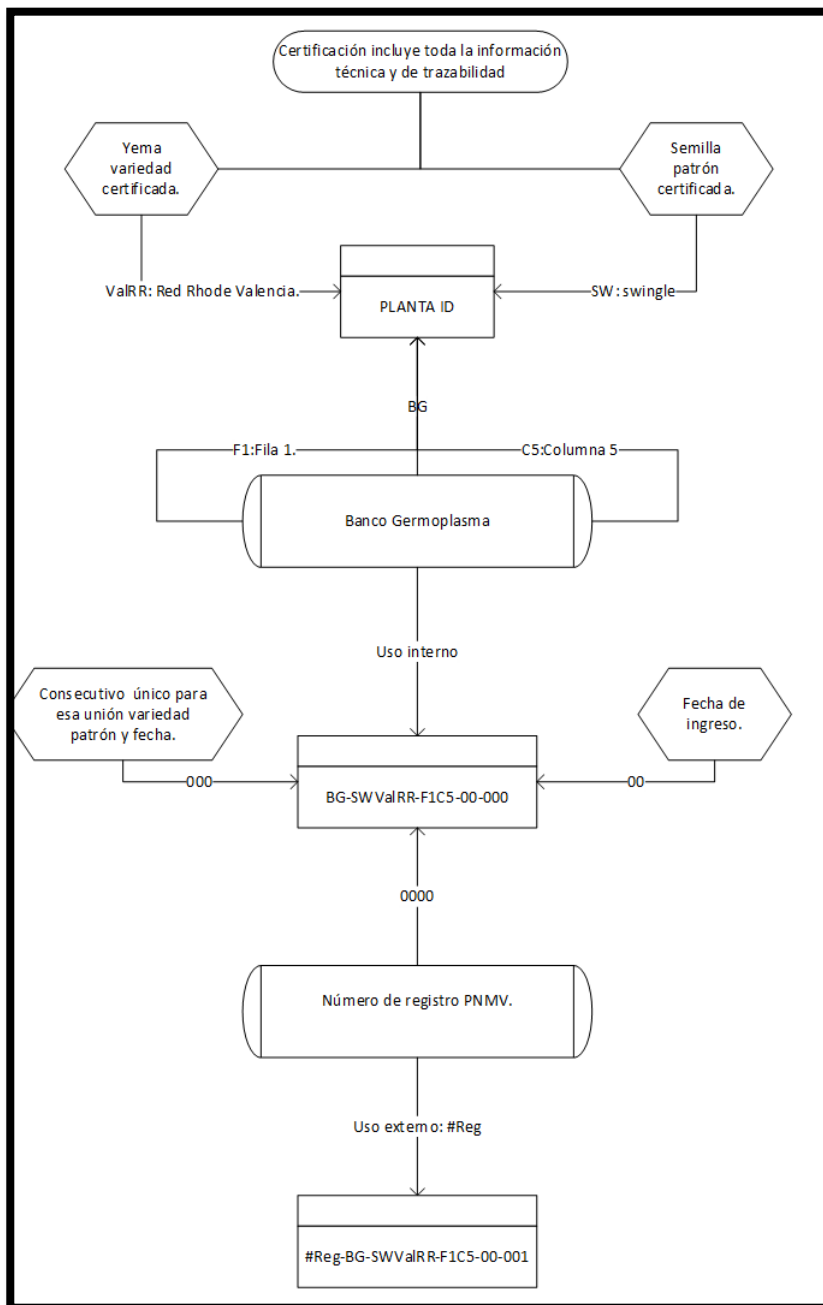


Figura 31. Sistema para determinar el ID planta/lote en el SPS.

Promoción de la sostenibilidad en el SPS

El Sistema de Producción Sostenible (SPS) busca establecerse como un referente en producción agrícola bajo ambiente protegido, impulsando la autosuficiencia energética e hídrica mediante la integración de paneles solares, captación de agua de lluvia y un sistema de fertirriego de precisión con tecnología de internet de las cosas (IoT).

Sistema de captación de agua de lluvia

Este sistema optimiza el recurso hídrico mediante la recolección y almacenamiento directo de agua pluvial, ya sea a través de superficies impermeabilizadas o estructuras diseñadas para tal fin. La implementación de reservorios (ver Figura 32) no solo garantiza disponibilidad de agua para riego y usos misceláneos, sino que también reduce la presión sobre los sistemas de drenaje y minimiza costos operativos.



Figura 32. Reservorio de 500 m³ y 400 m de espejo de agua. Fuente: Cortesía CEMEDE, UNA.

Energía solar para autoconsumo

La implementación de energía solar en invernaderos proporciona ventajas significativas, incluyendo la menor dependencia de fuentes energéticas convencionales, la reducción de la huella de carbono y el ahorro en costos operativos mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos (Figura 33).



Figura 33. Paneles solares para generación eléctrica en invernaderos. (Interempresas: <https://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/151916-Energia-solar-invernaderos-enfoque-basado-innovacion-sistemas-redes-energeticas.html>).

Sistema agricultura de precisión para fertirriego con IoT

Este sistema integra tecnologías de monitoreo en tiempo real, control automático y dosificación precisa de nutrientes y agua, optimizando el uso de insumos y reduciendo el impacto ambiental. Al suministrar los nutrientes adecuados en el momento óptimo, mejora el crecimiento de las plantas, incrementando la productividad y calidad de los cultivos. Además, detecta y corrige desequilibrios en la dosificación de manera oportuna.

El sistema monitorea condiciones atmosféricas mediante una estación meteorológica instalada en el invernadero, registrando parámetros como radiación solar, velocidad y dirección del viento, precipitación, temperatura y humedad. En el sustrato, se evalúa la humedad volumétrica, flujo de agua, conductividad eléctrica y pH, ajustando el sistema según los datos obtenidos. Opcionalmente, puede medirse la conductividad estomática, crecimiento del tallo y temperatura foliar.

Los datos se transmiten por radiofrecuencia (alcance de hasta 10 km) a un receptor y se almacenan en la nube, donde algoritmos los procesan en tiempo real, retroalimentando

y ajustando automáticamente el sistema de fertirriego (Dr. Freddy Soto, Laboratorio de Sustratos, Estación Experimental Fabio Baudrit, Comunicación personal, 2023).

Especificaciones técnicas para la construcción de las estructuras del SPS

El proyecto se ubicará en el campus del ITCR en Santa Clara, Florencia, distrito segundo del cantón de San Carlos en la provincia de Alajuela, específicamente en la finca La Vega de la Escuela de Agronomía.

Aspectos críticos de diseño

Manejo de viento

El viento genera fuerzas de presión y succión sobre la superficie de un invernadero, induciendo tensiones en sus componentes estructurales, como cubiertas, marcos y cimientos, lo que puede derivar en daños severos o incluso el colapso de la estructura. Los invernaderos con cubierta plástica son especialmente sensibles a estos efectos. Para garantizar un diseño óptimo, es esencial analizar la distribución del coeficiente de presión del viento mediante métodos como mediciones *in situ*, simulaciones computacionales y ensayos en túnel de viento (López Bautista *et al.*, 2016).

López Bautista *et al.* (2016) estudiaron en túnel de viento un modelo a escala de un invernadero tradicional con ventana cenital, determinando que la presión positiva es mayor cuando dicha ventana está a barlovento (orientada contra el viento), imagen 1 Figura 34, mientras que la presión negativa (succión) predomina cuando se ubica a sotavento (a favor del viento), imagen 2 Figura 34. Estas fuerzas pueden deformar los marcos, pandear la estructura o provocar su colapso incluso con vientos moderados, por lo que es esencial reforzar las zonas críticas.



Figura 34. Experimento a escala en túnel de viento con exposición de la ventana cenital. (López *et al.*, 2016).

Para este proyecto, se propone un diseño con doble ventana cenital para optimizar la ventilación, posicionando las caras cortas (ancho) a sotavento respecto al acceso principal. Esto minimiza presiones positivas que favorecen el ingreso de insectos y requiere menores refuerzos estructurales específicos (imagen A y B Figura 35).

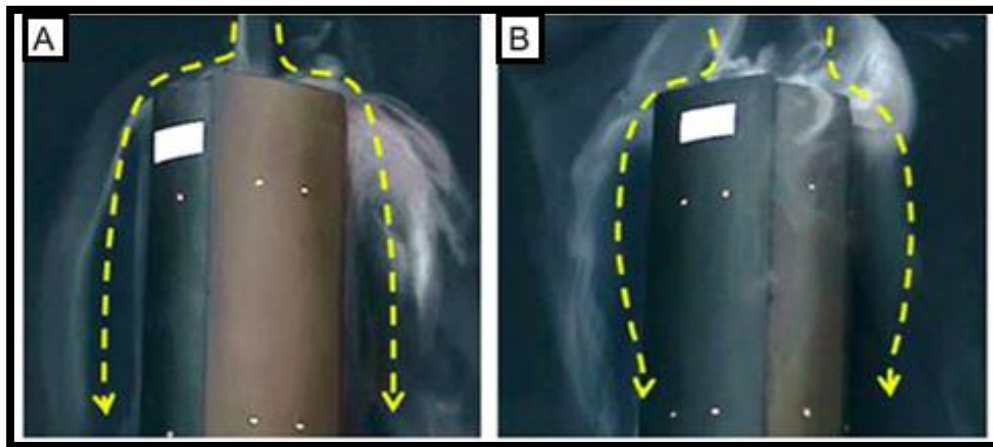


Figura 35. Experimento, a escala, en túnel de viento con exposición transversal a los vientos. (López, *et al.*, 2016)

Gestión hídrica y estructural

La acumulación de agua pluvial en techos de invernaderos representa un riesgo estructural que puede mitigarse mediante techos a dos aguas con canaletas de desagüe

y bajantes entubados conectados a drenajes. Para preservar los textiles agrícolas, se recomienda un perímetro de 2 metros encementado o en combinado con plástico negro y grava alrededor de las estructuras.

Control térmico

En climas tropicales, donde las temperaturas internas pueden superar los 40°C, el diseño debe priorizar una ventilación eficiente mediante ventanas cenitales dimensionadas adecuadamente, manteniendo temperaturas ideales bajo 32°C. Estrategias complementarias incluyen el uso de tejidos agrícolas, plásticos UV y blanqueamiento de techos. En el proyecto SPS el diseño de doble ventana cenital tiene accionamiento mecánico para su apertura y cierre.

Manejo de radiación solar

La implementación de mallas de sombreo y la orientación este-oeste de los invernaderos optimizan la distribución lumínica y radiación, favoreciendo un desarrollo vegetal homogéneo mientras se minimiza el sombreo entre plantas.

Protocolos de bioseguridad

El SPS requiere estrictos protocolos que incluyen: control de accesos con equipamiento desechable para visitantes, instalaciones de desinfección (pediluvios, pilas de lavado), y segregación de herramientas por área. Prohibición de acceso a personas que hayan visitado cultivos de cítricos el mismo día.

Monitoreo ambiental

El uso de sensores especializados (PAR, PPFD, clorofila y térmicos) permite el monitoreo preciso de condiciones ambientales internas, identificando puntos críticos como excesos térmicos o desbalances lumínicos.

Especificaciones constructivas

El diseño estructural debe considerar parámetros climáticos extremos (precipitación, viento, radiación), utilizando materiales duraderos (geomembranas de 10 años, techos plásticos con vida útil de 5 años). El proyecto ocupará 1 ha (4,067 m² cubiertos), con terreno nivelado e infraestructura complementaria (drenajes, cimentaciones).

Infraestructuras en el nivel 0

En el nivel 0 del SPS se contempla el levantamiento de: oficina administrativa, bodega y un bloque de indexación en una sola estructura.

Oficina y bodega

La oficina y bodega que forman parte del Nivel 0, comparten una sola estructura que también incluye el bloque de indexación del Nivel 1 por motivos de uso efectivo de recursos (ver Figura 36).

Oficina

El proyecto incluye un área administrativa y operativa de máximo 21 m² dentro del SPS. La oficina debe contar con mobiliario para conservar archivos físicos, impresora y estantería para usos diversos, activos que se detallan en el Cuadro 22.

Esta construcción ligera, diseñada para dos personas, prioriza condiciones ergonómicas básicas sin requerimientos arquitectónicos especiales, excepto por un sistema de ventilación (aire acondicionado) que garantice confort térmico (especificaciones técnicas detalladas en el Cuadro 23).

Cuadro 22. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en la oficina.

Mobiliario y equipamiento	Especificaciones
PC.	1 PC intel Core 7 mínimo 11 th gen, 16 RAM y 1 Tb de almacenamiento, con UPS de protección de 400 W, teclado, ratón y cámara web.
Aire acondicionado.	1 A/C 12.000 BTU inverter.
Silla oficina.	1 silla ejecutiva metálica, asiento de tela y respaldo en malla, con apoyabrazos, soporte de cabeza, altura y respaldo ajustables. Base giratoria, soporte lumbar.
Escritorio.	1 escritorio metálico personal, dimensiones mínimas 1.27 m. (largo) x 0.60 m. (ancho) y 0.75 m. (alto), con triple gavetero lateral.
Impresora.	1 impresora láser monocromática, conexión USB, 20-25 ppm.
Estante.	2 mini rack, altura 2 x 1.25 frente x 0.4 m. profundidad. Metal galvanizado.
Archivero.	1 archivero metálico 4 niveles, 0.65 m. (frente) x 0.47 m (profundidad) x 1.27 m. (alto). 1 archivador "arturito" altura 0.64 x 0.39 (frente) x 0.44 m. (profundidad) x 0,64 (alto), con rodines bloqueables.
Pizarra mixta.	1 pizarra acrílica y corcho 1.22 (ancho) x 2.24 m. (largo).

Cuadro 23. Especificaciones para la construcción de la oficina en el SPS.

Obra	Especificaciones
Pisos.	Hormigón 1-2-4, de 10 cm. de espesor con cimientado de malla electrosoldada, acabado cementino u ocre.
Paredes.	Material de construcción modular con láminas de fibro-cemento.
Techos.	Techos a una sola agua, con zinc y cumbreras esmaltadas blanco #26, con 0,7 m. entre clavadores (2"x 2"), cerchas tipo americana de 3"x 3" con arriostres 2"x2". Tubos hg, calibre 1,5 mm. Debe dejar 1.5 m. de alero con canalización de aguas por canoas y bajantes de PVC. Al menos tres laminas deben ser acrílicas para facilitar el paso de luz natural 3 mm. 1.22(ancho) x 2.44 m. (largo). Tapichel y cielo raso "gypsum".
Accesorios electricos y abastecimiento hidrico.	Previstas para colocar al menos 6 tomacorrientes alrededor de la unidad, con una prevista 220V para A/C 12.000 BTU Inverter.
Puerta.	Puerta sencilla de madera o metal de 0.9 m. (ancho) x 2.1 m. (alto) con marco de seguridad.
Ventanas.	2 ventanas con marco de aluminio 0.5 m (ancho) x 2 m. (largo), vidrio temperado con "film" de seguridad 3m.

Bodega

El proyecto contempla una unidad de apoyo de 70 m² para almacenamiento de materiales e insumos. Esta bodega, de construcción sencilla, dispondrá de estanterías y mobiliario organizacional (ver Cuadro 24), además de un área libre para sustratos. Su acceso permitirá el ingreso de vehículos tipo pick up, incluyendo zona de parqueo, con especificaciones constructivas básicas detalladas en Cuadro 25.

La estructura contará con cerramiento de malla ciclón para ventilación, sin requerir medidas de seguridad especiales. Albergará herramientas y equipos compartidos entre unidades por su alto costo, los cuales deberán estar identificados, inventariados y con registros de mantenimiento, responsable y horas de uso.

Cuadro 24. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en bodega.

Mobiliario y equipamiento	Especificaciones
Estanterías.	2 estantes metálicos de 4 niveles de 1.6-1.8 m. alto x 2 m. de largo y 0.6 m. profundidad.
Cajón de herramientas.	1 cajón metálico para organización de herramientas de 4 gaveteros, 0.8-1 m alto x 0.8-1 m. ancho por 0.45-0.6 m. profundidad con llave.
“Lockers”.	1 armario metálico tipo "locker" de 4 puertas con llave. Dimensiones 1.5-1.8 m. alto, 0.3-0.4 m. largo, 0.6-0.8 m. ancho.
Lampara Led.	3 lámparas tubo Led, tipo tubo T8, rosca G13, 18W, 48 pulgadas acabado transparente.
Hidrolavadora.	1 hidrolavadora de presión de trabajo regulable 30-110 bar / 400-1600 psi, máxima temperatura de agua de entrada 60°C / 140°F, altura de aspiración de 1.5 m, número de revoluciones del motor de 1.700 m-l/min - 1700 rpm, conexión eléctrica de 110 V / 14 A / 60 Hz / 1F, potencia absorbida de 1.6 kW, potencia nominal de 1.2 kW, peso de 22 kg, dimensiones en mm (L x A x H) de 440 x 200 x 330 mm, insensible a las oscilaciones de tensión (hasta aproximadamente 10%), motor de cuatro polos de desarrollo lento (1.700m-1/min.), lanza con acople rápido y función “Total Stop” que detiene totalmente la bomba tras unos segundos.
Medidor portátil para hidroponía.	1 medidor portátil de pH/CE/TDS/Temperatura, intervalo: pH 0.0 a 14.0 pH, CE 0.00 a 4.00 mS/cm TDS 0 a 1999 ppm (mg/L) con Cal Check.
Pulverizadoras eléctricas a batería.	2 pulverizadoras eléctricas 15-18 L, con batería recargable, autonomía de trabajo de 5 a 16 h. 3 años de garantía en el equipo y la batería. Pistola de acero inoxidable.
Pulverizadores manuales.	2 pulverizadoras manuales de 15-18 L, con trabajo de presión en cámara de 100 psi, diámetro abertura de tanque de 140 mm.
Insufladora manual.	1 insufladora de 1.5 kg.
Cámara térmica.	1 cámara termográfica con rango de medición de hasta 400 °C, portable, resolución IR de 256 x192 / 49,152 píxeles y sensibilidad térmica <0.04°C / NETD<40 mK sensor y cámara visual de 8MP.
Medidor de clorofila .	1 medidor de clorofila calibrado para medir la concentración de clorofila en unidades de μmol de clorofila por m^2 .
Candado.	1 de seguridad de 80 mm. para cierre del portón.
Tomacorrientes.	4 con protector anti-salpique.
Apagador.	1 triple.
Lámparas LED	3 de 1"diámetro, 48" de extensión.

Cuadro 25. Especificaciones para la construcción de la bodega en el SPS.

Obra	Especificaciones
Pisos.	Hormigón 1-2-4, de 10 cm. de espesor con cimiento de malla electrosoldada.
Paredes.	Cimentadas a cuatro hileras de bloques de cemento repellados, a partir de la cual se cubre con malla ciclón en secciones de 2 m. (ancho) x 4.10 m. (alto), calibre de alambre de 2.75 mm. Armadura de tubo redondo hg de 2"x calibre 1,5 mm.
Techos.	Techos a una sola agua, con zinc y cumbreras esmaltadas blanco #26, con 0,7 m. entre clavadores 2"x 2", cerchas tipo americana de 3"x 3" con arriostres 2"x2". Tubos hg, calibre 1,5 mm. Debe dejar 1.5 m. de alero con canalización de aguas por canoas y bajantes de PVC.
Puertas	Portón de malla ciclón y tubo a lo anteriormente descrito, a doble puerta de 1,5 m. de ancho cada una para un buque de 3 m. de ancho por 2.4 m. alto.
Accesorios electricos y abastecimiento hídrico.	Previstas para colocar tomacorrientes cada 4 m. alrededor de la estructura. y apagador para 3 luminarias tipo led. Prevista para dos tomas de agua, en la parte anterior y posterior de la unidad.
Acceso-corredor.	Acera frontal encementada para ingreso de vehículos, y con función de parqueo.
Perímetros	Petrímetros encementados, acera de 1 m.

CROQUIS BLOQUE DE INDEXACION, BODEGA Y OFICINA.

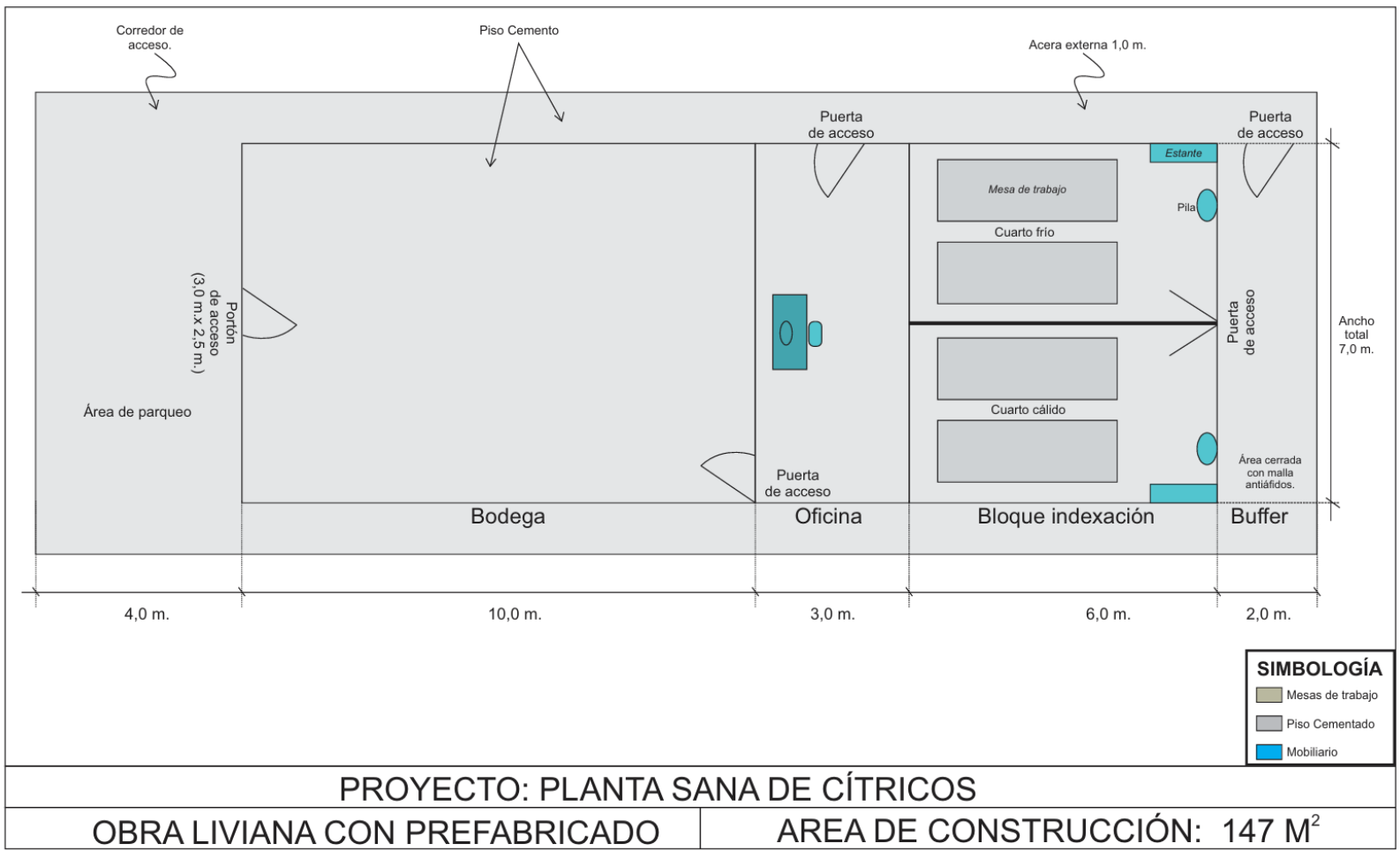


Figura 36. Croquis Unidad de Indexación, bodega y oficina del SPS.

Bloque de Cuarentena

Esta unidad está destinada a la preservación de material fitogenético de disponibilidad limitada y condición fitosanitaria vulnerable, con un área efectiva de 60 m² que requiere instalación de geomalla para estabilización del suelo que se plantea de grava (ver Figura 37). El diseño espacial se ilustra en la Figura 38.



Figura 37. Geotextiles de uso regular en invernaderos. Fuente: Covertech.com. Nota: Izquierda, geomembrana. Derecha, geomalla.

Por consideraciones de bioseguridad, el acceso al bloque debe restringirse al final de la jornada laboral o dedicarse exclusivamente a sus actividades durante el día, previniendo así contaminación cruzada.

El área de cuarentena requiere implementar protocolos estrictos de bioseguridad, que incluyen:

- Control de insectos: Instalación de trampas ultravioleta para capturar insectos vectores, complementadas con trampas cromáticas y adhesivas.
- Sistema de acceso: Puertas dobles en configuración "L" para minimizar el riesgo de contaminación.
- Desinfección de calzado: Pediluvio obligatorio en la entrada, diseñado para garantizar su uso al ingresar.

- Gestión de herramientas: Equipos de trabajo en contacto con tejido vegetal deben ser de uso exclusivo, excepto instrumentos de medición de alto costo, que podrán compartirse bajo protocolos de desinfección.

Estas medidas buscan prevenir la introducción y dispersión de patógenos, manteniendo condiciones fitosanitarias controladas. Las descripciones de mobiliario y equipo requerido se detallan en el Cuadro 26 por su parte las especificaciones constructivas se detallan en el Cuadro 27.

Cuadro 26. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en el Bloque de Cuarentena.

Mobiliario y equipamiento	Especificaciones
Macetas.	10 macetas tipo “air-pot” de 38 litros.
Sustrato.	0,4 m ³ de fibra de turba peat moss más perlita media-gruesa (80-20).
Trampa UV.	1 trampa de una sola lámpara UV-A no astillable de 10-15 W. con capacidad de cobertura de 30-55 m ² , conector genérico. Bombilla reemplazable en mercado nacional.
Cortina de aire.	1 cortina de aire de 1.2 m. 230v/60Hz/1Ph con control remoto.
Llavines eléctricos.	2 kit cerradura eléctrica con transformador y botón de activación.
Lampara Led.	1 lámpara Led, tipo tubo T8, rosca G13, 18W, 48 pulgadas acabado transparente.
Dispensadores de alcohol.	2 dispensadores de 500 ml. manual.
Navaja de injerto.	1 navaja de acero inoxidable no bloqueable, con hoja recta y separador de corteza de 56 mm. con asa de nylon de 100 mm. 2 aspersores manuales de 100-200 ml.
Tijera de poda manual.	1 tijera de poda de mano con una longitud de 220 mm, una anchura de 51 mm y una altura de 19,4 mm. Peso neto de 300 g. La apertura de corte tiene un diámetro máximo de 18 mm. La hoja está fabricada con acero al carbono especial anticorrosión, mientras que el mango es de acero al carbono con encauchado.
Tijera de poda larga a dos manos.	1 tijerón de poda de 580 mm y una anchura de 223 mm. Peso neto de una sola unidad es de 0,9 kg. La apertura de corte máxima es de 30 mm. Hoja está hecha de acero, y el mango, de acero al carbono, tiene un acabado encauchado.
Pala de jardinería.	1 pala de jardinería de 20-25 cm.
Manguera.	1 manguera de 1" de 10 metros con pistola de presión.
Pulverizador.	2 aspersores de 5 L manual
Pulverizador de mano.	2 aspersores manuales de 100-200 ml.
Apagadores.	2 sencillos.
Apagador.	1 doble.
Tomacorriente.	1 tomacorriente con protección anti-salpique.
Lámpara Led	2 lámparas de 1"diámetro y 48" de extensión de 18 W.

Cuadro 27. Especificaciones para la construcción del Bloque de Cuarentena en el SPS.

Componente	Descripción
Tipo de Invernadero.	Europeo.
Dimensiones.	Ancho: 6 m. (1 tramo). Largo: 10 m. (2 secciones de 5 m.). Altura de canal: 4.5 m. Altura máxima: 8 m. (aprox.). Área total: 48 m ² .
Estructura.	Acero galvanizado en caliente. Pilares principales: 80 x 80 x 2.5 mm. Arcos: 60 x 2.0 mm. Resistencia al viento: 100 km/h.
Ventilación	Ventilación cenital doble, controlada mecánicamente. Aperturas laterales protegidas con malla anti-insectos de 50 mesh.
Cubierta.	Película de polietileno (PE) de 200 micras. Transmisión de luz: 88%. Propiedades: Anti-goteo, anti-polvo, bloqueo UV.
Paredes laterales.	Cimiento de doble hilera, y cobertura hasta canoa de malla antiinsectos de 50 x 25 mesh.
Entrada "L".	Buque en forma de "L", dimensiones de 3 m (largo). x 2 m. (ancho) x 2.5 m (alto) con una sobresaliente de 2 m. (largo) x 1 m. (ancho). x 2.5 m. (alto). Marco para puertas de 1 m. (ancho) x 2.1 m. (alto). Piso encementado. Techo plástico con iguales prestaciones a la cubierta principal.
Cimentación.	Tubos y barras de acero para la cimentación del invernadero.
Distribución Eléctrica.	Caja de control, cables y accesorios de conexión.
Pisos.	Base de grava #4 o #5 colocada sobre geomalla para estabilidad del agregado. Únicamente tendrá una acera interna de 1 m. (ancho) x 3 m. (largo) frente a la segunda puerta.
Puertas.	Puertas de 1 m. (ancho) x 2.1 m. (alto) abatible o corrediza. Las puertas pueden ser de metal cubiertas con malla de 50 x 25 mesh o policarbonato.
Bioseguridad.	El diseño contempla un pediluvio en la entrada. Deben instalarse dispensadores de alcohol o desinfectante de manos: previo a la entrada de unidad y antes de ingresar al área de producción. . Trampa anti-insectos UV, cromática y pegajosa. Sobre la puerta principal, cara interna, se colocaría una cortina de viento, además se colocarían trampas antiinsectos UV, cromáticas y pegajosas.
Perímetros.	El perímetro será cubierto con plástico negro como aislante de suelo con sobre de grava #4 para reducir encharcamientos y la presencia de malezas a 0.5 m. (ancho) alrededor de la estructura. Previo a la entrada, se construirá un área encementada en forma de "C". tendrá 2 m. (ancho) en sus segmentos paralelos y 6 m. (largo) en el segmento transversal. En el centro de la "C", se dejará un espacio abierto de 2 m (largo) x 1 m. (ancho) donde se ubica la saliente de la entrada en "L".
Accesorios electricos y abastecimiento hídrico.	En el buque de entrada: prevista tomacorrientes para trampa Uv y cortina de aire con encendido automático con la apertura de la puerta, prevista para instalación de llavín eléctrico por puerta. 1 apagador. Área de producción: prevista para 1 apagador para dos luminarias Led y una toma de agua.

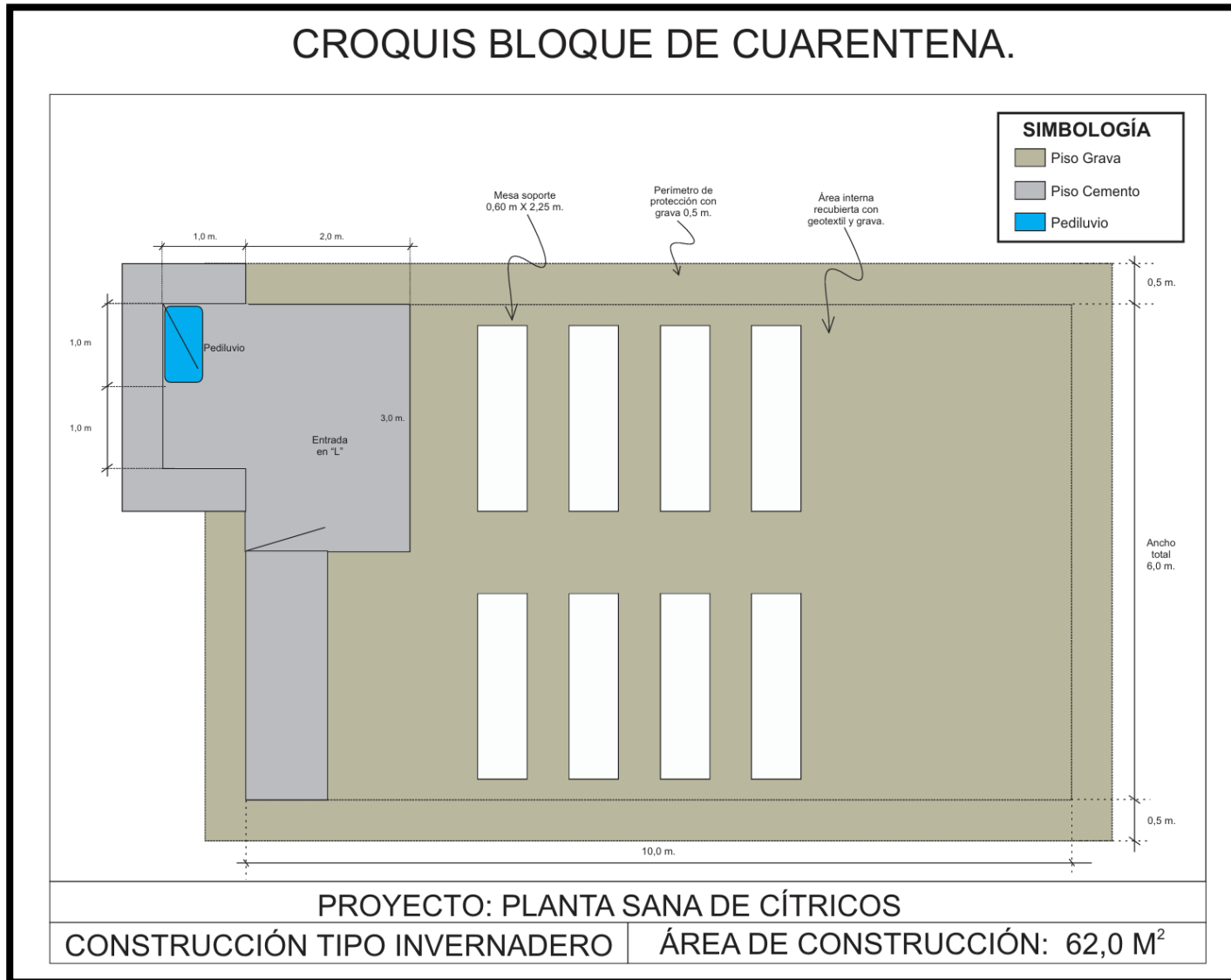


Figura 38. Croquis Bloque de Cuarentena del SPS.

Infraestructuras del nivel 1

Laboratorios

Los laboratorios de Nivel 1 representan la inversión más significativa en un SPS, tanto en infraestructura como en equipamiento especializado y personal calificado. El potencial convenio con el ITCR, permitiría disponer de capacidades técnicas para microinjertación, cultivo de tejidos, diagnóstico fitosanitario y tratamientos especializados. Las especificaciones técnicas de los laboratorios de diagnóstico y limpieza de tejidos se detallaron anteriormente. No se incluyen aspectos constructivos por su complejidad técnica.

Bloque de Indexación

El Bloque de Indexación complementa los servicios de laboratorios en el Nivel 1 está ubicado en la estructura junto a la bodega y oficina (ver Figura 36). Este bloque cuenta con una superficie total de 42 m², y consta de dos cámaras climáticas independientes:

- Cuarto frío: Mantiene 24-28°C (día) y 18-21°C (noche).
- Cuarto caliente: Opera entre 32-40°C (día) y 24-27°C (noche).

Cada unidad de 21 m² permite evaluar la expresión sintomatológica en plantas indicadoras bajo condiciones térmicas contrastantes, optimizando la sensibilidad diagnóstica. El espacio incluye mesas de trabajo de 4 m² equipadas con iluminación LED (2150 W) y capacidad para 2,100 plantas (525 tubetes/m²). Las especificaciones de mobiliario y equipo requerido en esta unidad se detallan en el Cuadro 28, en tanto que el cuadro 29 resume las especificaciones de construcción para el bloque de indexación.

Cuadro 28. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en Bloque de Indexación.

Mobiliario y equipamiento	Especificaciones
Mesas de trabajo.	4 mesas metálicas 0.6 (ancho) x 2.25 m. (largo) x 0,7 m. (alto).
Tubetes.	1000 tubetes de 150 cm ³ .
Portatubetes.	10 bandejas de 43 cm x 53 cm
Sustrato.	0,55 m ³ de turba peat moss más perlita fina.
Aire acondicionado.	2 Aires acondicionados de 12.000 BTU, inverter, programables.
Luz Led para invernadero.	14 luminarias Led para agricultura de interior de 300 W.
Lampara Led.	1 lámpara Led, tipo tubo T8, rosca G13, 18W, 48 pulgadas acabado transparente.
Pila.	2 pilas de acero inoxidable o plástico de 1 lavadero,
Estante.	2 mini rack, altura 2 x 1.25 frente x 0.4 m. profundidad. Metal galvanizado.
Archivero.	1 archivero metálico 4 niveles, altura 0.65 m. (largo) x 0.47 m. (ancho) x 1.27 (alto).
Pizarra.	1 Acrílico 1.22 (ancho) x 2.24 m (largo).

Cuadro 29. Especificaciones para la construcción del Bloque de Indexación en el SPS.

Obra	Especificaciones
Pisos	Hormigón 1-2-4, de 10 cm. de espesor con cimiento de malla electrosoldada, acabado cementino u ocre.
Paredes	Material de construcción modular con láminas de fibro-cemento o baldosas prefabricadas.
Techos	Techos a una sola agua, con zinc y cumbreras esmaltadas blanco #26, con 0,7 m. entre clavadores (2"x 2"), cerchas tipo americana de 3"x 3" con arriostres 2"x2". Tubos hg, calibre 1,5 mm. Debe dejar 1.5 m. de alero con canalización de aguas por canoas y bajantes de PVC. Laminas deben ser acrílicas para facilitar el paso de luz natural 3 mm. 1.22 m. (ancho) x 2.44 m. (largo). Con tapichel y cielo raso "gypsum" o similar.
Accesorios electricos y abastecimiento hídrico.	Cada sección: prevista 3 tomacorrientes, 1 toma 220V. 1 toma de agua. Debe considerarse instalación eléctrica para luminaria Led para agricultura interior de 2150 W. con interruptores por cada 300-400 W. 1 interruptor para una luminaria de 18 W. Previstsa para un lavatorio.
Puerta	Puerta sencilla de madera o metal de 0.9 m. (ancho) x 2.1 m. (alto) con marco de seguridad.

Infraestructuras del nivel 2

Banco de Producción de Semilla Sexual

El Banco de Producción de Semillas Sexuales comprende tres invernaderos tipo europeo interconectados, conformando una estructura única de 1,440 m² (ver Figura 39). Cada unidad mide 12 m. de ancho × 40 m. de largo, subdividida en 10 secciones de 4 m., con altura máxima de 8 m. El croquis de este bloque se muestra en la Figura 40.



Figura 39. Estructura europea para la protección de árboles semilleros. Fuente: Prasada agriculture engineering Co.

Aunque requiere medidas de bioseguridad menos rigurosas que otras áreas del SPS, la hermeticidad estructural es fundamental. El diseño propuesto incluye la implementación de fertirriego en esta unidad, junto con bandas de cobertura de suelo por hileras de siembra. Estas medidas optimizan la retención de humedad en el sustrato y facilitan el manejo integrado de arvenses. Un resumen de equipo y herramientas requeridos en este bloque se resumen en el Cuadro 30.

La operación segura del sistema exige protocolos de desinfección de herramientas, inspecciones estructurales periódicas y mantenimiento preventivo sistemático para garantizar tanto la integridad física como la sanidad vegetal. Las especificaciones generales de construcción se indican en el Cuadro 31

Cuadro 30. Especificaciones de herramientas y equipo requerido en Banco de Producción de Semilla Sexual en el SPS.

Mobiliario y equipamiento	Especificaciones
Motoguadaña.	1 motoguadaña cuenta con una cilindrada de 44.3 cm ³ y una potencia de 2.1 KW (2.82 HP). Peso es de 8 kg. El depósito de combustible tiene una capacidad de 0.67 litros. Motor aceleración máxima de 12,500 RPM. Revoluciones en Ralenti (RPM) 2.800.
Sierra eléctrica para poda.	1 sierra eléctrica con un peso de 1,2 kg. La longitud de la espada es de 10 cm. Nivel sonoro de 67 dB(A). La cadena de 1/4" PM3. Con un bloqueo de seguridad. Batería de 10,8 V / 2,6 Ah.
Tijera de poda manual.	2 tijeras de poda de mano con una longitud de 220 mm, una anchura de 51 mm y una altura de 19,4 mm. Peso neto de 300 g. La apertura de corte tiene un diámetro máximo de 18 mm. La hoja está fabricada con acero al carbono especial anticorrosión, mientras que el mango es de acero al carbono con un acabado encauchado.
Tijera de poda larga a dos manos.	2 tijerones de poda de 580 mm y una anchura de 223 mm. El peso neto de una sola unidad es de 0,9 kg. La apertura de corte máxima es de 30 mm. La hoja está hecha de acero, y el mango, de acero al carbono, tiene un acabado encauchado.
Sierra de poda.	2 sierras de poda manual con las siguientes dimensiones: Longitud: 396 mm, Anchura: 19,8 mm. Peso neto 247 g. Apertura de corte máxima: 80 mm, Hoja: Fabricada en acero al carbono con dientes endurecidos, Mango: Hecho de plástico ABS.
Sistema de riego.	Fertirriego cualitativo- agrismart lot.

Cuadro 31. Especificaciones para la construcción del banco de producción de semilla sexual

Componente	Descripción
Tipo de Invernadero.	Europeo.
Dimensiones.	Ancho: 12 m. (1 tramo). Largo: 40 m. (10 secciones de 4 m). Altura de canal: 4.5 m. Altura máxima: 8 m. (aprox.) Área total: 480 m ² por unidad (1440 m ² en total).
Estructura.	Acero galvanizado en caliente. Pilares principales: 80 x 80 x 2.5 mm. Arcos: 60 x 2.0 mm. Resistencia al viento: 100 km/h.
Ventilación.	Ventilación cenital doble, controlada mecánicamente. Aberturas laterales con malla anti-insectos de 50 x 25 mesh.
Cubierta principal.	Película de polietileno (PE) de 200 micras. Transmisión de luz: 88%. Propiedades: Antigoteo, antipolvo, bloqueo UV.
Paredes laterales.	Cimiento de doble hilera, y cobertura hasta canoa de malla antiinsectos de 50 x 25 mesh.
Entrada doble puerta.	Dimensiones de buque: 2.5 m. (largo) x 2 m. (ancho) x 2.5 m. (alto). Marco para puerta de 1.2 m. x 2.1 m. alto. Piso encementado. Techo con iguales prestaciones a la cubierta principal.
Cimentación.	Tubos y barras de acero para la cimentación del invernadero.
Piso.	Área de producción con cobertura de tela tejida negra de 100 g/m ² .
Distribución Eléctrica.	Caja de control, cables y accesorios de conexión.
Puertas.	Sistema de ingreso a doble puerta con dimensiones de 1.2 m (ancho) por 2.1 m. (alto). Puerta de policarbonato o estructura de metal cubierta con malla anti-áfido de 50 x 25 mesh tipo optinet.
Bioseguridad.	El diseño contempla el paso sobre un pediluvio. Además, debe instalarse un dispensador de alcohol o desinfectante al ingreso de la unidad, cortina de viento, trampas antiinsectos uv, cromáticas y pegajosas.
Perímetros.	El perímetro será cubierto con grava #4 para reducir encharcamientos y la presencia de malezas a 2 m. (ancho) alrededor de la estructura. Esta ronda deberá mantenerse limpia.

CROQUIS BANCO DE PRODUCCIÓN DE SEMILLA SEXUAL Árboles sembrados a 5x5 m. lineal (44).

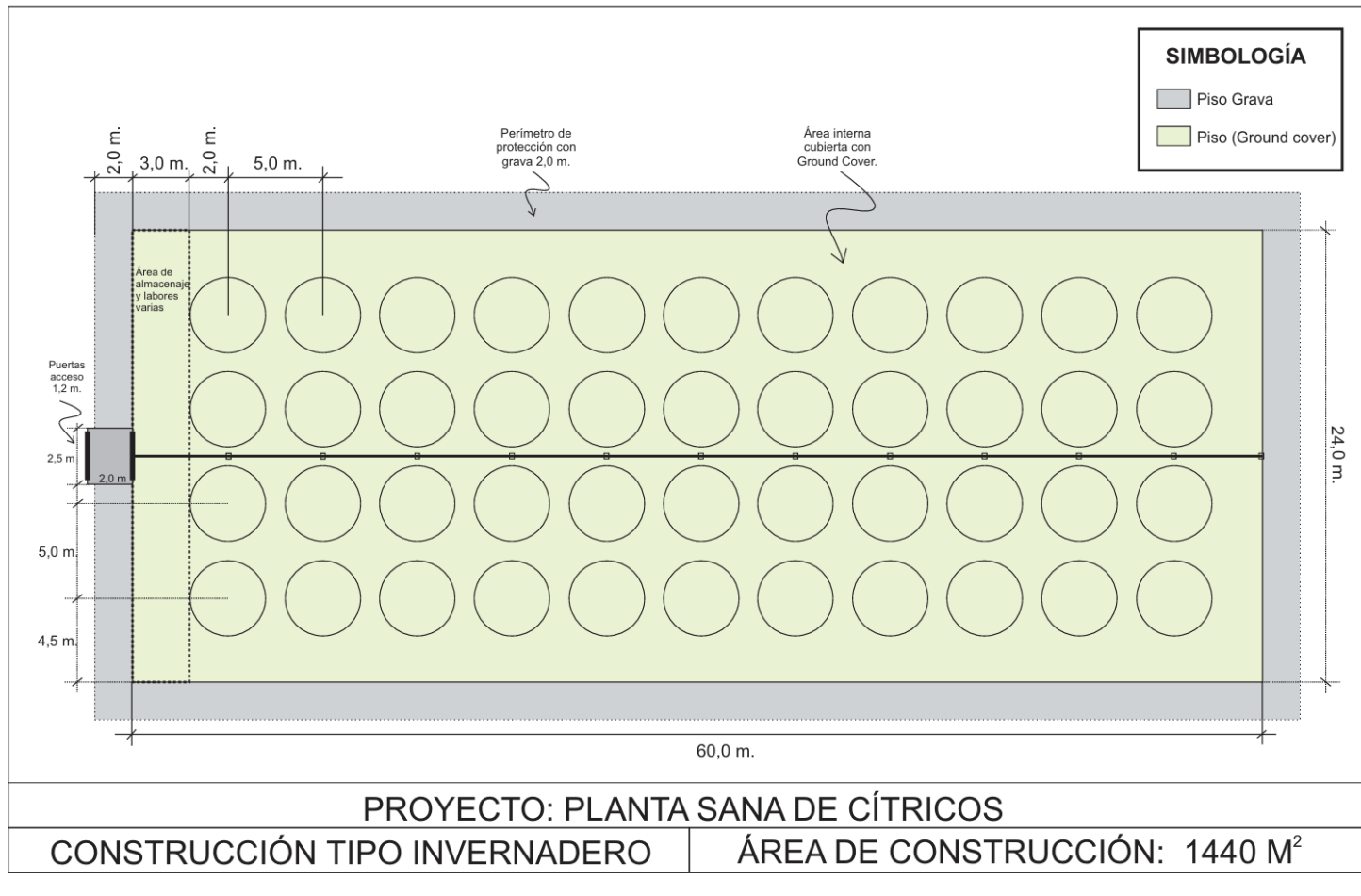


Figura 40. Banco de Producción de Semilla Botánica del SPS.

Bloque de Germinación y Desarrollo de Propágulos

El recinto de 194 m² albergará 12 bancas de trabajo para la germinación y desarrollo de propágulos en ambiente controlado. Para la propagación, se emplearán tubetes de 150 cm³ seleccionados según estándares de la industria estadounidense de invernaderos. El sustrato, con granulometría predominantemente fina, optimizará el contacto y compactación alrededor del propágulo. Los requerimientos de insumos y otros equipos figuran en el Cuadro 32, por su parte las especificaciones de construcción se detallan en el Cuadro 33.

Cuadro 32. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en Bloque de Germinación y Desarrollo de Propágulos en el SPS.

Mobiliario y equipamiento	Especificaciones
Mesas de trabajo.	12 mesas de acero inoxidable de 1.2 m. (ancho) x 4.5 m. (largo) x 0.7 m. (alto).
Tubetes.	15.000 tubetes de 150 cm ³ . Capacidad instalada: 14400.
Portatubetes.	125 bandejas de 43 cm x 53 cm.
Sustrato.	5.5 m ³ de turba peat moss con perlita (fina). Capacidad mínima 2.16 m ³ .
Lámpara Led.	1 lámpara Led, tipo tubo T8, rosca G13, 18W, 48 pulgadas acabado transparente.
Llavines eléctricos.	3 kit cerradura eléctrica con transformador y botón de activación.
Pila.	1 pilas de acero inoxidable o plástico de 2 lavaderos.
Estante.	1 mini rack, altura 2 x 1.25 m. frente x 0.4 m. profundidad x 2 m. altura. Metal, galvanizado.
Contenedores para sustrato.	2 contenedores de 650 L, plástico alta densidad, material grado alimenticio, con tapa.
Cajas plásticas.	5 cajas plásticas para mezclar sustratos de 40 a 50 litros de capacidad.
Pizarra.	1 pizarra de acrílico 1.22 m (ancho) x 2.24 m. (largo).

En la Figura 41 podemos observar el croquis correspondiente al Bloque para la Germinación y Desarrollo de Propágulos.

Cuadro 33. Especificaciones para la construcción del Bloque de Germinación y Desarrollo de Propágulos en el SPS.

Componente	Descripción
Tipo de Invernadero.	Europeo.
Dimensiones.	Ancho: 12 m. (1 tramo). Largo: 16 m. (4 secciones de 4 m.). Altura de canal: 4.5 m. Altura máxima: 8 m. (aprox.). Área total: 192 m ² .
Estructura.	Acero galvanizado en caliente. Pilares principales: 80 x 80 x 2.5 mm. Arcos: 60 x 2.0 mm. Resistencia al viento: 100 km/h.
Ventilación.	Ventilación cenital doble, controlada mecánicamente. Aberturas protegidas con malla antiinsectos de 50 x 25 mesh.
Cubierta principal.	Película de polietileno (PE) de 200 micras. Transmisión de luz: 88%. Propiedades: Antigoteo, antipolvo, bloqueo UV.
Paredes laterales.	Cimiento de doble hilera, y cobertura hasta canoa de malla antiinsectos de 50 x 25 mesh.
Entrada "L".	Buque en forma de "L", dimensiones de 3 m (largo) x 2 m. (ancho) x 2.5 m (alto) con una sobresaliente de 2 m. (largo) x 1 m. (ancho) x 2.5 m. (alto). Marco para puertas de 1 m. (ancho) x 2.1 m. (alto). Piso encementado. Techo plástico con iguales prestaciones a la cubierta principal.
Antesala.	Dimensiones: 2 m. (largo) x 9 m. (ancho) x 2.5 m. (alto). Piso encementado. Techo plástico de iguales prestaciones a la cubierta principal. Puerta de ingreso a la sección de producción de 1 m. x 2.1 m. alto.
Cimentación.	Tubos y barras de acero para la cimentación del invernadero.
Distribución Eléctrica.	Caja de control, cables y accesorios de conexión.
Pisos.	Base de grava #4 o #5 colocada sobre geomalla para estabilidad del agregado. Área de producción con acera en forma de "T" para facilitar el recorrido dentro de las instalaciones.
Puertas.	Dimensiones de 1 m. (ancho) x 2.1 m. de (alto). Las puertas pueden ser de metal cubiertas con malla de 50 x 25 mesh o de policarbonato, con llavín eléctrico.
Bioseguridad.	El diseño contempla un pediluvio en la entrada. Deben instalarse dispensadores de alcohol o desinfectante de manos: previo a la entrada de unidad y antes de ingresar al área de producción. En la acera frontal externa debe colocarse una pila de lavado con una parrilla de metal de 0.6 m. (ancho) x 1.5 m. (largo) para limpieza de calzado, elaborada con pletinas y angulares de hierro galvanizado de 2 mm. de grosor. Sobre la puerta principal, cara interna, se colocaría una cortina de viento, además se colocarían trampas antiinsectos UV, cromáticas y pegajosas.
Perímetros.	El perímetro será cubierto con plástico negro como aislante de suelo con sobre de grava #4 para reducir encharcamientos y la presencia de malezas a 2 m. (ancho) alrededor de la estructura. Previo a la entrada, se construirá un área encementada en forma de "C". tendrá 2 metros de ancho en sus segmentos paralelos y 6 metros de largo en el segmento transversal. En el centro de la "C", se dejará un espacio abierto de 2 m (largo) x 1 m. (ancho) donde se ubica la saliente de la entrada en "L".
Accesorios electricos y abastecimiento hídrico.	En el buque de entrada: prevista tomacorrientes para trampa Uv y cortina de aire con encendido automático con la apertura de la puerta, prevista para instalación de llavín eléctrico por puerta, 1 apagador sencillo para luminaria. Antesala: prevista para un tomacorriente y un apagador sencillo para luminaria. Área producción: prevista para 4 tomacorrientes, y 2 tomas de agua, todos equidistantes y equilibradamente distribuidos. Perímetro: Prevista para una toma de agua.

Banco de Germoplasma

El Banco de Germoplasma, con una superficie de 524 m² y capacidad para 104 accesiones, implementa protocolos estrictos de bioseguridad nivel 2. Su diseño consta de tres áreas diferenciadas: acceso en "L", antesala y zona de producción (ver Figura 42).

El acceso principal incorpora una acera con área de aislamiento equipada con lavabos y parrillas de limpieza. El diseño obliga al paso por un pediluvio interior, protegido de factores ambientales, para garantizar la efectividad de los desinfectantes. Los requerimientos de equipamiento figuran en el Cuadro 34, mientras que las especificaciones técnicas constructivas se registran en el Cuadro 35.

Cuadro 34. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en el Banco de Germoplasma en el SPS.

Mobiliario y equipamiento	Especificaciones
Mesa de trabajo	1 mesa plegable rectangular dimensiones 72,5×74×180 cm72,5×74×180cm capacidad 100 kg.
Sillas	4 sillas plegables blancas 80,5×44,5×63 cm80,5×44,5×63cm capacidad 300 kg.
Locker	1 "locker" metálico de 1 puerta con perchero y un gavetero. Dimensiones 1.5-1.8 m1.5-1.8m alto, 0.3-0.4 m0.3-0.4m largo, 0.3-0.4 m0.3-0.4m ancho.
Locker	1 "locker" de 4 puertas metálico calibre del metal 0.2 mm pintura electrostática. Alto 1.80 cm, Ancho 32 cm, Fondo 48 cm. Espacio utilizable en cada compartimiento 31x44x45 cm.
Macetas	104 macetas tipo "air-pot" de 38 litros.
Sustrato	4 m³ de peat moss media-gruesa (80-20).
Trampa UV	1 trampa de una sola lámpara UV-A no astillable de 10-15 W. con capacidad de cobertura de 30-55 m², conector genérico. Bombilla reemplazable en mercado nacional.
Cortina de aire	1 cortina de aire de 1.2 m. 230v/60Hz/1Ph con control remoto.
Lámpara LED	4 lámparas tubo LED, tipo tubo T8, rosca G13, 18W, 48 pulgadas acabado transparente.
Llavines eléctricos	3 kit cerradura eléctrica con transformador y botón de activación.
Dispensadores de alcohol	2 dispensadores de 500 ml. manual.
Estantes	2 mini rack, altura 2×1.25 m2×1.25m frente ×0.4 m×0.4m profundidad. Metal galvanizado.
Navajas de injertación	2 navajas de acero inoxidable no bloqueable, con hoja recta y separador de corteza de 56 mm. con asa de nylon de 100 mm. 2 aspersores manuales de 100-200 ml.
Tijera de poda manual	2 tijeras de poda de mano con una longitud de 220 mm, anchura de 51 mm y altura de 19,4 mm. Peso neto de 300 g. Apertura de corte de 18 mm. Hoja de acero al carbono, mango encauchado.
Tijera de poda larga	2 tijerones de poda de 580 mm y anchura de 223 mm. Peso neto de 0,9 kg. Apertura de corte máxima de 30 mm. Hoja de acero, mango encauchado.
Pala de jardinería	2 palas de jardinería de 20-25 cm.
Manguera	1 manguera de 1" de 10 metros con pistola de presión.
Pulverizador	2 aspersores de 5 L manual.
Pulverizador de mano	2 aspersores manuales de 100-200 ml.
Apagador	1 sencillo.
Apagador	1 de 3 botones.
Tomacorrientes	7 tomacorrientes con protección anti-salpique.

Cuadro 35. Especificaciones para la construcción del Banco de Germoplasma en el SPS.

Componente	Descripción
Tipo de Invernadero.	Europeo.
Dimensiones.	Ancho: 12 m. (1 tramo) . Largo: 40 m. (10 secciones de 4 m.) . Altura de canal: 4.5 m. Altura máxima: 8 m. (aprox.) . Área total: 480 m ² .
Estructura.	Acero galvanizado en caliente . Pilares principales: 80 x 80 x 2.5 mm . Arcos: 60 x 2.0 mm . Resistencia al viento: 100 km/h.
Ventilación.	Ventilación cenital doble, controlada mecánicamente . Aberturas laterales protegidas con malla antiinsectos de 50 x 25. mesh
Cubierta principal.	Película de polietileno (PE) de 200 micras . Transmisión de luz: 88% . Propiedades: Antigoteo, antipolvo, bloqueo UV.
Paredes laterales.	Cimiento de doble hilera, y cobertura hasta canoa de malla antiinsectos de 50 x 25 mesh.
Pisos	Entrada "L" y Antesala Lobby: Hormigón 1-2-4, de 10 cm. de espesor con cimiento de malla electrosoldada. Área de producción: Geomembrana blanca/negra de 350 micras. Base de piedra con cobertura geotextil, cubierta con arena y final de geomembrana 350 mic.
Entrada "L".	Buque en forma de "L", dimensiones de 3.5 m. (largo). x 3 m. (ancho) x 2.5 m (alto) con una sobresaliente de 2 m. (largo) x 1 m. (ancho). x 2.5 m. (alto). Marco para puertas de 1 m. (ancho) x 2.1 m. (alto). Piso encementado. Techo plástico con iguales prestaciones a la cubierta principal.
Antesala.	Dimensiones: 9 m. (largo) x 3.5 m. (ancho) x 2.5 m. (alto). Piso encementado. Techo plástico de iguales prestaciones a la cubierta principal. Puerta de ingreso a la sección de producción de 1 m. (ancho) x 2.1 m. alto.
Cimentación.	Tubos y barras de acero para la cimentación del invernadero.
Distribución Eléctrica	Caja de control, cables y accesorios de conexión
Perímetro.	Acera en el perímetro de la estructura con dimensiones de 1.5 m de ancho más cuneta de 0.5 m. Total perímetro de 305 m lineales.
Bioseguridad.	El diseño contempla un pediluvio en la entrada. Deben instalarse dispensadores de alcohol o desinfectante de manos: previo a la entrada de unidad y antes de ingresar al área de producción. En la acera frontal externa debe colocarse una pila de lavado con una parrilla de metal de 0.6 m. (ancho) x 1.5 m. (largo) para limpieza de calzado, elaborada con pletinas y angulares de hierro galvanizado de 2 mm. de grosor. Sobre la puerta principal, cara interna, se colocaría una cortina de viento, además se colocarían trampas antiinsectos UV, cromáticas y pegajosas.
Puertas	Dimensiones de 1 m. (ancho) x 2.1 m. de (alto). Las puertas pueden ser de metal cubiertas con malla de 50 x 25 mesh o de policarbonato, con llavín eléctrico.
Accesorios electricos y abastecimiento hídrico.	En el buque de entrada: prevista tomacorrientes para trampa Uv y cortina de aire con encendido automático con la apertura de la puerta, prevista para instalación de llavín eléctrico por puerta, 1 apagador sencillo para luminaria. Antesala: prevista para un tomacorriente y un apagador sencillo para luminaria. Área producción: prevista para 4 tomacorrientes, y 2 tomas de agua, todos equidistantes y equilibradamente distribuidos. Perímetro: Prevista para una toma de agua.

CROQUIS BANCO GERMOPLASMA

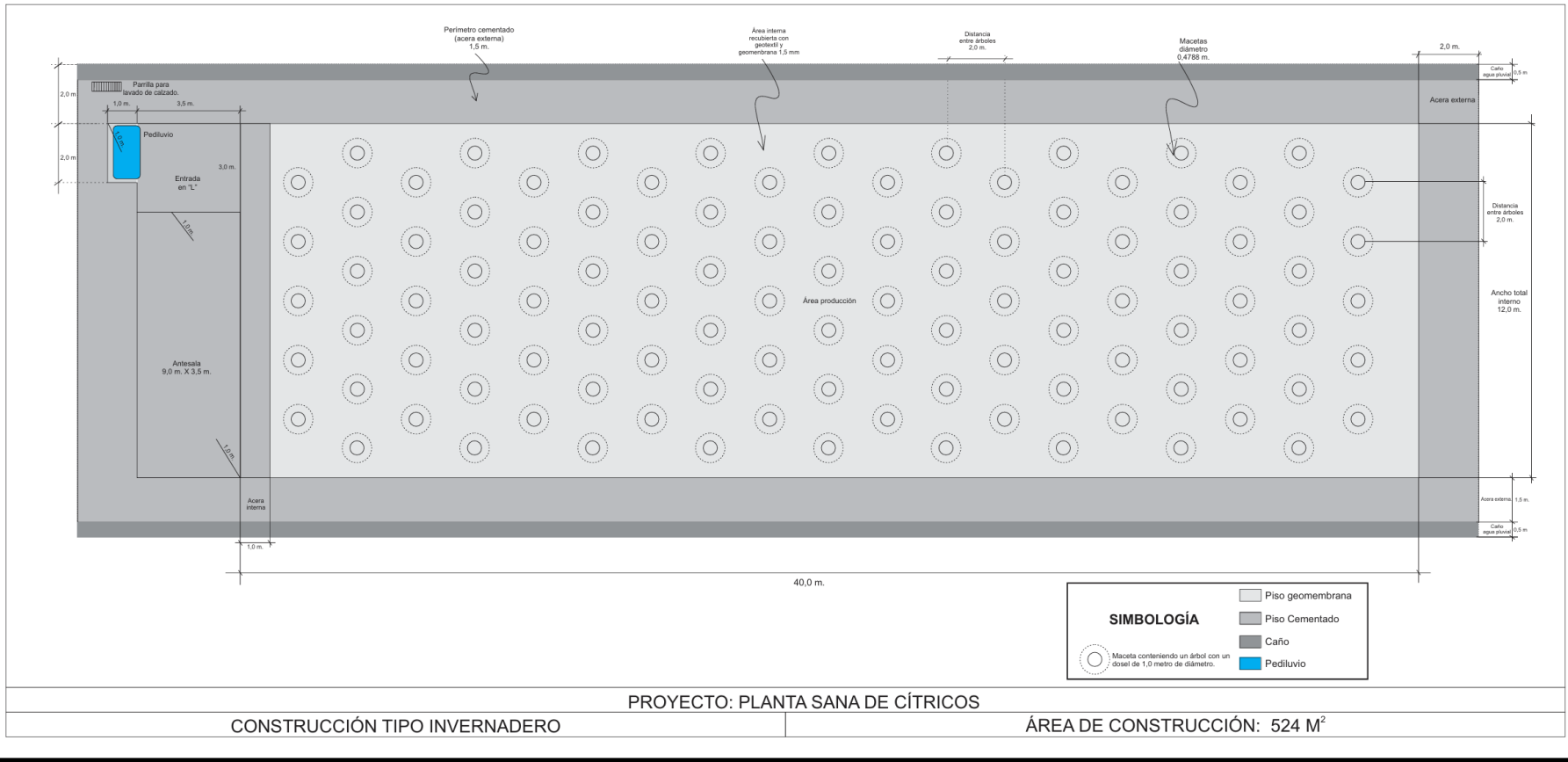


Figura 42. Croquis banco de Germoplasma del SPS.

Banco de Fundación

El banco de Fundación estará conformado por dos unidades de 524 m² con iguales características de diseño al banco de Germoplasma. El croquis de la unidad se ilustra en la Figura 43. Este banco contendrá 208 plantas en maceta (104 por unidad) donadoras de propágulos para proveer, prioritariamente, al banco de Multiplicación de yemas.

Por requisitos de bioseguridad, el personal del vivero debe contar con capacitación especializada para garantizar el cumplimiento estricto de los protocolos. Se restringirá al mínimo el traslado de herramientas, insumos y de personal entre zonas internas y externas, manteniendo los equipos dentro del recinto (ver requerimientos en Cuadro 36). Asimismo, se implementarán políticas rigurosas para el manejo de visitantes. En el Cuadro 37 se describen los criterios de construcción del bloque.

Cuadro 36. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido en cada una de las unidades que conformarán el Banco de Fundación.

Mobiliario y equipamiento	Especificaciones
Mesa de trabajo	1 mesa plegable rectangular dimensiones 72,5×74×180 cm72,5×74×180cm capacidad 100 kg.
Sillas	4 sillas plegables blancas 80,5×44,5×63 cm80,5×44,5×63cm capacidad 300 kg.
Locker	1 "locker" metálico de 1 puerta con perchero y un gavetero. Dimensiones 1.5-1.8 m1.5-1.8m alto, 0.3-0.4 m0.3-0.4m largo, 0.3-0.4 m0.3-0.4m ancho.
Locker	1 "locker" de 4 puertas metálico calibre del metal 0.2 mm pintura electrostática. Alto 1.80 cm, Ancho 32 cm, Fondo 48 cm. Espacio utilizable en cada compartimiento 31x44x45 cm.
Macetas	104 macetas tipo "air-pot" de 38 litros.
Sustrato	4 m³ de peat moss media-gruesa (80-20).
Trampa UV	1 trampa de una sola lámpara UV-A no astillable de 10-15 W. con capacidad de cobertura de 30-55 m², conector genérico. Bombilla reemplazable en mercado nacional.
Cortina de aire	1 cortina de aire de 1.2 m. 230v/60Hz/1Ph con control remoto.
Lámpara LED	4 lámparas tubo LED, tipo tubo T8, rosca G13, 18W, 48 pulgadas acabado transparente.
Llavines eléctricos	3 kit cerradura eléctrica con transformador y botón de activación.
Dispensadores de alcohol	2 dispensadores de 500 ml. manual.
Estantes	2 mini rack, altura 2×1.25 m2×1.25m frente ×0.4 m×0.4m profundidad. Metal galvanizado.
Navajas de injertación	2 navajas de acero inoxidable no bloqueable, con hoja recta y separador de corteza de 56 mm. con asa de nylon de 100 mm. 2 aspersores manuales de 100-200 ml.
Tijera de poda manual	2 tijeras de poda de mano con una longitud de 220 mm, anchura de 51 mm y altura de 19,4 mm. Peso neto de 300 g. Apertura de corte de 18 mm. Hoja de acero al carbono, mango encauchado.
Tijera de poda larga	2 tijerones de poda de 580 mm y anchura de 223 mm. Peso neto de 0,9 kg. Apertura de corte máxima de 30 mm. Hoja de acero, mango encauchado.
Pala de jardinería	2 palas de jardinería de 20-25 cm.
Manguera	1 manguera de 1" de 10 metros con pistola de presión.
Pulverizador	2 aspersores de 5 L manual.
Pulverizador de mano	2 aspersores manuales de 100-200 ml.
Apagador	1 sencillo.
Apagador	1 de 3 botones.
Tomacorrientes	7 tomacorrientes con protección anti-salpique.

Cuadro 37. Especificaciones para la construcción para cada unidad que conformarán el Banco de Fundación.

Componente	Descripción
Tipo de Invernadero.	Europeo.
Dimensiones.	Ancho: 12 m. (1 tramo) . Largo: 40 m. (10 secciones de 4 m.) . Altura de canal: 4.5 m. Altura máxima: 8 m. (aprox.) . Área total: 480 m ² .
Estructura.	Acero galvanizado en caliente . Pilares principales: 80 x 80 x 2.5 mm . Arcos: 60 x 2.0 mm . Resistencia al viento: 100 km/h.
Ventilación.	Ventilación cenital doble, controlada mecánicamente . Aberturas laterales protegidas con malla antiinsectos de 50 x 25. mesh
Cubierta principal.	Película de polietileno (PE) de 200 micras . Transmisión de luz: 88% . Propiedades: Antigoteo, antipolvo, bloqueo UV.
Paredes laterales.	Cimiento de doble hilera, y cobertura hasta canoa de malla antiinsectos de 50 x 25 mesh.
Pisos	Entrada "L" y Antesala Lobby: Hormigón 1-2-4, de 10 cm. de espesor con cimiento de malla electrosoldada. Área de producción: Geomembrana blanca/negra de 350 micras. Base de piedra con cobertura geotextil, cubierta con arena y final de geomembrana 350 mic.
Entrada "L".	Buque en forma de "L", dimensiones de 3.5 m. (largo) . x 3 m. (ancho) x 2.5 m (alto) con una sobresaliente de 2 m. (largo) x 1 m. (ancho) . x 2.5 m. (alto). Marco para puertas de 1 m. (ancho) x 2.1 m. (alto). Piso encementado. Techo plástico con iguales prestaciones a la cubierta principal.
Antesala.	Dimensiones: 9 m. (largo) x 3.5 m. (ancho) x 2.5 m. (alto). Piso encementado. Techo plástico de iguales prestaciones a la cubierta principal. Puerta de ingreso a la sección de producción de 1 m. (ancho) x 2.1 m. alto.
Cimentación.	Tubos y barras de acero para la cimentación del invernadero.
Distribución Eléctrica	Caja de control, cables y accesorios de conexión
Perímetro.	Acera en el perímetro de la estructura con dimensiones de 1.5 m de ancho más cuneta de 0.5 m. Total perímetro de 305 m lineales.
Bioseguridad.	El diseño contempla un pediluvio en la entrada. Deben instalarse dispensadores de alcohol o desinfectante de manos: previo a la entrada de unidad y antes de ingresar al área de producción. En la acera frontal externa debe colocarse una pila de lavado con una parrilla de metal de 0.6 m. (ancho) x 1.5 m. (largo) para limpieza de calzado, elaborada con pletinas y angulares de hierro galvanizado de 2 mm. de grosor. Sobre la puerta principal, cara interna, se colocaría una cortina de viento, además se colocarían trampas antiinsectos UV, cromáticas y pegajosas.
Puertas	Dimensiones de 1 m. (ancho) x 2.1 m. de (alto). Las puertas pueden ser de metal cubiertas con malla de 50 x 25 mesh o de policarbonato, con llavín eléctrico.
Accesorios electricos y abastecimiento hídrico.	En el buque de entrada: prevista tomacorrientes para trampa Uv y cortina de aire con encendido automático con la apertura de la puerta, prevista para instalación de llavín eléctrico por puerta, 1 apagador sencillo para luminaria. Antesala: prevista para un tomacorriente y un apagador sencillo para luminaria. Área producción: prevista para 4 tomacorrientes, y 2 tomas de agua, todos equidistantes y equilibradamente distribuidos. Perímetro: Prevista para una toma de agua.

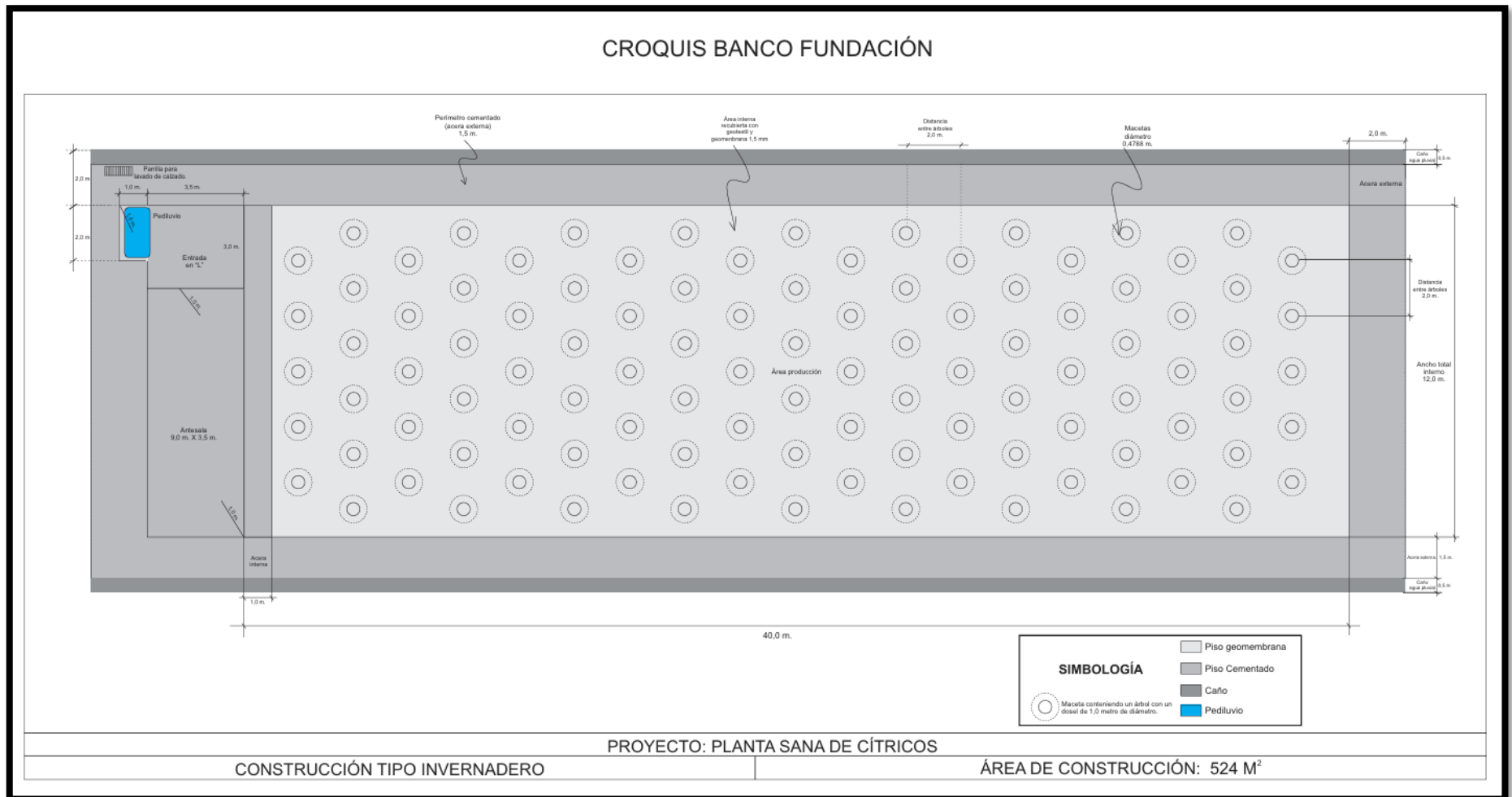


Figura 43. Croquis Banco de Fundación del SPS.

Infraestructuras del nivel 3

El Banco de Multiplicación

Este bloque mantiene los mismos protocolos operativos y de bioseguridad que las unidades anteriores, pero se distingue por utilizar pequeños potes en lotes densos en lugar de macetas de alto volumen, optimizando así la producción de yemas.

El diseño contempla dos naves idénticas y contrapuestas, permitiendo la renovación escalonada de plantas cada 36 meses sin interrumpir la continuidad operativa (ver Figura 44). Las especificaciones de equipamiento y constructivas se detallan en los Cuadros 38 y Cuadro 39, respectivamente.

Como innovación, se evalúa implementar un "pozo canadiense" para el control térmico mediante convección aire-tierra-aire, solución eficiente y de bajo costo.

Cuadro 38. Especificaciones de mobiliario y equipo requerido por unidad en el Banco de Multiplicación.

Mobiliario y equipamiento	Especificaciones
Mesa de trabajo.	1 mesa plegable rectangular, dimensiones 0.7 m. (ancho) x 1.8 m. (largo) x 0.7 m. (ancho), capacidad carga de 100 kg.
Sillas.	4 sillas plegables blancas, 0.85 m. x 0.45 m. (frente) x 0.6 m. (ancho) x 0.85 m. (alto), capacidad 300 kg.
"Locker".	1 "locker" metálico de 1 puerta con perchero y un gavetero. Dimensiones 1.5-1.8 m. alto, 0.3-0.4 m. largo, 0.3-0.4 m. ancho.
"Locker".	1 "locker" de 4 puertas metálico, calibre del metal 0.2 mm, pintura electrostática. Aldaba para candado en cada puerta, rejillas de ventilación en cada puerta. Alto 1.80 m., ancho 0.3 m., fondo 0.5 m. Espacio utilizable en cada compartimiento 0.3 m. (ancho) x 0.4 m. (fondo) x 0.45 m. (alto).
Macetas.	5440 macetas tipo "deep air pruning nesting pot" de 2.8 L.
Portamacetas.	680 porta macetas tipo "pot in frame" de 8 celdas.
Sustrato.	17,1 m ³ de peat moss media-gruesa (80-20).
Bancas de producción.	20 bancas de 1.2 m. (ancho) x 4.5 m. (largo) x 0,7 m. (alto) de metal con base tipo malla electrosoldada.
Trampa UV.	1 trampa de una sola lámpara UV-A no astillable de 10-15 W. con capacidad de cobertura de 30-55 m ² , conector genérico. Bombilla reemplazable en mercado nacional.
Cortina de aire.	1 cortina de aire de 1.2 m. 230v/60Hz/1Ph con control remoto.
Lampara Led.	4 lámparas tubo Led, tipo tubo T8, rosca G13, 18W, 48 pulgadas acabado transparente.
Llavines eléctricos.	3 kit cerradura eléctrica con transformador y botón de activación.
Dispensadores de alcohol.	2 dispensadores de 500 ml. manual.
Estantes.	2 mini rack, altura 2 x 1.25 frente x 0.4 m. profundidad. Metal galvanizado.
Navaja de injerto.	2 navajas de acero inoxidable no bloqueable, con hoja recta y separador de corteza de 56 mm. con asa de nylon de 100 mm. 2 aspersores manuales de 100-200 ml.
Tijera de poda manual.	2 tijeras de poda de mano con una longitud de 220 mm, una anchura de 51 mm y una altura de 19,4 mm. Peso neto de 300 g. La apertura de corte tiene un diámetro máximo de 18 mm. La hoja está fabricada con acero al carbono especial anticorrosión, mientras que el mango es de acero al carbono con un acabado encauchado.
Tijera de poda larga a dos manos.	2 tijerones de poda de 580 mm y una anchura de 223 mm. El peso neto de una sola unidad es de 0,9 kg. La apertura de corte máxima es de 30 mm. La hoja está hecha de acero, y el mango, de acero al carbono, tiene un acabado encauchado.
Pala de jardinería.	2 pala de jardinería de 20-25 cm.
Manguera.	1 manguera de 1" de 10 metros con pistola de presión.
Pulverizador.	2 aspersor de 5 L manual.
Pulverizador de mano.	2 aspersores manuales de 100-200 ml.
Apagadores.	1 sencillo y 1 de 3 botones.
Tomacorrientes.	7 con protección anti-salpigüe.

Cuadro 39. Especificaciones para la construcción de la unidad que conformarán el Banco de Multiplicación en el SPS.

Componente	Descripción
Tipo de Invernadero.	Europeo.
Dimensiones.	Ancho: 12 m. (1 tramo) . Largo: 40 m. (10 secciones de 4 m.) . Altura de canal: 4.5 m. Altura máxima: 8 m. (aprox.) . Área total: 480 m ² .
Estructura.	Acero galvanizado en caliente . Pilares principales: 80 x 80 x 2.5 mm . Arcos: 60 x 2.0 mm . Resistencia al viento: 100 km/h.
Ventilación.	Ventilación cenital doble, controlada mecánicamente . Aberturas laterales protegidas con malla antiinsectos de 50 x 25. mesh
Cubierta principal.	Película de polietileno (PE) de 200 micras . Transmisión de luz: 88% . Propiedades: Antigoteo, antipolvo, bloqueo UV.
Paredes laterales.	Cimiento de doble hilera, y cobertura hasta canoa de malla antiinsectos de 50 x 25 mesh.
Pisos	Entrada "L" y Antesala Lobby: Hormigón 1-2-4, de 10 cm. de espesor con cimiento de malla electrosoldada. Área de producción: Geomembrana blanca/negra de 350 micras. Base de piedra con cobertura geotextil, cubierta con arena y final de geomembrana 350 mic.
Entrada "L".	Buque en forma de "L", dimensiones de 3.5 m. (largo). x 3 m. (ancho) x 2.5 m (alto) con una sobresaliente de 2 m. (largo) x 1 m. (ancho). x 2.5 m. (alto). Marco para puertas de 1 m. (ancho) x 2.1 m. (alto). Piso encementado. Techo plástico con iguales prestaciones a la cubierta principal.
Antesala.	Dimensiones: 9 m. (largo) x 3.5 m. (ancho) x 2.5 m. (alto). Piso encementado. Techo plástico de iguales prestaciones a la cubierta principal. Puerta de ingreso a la sección de producción de 1 m. (ancho) x 2.1 m. alto.
Cimentación.	Tubos y barras de acero para la cimentación del invernadero.
Distribución Eléctrica	Caja de control, cables y accesorios de conexión
Perímetro.	Acera en el perímetro de la estructura con dimensiones de 1.5 m de ancho más cuneta de 0.5 m. Total perímetro de 305 m lineales.
Bioseguridad.	El diseño contempla un pediluvio en la entrada. Deben instalarse dispensadores de alcohol o desinfectante de manos: previo a la entrada de unidad y antes de ingresar al área de producción. En la acera frontal externa debe colocarse una pila de lavado con una parrilla de metal de 0.6 m. (ancho) x 1.5 m. (largo) para limpieza de calzado, elaborada con pletinas y angulares de hierro galvanizado de 2 mm. de grosor. Sobre la puerta principal, cara interna, se colocaría una cortina de viento, además se colocarían trampas antiinsectos UV, cromáticas y pegajosas.
Puertas.	Dimensiones de 1 m. (ancho) x 2.1 m. de (alto). Las puertas pueden ser de metal cubiertas con malla de 50 x 25 mesh o de policarbonato, con llavín eléctrico.
Accesorios electricos y abastecimiento hídrico.	En el buque de entrada: prevista tomacorrientes para trampa Uv y cortina de aire con encendido automático con la apertura de la puerta, prevista para instalación de llavín eléctrico por puerta, 1 apagador sencillo para luminaria. Antesala: prevista para un tomacorriente y un apagador sencillo para luminaria. Área producción: prevista para 4 tomacorrientes, y 2 tomas de agua, todos equidistantes y equilibradamente distribuidos. Perímetro: Prevista para una toma de agua.

CROQUIS DEL BANCO DE MULTIPLICACIÓN DUPLEX

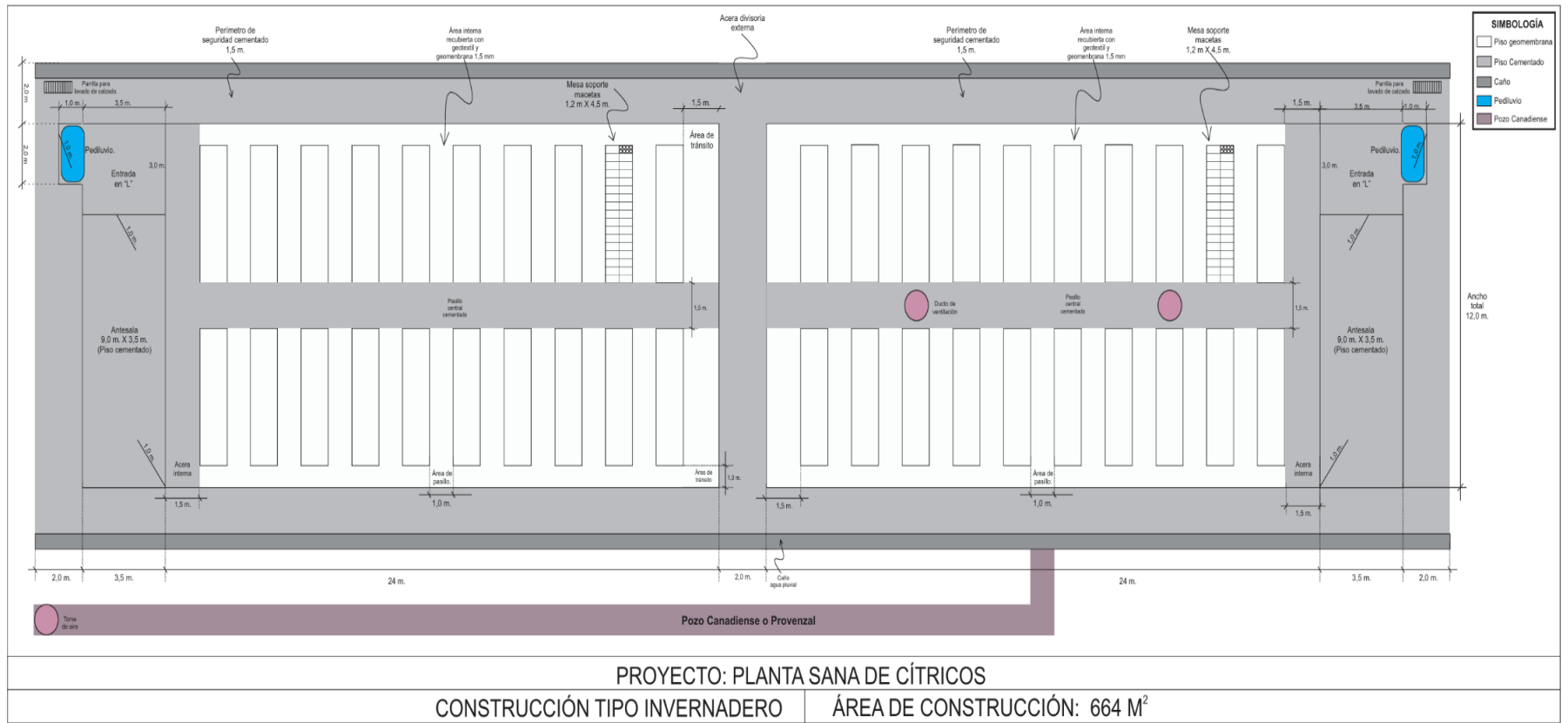


Figura 44. Croquis Banco de Multiplicación.

Programa de muestreo para certificación fitosanitaria

La certificación exige la verificación técnica de ausencia de Enfermedades Transmisibles por Injerto (ETI) en el material vegetal. El Cuadro 40 presenta un protocolo de tamizaje adaptado para el SPS.

El muestreo es más riguroso en bancos de Germoplasma y Fundación por su carácter de reservorios genéticos. Para el banco de Multiplicación, el alto volumen de plantas justifica un enfoque estadístico eficiente, por lotes, mediante distribución hipergeométrica, permitiendo ajustes en las pruebas considerando que el material que se utilizaría en Multiplicación únicamente debe ser material propagativo certificado y que los lotes deben renovarse cada 36 meses reduciendo factores de riesgo.

Cuadro 40. Propuesta de tamizaje para certificación en cítricos aplicable al SPS.

Bloque	Población (N)	Unidad Muestreo	Tamaño muestra (n)	Metodología muestreo	Detalles	Periodicidad-Frecuencia	ETI	Año 1	Año 2	Año 3
B.Germoplasma	104	Planta	21	Compuesto al azar por grupos de 5 plantas, 100% N.	El 100% de la población debe ser muestreada bianualmente	Cada 2 años	HLB	0	21	0
B. Fundación	208	Planta	42	Compuesto al azar por grupos de 5 plantas, 100% N.	El 100% de la población debe ser muestreada bianualmente	Cada 2 años	HLB	0	42	0
B. Multiplicación	680	Porta citropots (8 plantas-bandeja).	56	Muestreo hipergeométrico, al azar, cada muestra compuesta por tejido de las 8 plantas de la bandeja.	Nivel de aceptación de riesgo 5%, nivel de confianza 95% . Muestreo anual.	Anual	HLB	56	56	56
B.Germoplasma	104	Planta	21	Compuesto al azar por grupos de 10 plantas, 100% N.	El 100% de la población debe ser muestreada bianualmente	Cada 2 años	Tristeza (VTC), Clorosis Variegada (CVC), Citrus Tatter Leaf	0	11	0
B. Fundación	208	Planta	42	Compuesto al azar por grupos de 10 plantas, 100% N.	El 100% de la población debe ser muestreada bianualmente	Cada 2 años	Tristeza (VTC), Clorosis Variegada (CVC), Citrus Tatter Leaf	0	21	0
B. Multiplicación	680	Porta citropots (8 plantas-bandeja).	56	Muestreo hipergeométrico, al azar, cada muestra compuesta por tejido de las 8 plantas de la bandeja.	Nivel de aceptación de riesgo 5%, nivel de confianza 95% . Muestreo anual.	Cada 2 años	Tristeza (VTC), Clorosis Variegada (CVC), Citrus Tatter Leaf	0	56	0
B.Germoplasma	104	Planta	21	Compuesto al azar por grupos de 10 plantas, 100% N.	El 100% de la población debe ser muestreada bianualmente	Cada 2 años	Exocortis (CEVd), Psorosis (CPsV), Cachexia-xyloporosis (CCaV-XYV)	0	11	0
B. Fundación	208	Planta	42	Compuesto al azar por grupos de 10 plantas, 100% N.	El 100% de la población debe ser muestreada bianualmente	Cada 2 años	Exocortis (CEVd), Psorosis (CPsV), Cachexia-xyloporosis (CCaV-XYV)	0	21	0
B. Multiplicación	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Exocortis (CEVd), Psorosis (CPsV), Cachexia-xyloporosis (CCaV-XYV)	0		0
B.Germoplasma	104	Planta	21	Compuesto al azar por grupos de 10 plantas, 100% N.	El 100% de la población debe ser muestreada bianualmente	Cada 2 años	Spiroplasma citri (Stubborn), Candidatus Phytoplasma aurantifolia (Escoba de bruja), Citrus leprosis (CiLV), Canker	0	11	0
B. Fundación	208	Planta	42	Compuesto al azar por grupos de 10 plantas, 100% N.	El 100% de la población debe ser muestreada bianualmente	Cada 2 años	Spiroplasma citri (Stubborn), Candidatus Phytoplasma aurantifolia (Escoba de bruja), Citrus leprosis (CiLV), Canker	0	21	0
B. Multiplicación	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Spiroplasma citri (Stubborn), Candidatus Phytoplasma aurantifolia (Escoba de bruja), Citrus leprosis (CiLV), Canker	0	0	0

Bienes operativos esenciales para el funcionamiento del SPS

Bancas de metal

Las bancas de metal serán construidas con tubo de aleación de aluminio para el marco principal, mientras la malla de 130 mm x 30 mm y sus soportes de acero galvanizado en caliente con una capacidad de carga de 50 kg/m². El número de bancas por bloque, dimensiones y cantidades por unidad se detallan en el Cuadro 41.

Cuadro 41. Cantidad de bancas porta macetas requeridas para el proyecto SPS.

Unidad	Cantidad	Dimensiones
B.Multiplicacion	40	1.2 m. (ancho) x 4.5 m. (largo) x 0.7 m. (alto).
B. Germinacion y desarrollo	12	1.2 m. (ancho) x 4.5 m. (largo) x 0.7 m. (alto).
B. Indexación	4	0.6 m. (ancho) x 2.25 m. (largo) x 0.7 m. (alto).
B. Cuarentena	8	0.6 m. (ancho) x 2.25 m. (largo) x 0.7 m. (alto).
Total		

Sustratos y maceteras

El sustrato por utilizar es de corte fino con perlita para uso en tubete, y medio grueso para relleno de macetas y “*citropots*”. Las cantidades de sustrato para cada unidad, volumen mínimo requerido y otras especificaciones se detallan en el Cuadro 42.

Cuadro 42. Cantidad de sustrato requerido para el SPS.

Unidad	Sustrato mínimo requerido (m ³)	Tipo de sustrato	Total (incluye 20% extra por compactación)	m ³ /bulto	Bultos totales	30% para inventario de seguridad
Bloque de Indexación.	0.63	Fino	3.348	0.2	16.74	22
Banco Germinación y Desarrollo de Propágulos.	2.16	Fino				
Banco de Germoplasma.	3.9	Medio-Grueso				
Banco de Fundación.	7.9	Medio-Grueso	50.76	0.2	253.8	330
Banco de Multiplicación.	30.5	Medio-Grueso				

La correcta selección de macetas es un factor crítico para el éxito del proyecto. Dada la ausencia de oferta nacional que cumpla con los requisitos del SPS, estos contenedores deben importarse mediante proveedores especializados en insumos para invernaderos. Estas macetas destacan por su:

- Durabilidad y reutilización.
- Facilidad de manipulación.
- Eficiencia en procesos de limpieza y desinfección.

Complementariamente, se incluirán 5 contenedores plásticos de 650 litros para optimizar la preparación de sustratos. Las cantidades exactas se especifican en el Cuadro 43.

Cuadro 43. Cantidad de contenedores requeridos en el SPS.

Tipo de contenedor	Cantidad mínima requerida	30% para inventario de seguridad.
Macetas 38 L air-pot	312	374
Tubetes 0,15 L.	18600	22320
Porta-tubetes	155	186
Cajón plástico	4	5
Citropot 2,8 L	10880	13056
Porta-citropots	1360	1632

Estrategias para la autosuficiencia operativa del SPS

Sistema de captación de agua de lluvia

El Centro Mesoamericano de Desarrollo Sostenible del Trópico Seco (CEMEDE) ha consolidado experiencia en el diseño y construcción de reservorios, conocimiento aplicado en la propuesta para el SPS (ver Figura 45). Este diseño se fundamenta en proyectos previos ejecutados en comunidades como Isla de Venado, en Puntarenas.

El dimensionamiento del reservorio (capacidad de 500 m³) y la estimación de costos se han determinado mediante modelado digital especializado, garantizando precisión técnica y eficiencia en la planificación de recursos.

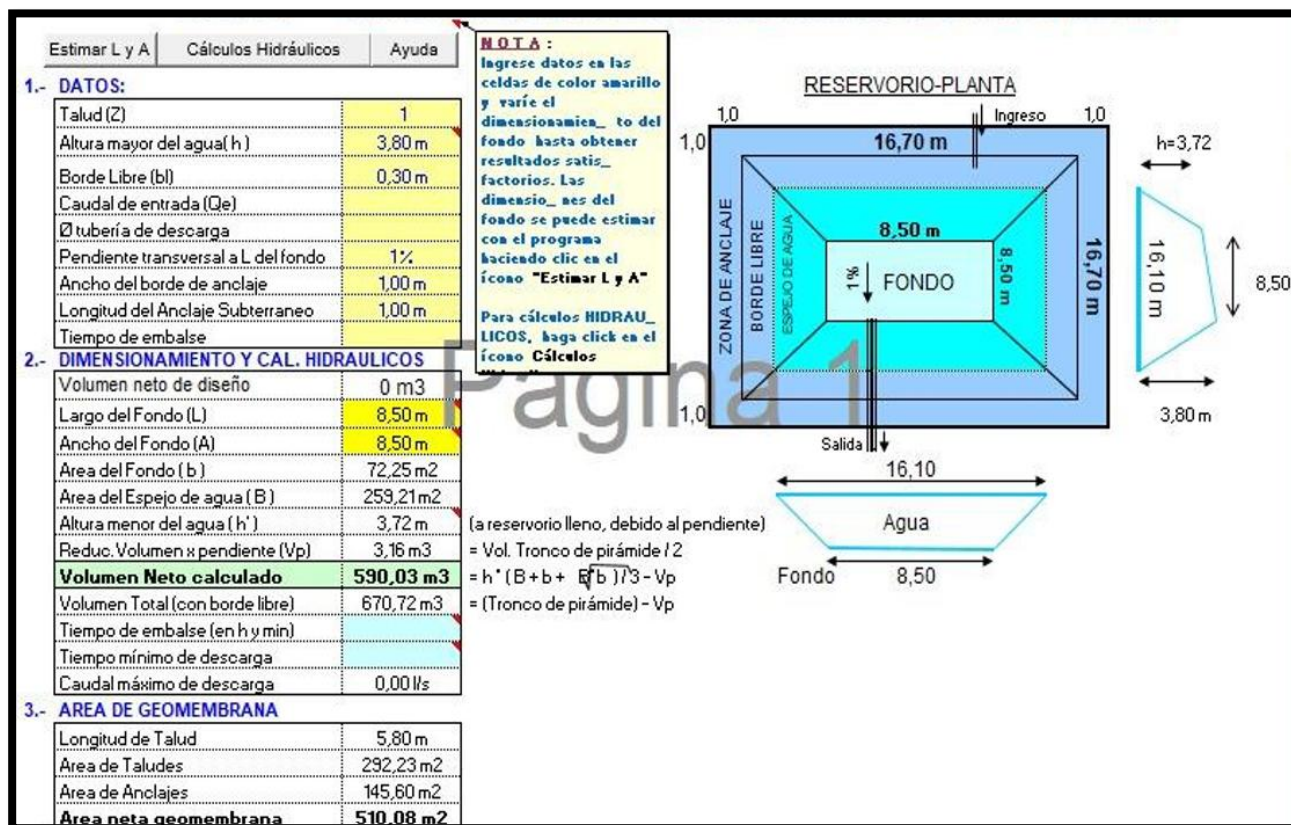


Figura 45. Diseño de reservorio revestido con geomembrana. Fuente: (CEMEDE, 2022).

Paneles solares

Para garantizar la sostenibilidad del Sistema de Producción de Plantas Sanas de Cítricos (SPS), se plantea una colaboración con cooperativas de electrificación rural (Coopelesca o Coopeguanacaste), reconocidas por su trayectoria en proyectos de desarrollo sostenible. Esta alianza se estructuraría en dos componentes clave:

- Demostración y capacitación: el SPS operará como centro piloto para exhibir tecnologías sostenibles aplicadas a la producción en invernaderos, dirigido a

productores, académicos y visitantes, destacando los beneficios de un sistema eficiente y ambientalmente responsable.

- Autosuficiencia energética: el diseño del SPS incorpora soluciones de eficiencia energética, como iluminación LED, sistemas automatizados de control climático (ventanas cenitales) y fertirriego.

Sistema de agricultura de precisión para fertirriego con IoT

El sistema de fertirriego propuesto incorporará tecnología de internet de las cosas (IoT), representando un avance significativo en los sistemas de fertirriego localizado de alta frecuencia. Esta innovación tecnológica ofrece ventajas clave:

- Optimización de recursos: permite una gestión más eficiente del agua y nutrientes.
- Precisión agronómica: facilita la aplicación exacta según requerimientos del cultivo.
- Control automatizado: posibilita el monitoreo y ajuste remoto de los parámetros de riego.

Pozos canadienses

Los pozos canadienses (ver Figura 46) constituyen un sistema de climatización pasiva que utiliza la inercia térmica del subsuelo para regular la temperatura del aire. Este mecanismo opera mediante una red de tuberías subterráneas (1,5 a 3 m. de profundidad) que permite:

- En invierno: precalentamiento del aire de ventilación mediante transferencia de calor desde el suelo.
- En verano: enfriamiento natural del aire por disipación térmica en el subsuelo.

Según Aguirre y Ordoñez (2019), este sistema aprovecha la estabilidad térmica característica de las capas subsuperficiales, ofreciendo una solución energéticamente eficiente para el control climático en invernaderos.

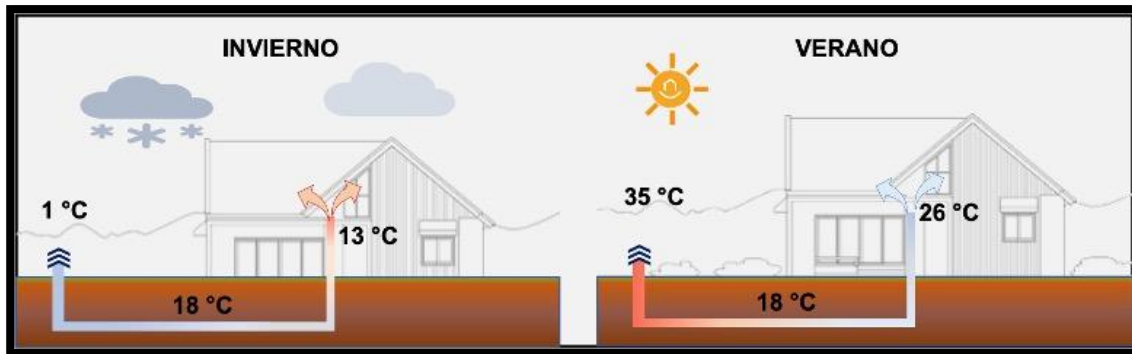


Figura 46. Acción de pozo canadiense en invierno y verano. (Vilssa.com: <https://vilssa.com/Climatizar-gracias-a-los-pozos-canadienses>).

Resumen de la capacidad operativa diseñada e insumos críticos para el Sistema de Producción de Plantas Sanas (SPS)

Nivel 0

- Oficina: capacidad para dos colaboradores, con un área de 21 m².
- Bodega: área de 70 m², con una capacidad de almacenamiento de 315 m³.
- Cuarentena: área total de 62 m² con un área efectiva de trabajo de 51 m². Capacidad: de 6 bancas de 0,6 m. x 2,25 m. x 0,7 m. (alto).

Nivel 1

- Indexación: área de 42 m². Producción máxima de 2100 plantines por unidad (fría y caliente), total 4200 plantines. Tubetes de 150 cm³ por plantín. Capacidad: 35 porta-tubetes (120 tubetes/porta-tubetes) y 4 bancas de 0,6 m. x 2,25 m. x 0,7 m. (alto).

Nivel 2

- Banco de Germoplasma: área de 524 m². Capacidad de 104 plantas en macetas de 38 L. Dos individuos por variedad a preservar.

- Bancos de Fundación: área de 1048 m² (dos recintos). Capacidad de 208 plantas en macetas de 38 L (104 por cada unidad).
- Banco de Producción de Semillas Sexuales: área de 1440 m². Capacidad de 44 árboles sembrados a suelo. Producción Incierta.
- Banco de Germinación y Desarrollo de Propágulos: área de 194 m². Capacidad de 14400 plantines en tubetes de 150 cm³, 120 porta-tubetes (120 tubetes cada uno), 525 tubetes por m² y 12 bancas de 1,2 m. x 4,5 m. x 0,7 m. (alto).

Nivel 3

- Bancos de Multiplicación: área de 664 m² en dos recintos en producción alterna y concurrente a la renovación. Capacidad de 10880 plantas multiplicadoras, 1360 porta-citropots (8 unidades cada uno) y 40 bancas de 1,2 m. x 4,5 m. x 0,7 m. (alto) para 132 000 yemas/año.

Obras de sostenibilidad

- Reservorio: capacidad de captación de agua de 500 m³.
- Pozo canadiense: en Banco de Multiplicación para manejo de temperatura.

Insumos: sustratos

- Sustrato turba con perlita fino (20% de más por compactación): para Banco de Germinación y Desarrollo de Propágulos 2,52 m³, y para Bloque de Indexación 0,76 m³. Para un total de 3,28 m³.
- Sustrato turba con perlita medio grueso (20% de más por compactación): para Banco de Multiplicación 36,55 m³, y para el Banco de Germoplasma y Fundación 14,23 m³. Para un total de 50,78 m³.

Gestión ambiental del SPS

El SPS implementará un plan de gestión de ambiental que priorice la reducción de residuos y el uso eficiente de insumos agrícolas.

Tipos de residuos generados y su manejo

- Residuos vegetales: se generaría una cantidad moderada de residuos vegetales (hojas, tallos, raíces) durante las actividades de poda. Estos residuos se utilizarán para elaborar compost y retornará al sistema como abono orgánico.
- Aguas residuales: las aguas residuales generadas serían mínimas, debido a la utilización de fertirriego por goteo.
- Envases de agroquímicos: se implementarían las Buenas Prácticas Agrícolas establecidas en los manuales del Servicio Fitosanitario del Estado (SFE).
- Otros residuos: la generación de plásticos, cartones, papel será mínima. Se implementarán estrategias de reducción, reutilización y reciclaje de materiales para reducir el envío desechos a vertederos sanitarios.

Prevención de la contaminación

El SPS no generará emisiones significativas de humo, olores o calor. Para reducir el impacto ambiental negativo se pretende lo siguiente:

- En cuanto al manejo integrado de plagas: se priorizarían técnicas de control biológico y cultural para minimizar el uso de plaguicidas convencionales.
- Uso responsable de insumos: se optimizaría el uso de fertilizantes y otros insumos agrícolas para evitar su deposición en el suelo o fuentes de agua.
- Mantenimiento preventivo de equipos: mediante el mantenimiento preventivo de los equipos operativos se evitarán fugas, derrames, y el reemplazo temprano.

Conclusiones

La investigación desarrollada demuestra que Costa Rica posee plena capacidad técnica, humana, tecnológica y financiera para implementar un programa de certificación de material propagativo de cítricos de nivel internacional. Sin embargo, el principal obstáculo identificado radica en la gestión institucional y política, cuya falta de visión estratégica ha impedido durante más de 15 años la implementación de soluciones efectivas para salvaguardar la citricultura nacional ante su inminente riesgo de colapso.

Como resultado de este estudio, se ha desarrollado una propuesta integral que incluye:

- Diseños de infraestructura adaptados a condiciones locales.
- Protocolos operativos estandarizados.
- Sistemas de certificación fitosanitaria.

Esta solución, aunque contextualizada a la realidad nacional, cumple rigurosamente con los estándares de los modelos de producción más avanzados a nivel global.

El documento sintetiza evidencia científica y conocimiento empírico de fuentes académicas, institucionales y del sector privado, priorizando información aplicable que facilita procesos decisorios y optimiza el uso de recursos y la sostenibilidad de un potencial proyecto.

El valor agregado del presente estudio radica en los siguientes puntos:

- Diagnóstico preciso de capacidades nacionales.
- Propuesta técnica viable y escalable.
- Síntesis de conocimiento especializado.
- Enfoque práctico para toma de decisiones.

Recomendaciones

La protección del patrimonio agrícola frente a amenazas fitosanitarias requiere, como condición fundamental, un marco regulatorio moderno, técnicamente robusto y científicamente fundamentado. El actual sistema normativo evidencia limitaciones sustanciales que comprometen su eficacia, lo que hace imperiosa la elaboración de un nuevo esquema regulatorio integral. Este esfuerzo debe articular la colaboración estratégica entre tres actores clave: las organizaciones productivas (con su conocimiento práctico), la academia (con su rigor técnico-científico) y las instituciones rectoras (con su capacidad regulatoria). La magnitud del desafío exige un desarrollo normativo prácticamente nuevo, asegurando así los estándares necesarios para una certificación vegetal confiable y adaptada a los retos fitosanitarios contemporáneos.

CAPITULO 2. DIAGNÓSTICO Y CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO NOSARA Y LA SUBCUENCA DEL RÍO LAJAS, HOJANCHA, GUANACASTE

Antecedentes

Contexto histórico-ambiental del cantón de Hojancha: de la colonización a la gestión comunitaria del territorio

El cantón de Hojancha, instituido formalmente en 1971, ocupa territorios que históricamente pertenecieron al dominio chorotega. Su configuración sociodemográfica moderna se consolidó a partir de 1910 con la migración de familias procedentes del Valle Central (especialmente de San Ramón, Palmares y Atenas), proceso que se intensificó hacia la década de 1930 (M. Méndez y García, 2017; Valverde *et al.*, 1995).

El periodo 1940-1960 marcó la transformación radical del paisaje hojancheño debido a la expansión ganadera, que para 1982 cubría el 78% del territorio cantonal, mientras los cultivos apenas representaban el 11% del uso de suelo. Esta dinámica productiva,

identificada ya en 1976 como principal causa de degradación ambiental (Valverde *et al.*, 1995), generó severos procesos erosivos. La crisis económica de los años ochenta, agudizada por el colapso de los mercados ganadero y cafetalero, provocó el éxodo del 57% de la población hacia regiones como el Caribe bananero o San Vito de Coto Brus (FAO, 1995).

La conjunción de factores ambientales y socioeconómicos desencadenó hacia los noventa una crisis hídrica sin precedentes, particularmente en la cuenca alta del río Nosara. Esta emergencia catalizó uno de los procesos más emblemáticos de gestión ambiental comunitaria en Costa Rica y el mundo: la creación de la Fundación Pro-Reserva Monte Alto (D. Méndez, 2022). El éxito de esta iniciativa se sustentó en:

- La densa red de parentesco y capital social acumulado.
- El liderazgo de figuras como el presbítero Luis Vara.
- La intervención estratégica de organismos como AGUADEFOR y CACH, que promovieron esquemas innovadores (PSA) y cultivos forestales (Teca, Melina).
- El apoyo técnico de instituciones internacionales (CATIE-MADELEÑA, AID-Corena 032), (Buaer y Campos, 1986; Madrigal *et al.*, 2012).

Este proceso histórico evidencia la capacidad de resiliencia territorial mediante la articulación de saberes locales, innovación institucional y gestión participativa de los recursos naturales que han obtenido como resultado la recuperación de la cobertura boscosa al 50% del territorio y el disfrute de más y mejores servicios ecosistémicos.

Auge y amenaza de la citricultura en Hojanca: Implicaciones socioeconómicas y ambientales

Frente a la crisis cafetalera, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y Coopepilangosta implementaron en Hojanca un programa de diversificación mediante el cultivo intercalado de naranjos como sombra para cafetales (J. B. Méndez y A. Campos, comunicación personal, 2022). Esta innovación agronómica, inicialmente concebida

como complemento económico, derivó en una reconversión productiva al demostrar la naranja mayor rentabilidad que el café. El proceso transformó el paisaje agrícola cantonal: de las 350 hectáreas actualmente dedicadas a cítricos, principalmente naranja, (Agencia de Extensión Agropecuaria Hojancha, 2024), aproximadamente dos tercios corresponden a antiguas áreas cafetaleras y ganaderas.

La citricultura hojancheña, desarrollada por 102 productores con parcelas promedio de 3 hectáreas (J. Salazar y Vásquez, 2024), alcanza un potencial productivo de 24 millones de frutas anuales (4,000 toneladas), generando ingresos estimados en ¢720 millones según los precios vigentes (¢40-¢60 por unidad). Estos indicadores consolidan a la actividad como eje de la economía local.

No obstante, la detección de Huanglongbing (HLB) en 2017 marcó un punto de inflexión. Para 2024, la totalidad de los huertos presentan infección, con grados variables del 10% al 100%, y aunque solo 15 hectáreas han requerido erradicación, la progresión epidemiológica amenaza con replicar los efectos devastadores observados en La Cruz, Guanacaste. Esta situación plantea un escenario crítico que trasciende lo económico: la posible desaparición de la citricultura podría reactivar la ganadería extensiva, práctica históricamente arraigada pero ambientalmente costosa. El presente estudio analiza precisamente estas dimensiones ambientales y socioeconómicas de la transición productiva, aportando elementos para una gestión territorial sostenible ante el desafío fitosanitario.

Marco teórico

Contexto biofísico del área en estudio

El cantón de Hojancha, enclavado en la península de Nicoya, constituye un referente nacional en conservación ambiental y gestión sostenible del territorio. Su configuración biofísica integra un mosaico de ecosistemas protegidos bajo diversas figuras de manejo que reflejan su valor ecológico:

La Zona Protectora Monte Alto, núcleo del sistema de áreas protegidas locales, ha sido galardonada con múltiples reconocimientos internacionales, desde la Medalla de Oro Guayacán (1996) hasta su declaración como caso ejemplar de manejo forestal sostenible por la FAO (2016), evidenciando décadas de gestión ambiental exitosa (Méndez, 2022). Este sistema de conservación se complementa con el Refugio Nacional de Vida Silvestre Camaronal, santuario clave para la reproducción de tortugas marinas; el Área Protegida Privada Dos Cascadas; el estratégico Corredor Biológico Hojancha-Nandayure; y el innovador modelo de Bosque Modelo Chorotega.

Desde el cambio de milenio, Hojancha ha consolidado un modelo de gobernanza ambiental basado en la valoración comunitaria de servicios ecosistémicos, particularmente:

- La seguridad hídrica para consumo humano y productivo.
- La recuperación de biodiversidad.
- El desarrollo de actividades ecoturísticas.

Climatológicamente, el cantón presenta dos zonas de vida predominantes: bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo premontano (Méndez y García, 2017). Las condiciones climáticas se caracterizan por una precipitación media anual de 2,799 mm, con máximos históricos en octubre (571 mm), y temperatura promedio de 26°C (Elaboración propia con datos provistos por la oficina regional del MINAE, Hojancha, 2024). El sistema hidrográfico, articulado alrededor de la cuenca del río Nosara y sus afluentes (Lajas, Ora), desemboca en el Pacífico, mientras que cuencas menores como Blanco y Camarón vierten al golfo de Nicoya, conformando una red hídrica vital para la región.

Caracterización morfométrica de una cuenca hidrográfica: fundamentos para la gestión integral del territorio

El estudio morfométrico de cuencas hidrográficas representa un pilar fundamental para la comprensión de los sistemas hidrológicos y su interacción con los componentes ecológicos y antropogénicos. Este análisis integral, que considera variables como área, perímetro, pendiente, densidad de drenaje y factor de forma, permite establecer relaciones sistémicas entre la estructura física de la cuenca y su funcionamiento hidrológico-ecológico (Ramírez-Granados *et al.*, 2021).

La morfometría fluvial proporciona información crítica sobre tres dimensiones esenciales:

- La dinámica hidrológica, incluyendo procesos de infiltración, escorrentía y generación de caudales.
- La configuración de hábitats acuáticos y terrestres.
- La vulnerabilidad del territorio ante amenazas naturales.

Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se define como un sistema territorial abierto y dinámico delimitado por una línea divisoria de aguas. En este sistema, los flujos de escorrentía superficial convergen hacia un punto común, generalmente de menor altitud, impulsados por la gravedad. Dicha convergencia se produce a través de una red jerarquizada de cauces que incluye ríos, quebradas y arroyos, los cuales confluyen en un cauce principal que da nombre a la cuenca (Adamo *et al.*, 1989; Ibañez Asensio *et al.*, 2011; Melville, 1997; Trujillo *et al.*, 2010).

Las cuencas hidrográficas presentan patrones de drenaje diferenciados que permiten su clasificación en cuatro tipos fundamentales (Faustino y Jiménez, 2000):

- Exorréicas (flujo hacia cuerpos receptores externos).
- Endorréicas (convergencia a depresiones internas).

- Arréicas (pérdida por evaporación/infiltración).
- Criptorréicas (drenaje subterráneo predominante).

Más allá de su caracterización física, es fundamental comprender la cuenca hidrográfica como un sistema complejo donde interactúan componentes políticos y socioeconómicos con el medio natural. Como señala Adamo *et al.* (1989), la cuenca no puede reducirse a una mera descripción geomorfológica; es preciso integrar las dinámicas sociales y económicas que se desarrollan en su interior y que influyen directa o indirectamente en su funcionamiento.

Delimitación y sectorización de cuencas en unidades de estudio menores

Para facilitar el análisis y la gestión de los recursos hídricos, las cuencas hidrográficas pueden dividirse en unidades de estudio más pequeñas. Esta sectorización permite abordar la complejidad del sistema con mayor precisión, considerando las particularidades de cada zona.

Cuenca alta, media y baja

La hipsometría, entendida como la distribución de la superficie de una cuenca en función de la altitud, constituye un criterio fundamental para su caracterización. Siguiendo a Trujillo (2010) es posible establecer una clasificación hipsométrica que generalmente comprende las siguientes divisiones por categoría:

- Cuenca en tres divisiones, alta, media y baja: con altitudes de al menos 2500 msnm.
- Cuenca alta y baja: con altitudes de al menos 1000 msnm.
- Cuenca sin divisiones.: cuencas muy planas con alturas por debajo a los 1000 msnm, que dificultan la jerarquización.

Si bien la altitud es un criterio fundamental en la delimitación de las zonas de una cuenca hidrográfica, autores como Trujillo (2010) y Faustino y Jiménez (2000) argumentan que

dicha delimitación puede enriquecerse mediante la integración de otras variables. En este sentido, proponen considerar factores naturales como la pendiente, la vegetación o la geología, junto con factores socioeconómicos como la densidad poblacional, los usos del suelo y las actividades productivas. Esta perspectiva integral permite una comprensión más completa de la dinámica de la cuenca y sus particularidades.

Subcuenca

En el contexto de la organización jerárquica de una cuenca hidrográfica, la subcuenca constituye una unidad territorial de segundo orden. Se caracteriza por la confluencia de múltiples microcuencas, cuyas redes de drenaje convergen en un cauce secundario. Este cauce, a su vez, desemboca en el cauce principal que articula el sistema fluvial de la cuenca. En consecuencia, la cuenca hidrográfica se configura como la integración de diversas subcuencas que aportan al flujo principal (Ramakrishna, 1997).

Microcuenca

La microcuenca representa la unidad territorial de menor orden dentro de la estructura jerárquica de una cuenca hidrográfica. Se define por la presencia de una red de drenaje de escala reducida, compuesta principalmente por quebradas, arroyos y pequeños ríos (Ramakrishna, 1997). Estos cauces menores confluyen en un cauce secundario, contribuyendo al flujo de la subcuenca a la que pertenecen.

Parámetros morfodinámicos clave

El área y perímetro de la cuenca

El área de una cuenca hidrográfica se define como la proyección horizontal de toda la superficie terrestre drenada por un sistema fluvial que converge hacia un mismo cauce principal. Esta proyección, también denominada área de drenaje, representa la superficie total sobre la cual las aguas de precipitación son captadas y conducidas hacia un único punto de salida. Es importante destacar que el área de la cuenca se delimita por la línea

divisoria de aguas, la cual marca el límite topográfico entre cuencas adyacentes. La determinación precisa del área de la cuenca es fundamental para el análisis hidrológico, ya que permite cuantificar el volumen de agua recibido y su distribución en el territorio (Maidment, 1993).

Por su parte, el perímetro de una cuenca hidrográfica, también denominado línea divisoria de aguas, se define como el límite topográfico que la circunscribe. Esta línea delimita el área de captación de las aguas de precipitación que convergen hacia un mismo sistema de drenaje, ya sea el cauce principal de la cuenca o un cauce secundario en el caso de subcuencas o microcuencas. El perímetro actúa como una frontera hidrológica que separa la cuenca de otras cuencas adyacentes, garantizando la individualidad de cada sistema y la convergencia de los flujos hacia su propio punto de salida. La delimitación precisa del perímetro es esencial para la caracterización morfométrica de la cuenca y el análisis de sus procesos hidrológicos. (Maidment, 1993).

Factor de forma

El factor de forma es un indicador geométrico que influye en la respuesta hidrológica, desempeña un papel crucial en la comprensión de las interacciones entre los sistemas geomorfológico, ecológico y socioeconómico (Faustino y Jiménez Otárola, 2000; Gaspari *et al.*, 2012; Gravelius, 1914; Horton, 1932.; Trujillo *et al.*, 2010), que influyen y determinan aspectos como los siguientes:

- Tiempos de concentración de las aguas.
- Magnitud de crecidas.
- Procesos erosivos.
- Distribución de biota.
- Aptitud para usos antrópicos.

El factor de *forma* se puede cuantificar mediante diversos índices y coeficientes, como el índice de compacidad de Gravelius (K_c) o el factor forma de Horton (F), descritos en el

Cuadro 44. Estos índices permiten clasificar las cuencas según su forma y relacionar esta característica con su comportamiento hidrológico y su vulnerabilidad a los desastres naturales. Además, el análisis del factor de forma es esencial para la identificación de potencialidades y limitaciones en el aprovechamiento de los recursos naturales y la promoción del desarrollo sostenible (Faustino y Jiménez Otárola, 2000; Gaspari *et al.*, 2012; Gravelius, 1914; Horton, s. f.; Trujillo *et al.*, 2010).

Cuadro 44. Interpretación de los índices de forma de Horton (F) y coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc). Camino *et al.*, (2019).

PARÁMETRO	ECUACIÓN	INTERPRETACIÓN
Índice de compacidad Kc	$Kc=0.28 \times (P/\sqrt{A})$	Kc entre 1,00 - 1,25: Cuenca redonda a oval redonda.
		Kc entre 1,25 - 1,50: Cuenca de oval redonda a oval oblonga.
		Kc entre 1,50 - 1,75: Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga.
Factor de forma F	$F=A/L^2$	F > 1: Cuenca achatada, tendencia a ocurrencia de inundaciones y crecidas.
		F < 1: Cuenca alargada, baja susceptibilidad a las inundaciones y crecidas.

Análisis altimétrico y dinámica hidrológica en cuencas hidrográficas

La caracterización altimétrica mediante Modelos de Elevación Digital (MED) constituye un componente esencial para la comprensión integral de los sistemas fluviales (Shanghong *et al.*, 2014, Palaka y Sankar, 2016; Ramírez-Granados *et al.*, 2021). Esta aproximación metodológica, desarrollada a partir de técnicas geoespaciales avanzadas permite establecer relaciones sistémicas entre la topografía y los procesos eco-hidrológicos mediante:

- Modelación del relieve: generación de productos derivados como mapas de pendientes, orientaciones y formas del terreno, fundamentales para la evaluación de aptitud territorial.

- Delimitación bioclimática: identificación de zonas de vida y microclimas en función de gradientes altitudinales que modifican los regímenes térmicos e hídricos.
- Planificación territorial: base técnica para el ordenamiento de usos del suelo, gestión de riesgos y desarrollo de infraestructuras adaptadas a las condiciones topográficas.

La influencia topográfica en la distribución de radiación solar (Wilson y Gallant, 2000) genera patrones espaciotemporales que condicionan procesos críticos como la evapotranspiración, la formación de microclimas y la distribución de biota. No obstante, es preciso considerar las limitaciones inherentes a los MED, particularmente en lo concerniente a:

- Subestimación de la rugosidad superficial en áreas con cobertura vegetal densa o desarrollo urbano.
- Dificultades en la modelización precisa de flujos hídricos en pendientes suaves
- Simplificación de redes de drenaje en ambientes antropizados (Zhang Shanghong *et al.*, 2014).

La curva hipsométrica

La curva hipsométrica es una gráfica que muestra la relación entre la altitud y la superficie de una cuenca. Se crea a partir de las curvas de nivel y permite ver la proporción del terreno a diferentes alturas.

Esta curva ayuda a entender el relieve de la cuenca y cómo ha evolucionado. Su forma indica la pendiente media, la distribución de las elevaciones y la presencia de zonas planas o montañosas. También se relaciona con el ciclo de vida de la cuenca y los procesos de erosión que la han afectado a lo largo del tiempo (Aguirre, 2007).

Longitud y pendiente de la cuenca y el cauce principal

La longitud y la pendiente, tanto de la cuenca en su conjunto como del cauce principal, constituyen factores determinantes en la dinámica hidrológica y geomorfológica. Estas variables influyen en la velocidad y la dirección del flujo hídrico, así como en los procesos de erosión, transporte de sedimentos y morfogénesis del terreno (Palaka y Sankar, 2016).

La longitud del cauce principal afecta el tiempo de concentración de las aguas en la cuenca, mientras que la pendiente influye en la energía del flujo y su capacidad para erosionar, transportar sedimentos y generar formas de relieve. Asimismo, la pendiente de la cuenca en su conjunto condiciona la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo de los cauces (Aguirre, 2007).

La densidad de drenaje (Dd)

La densidad de drenaje ayuda a determinar qué tan bien drenada está una zona, lo que a su vez influye en las características del suelo, la compactación y la impermeabilización del terreno; como indicador de eficiencia fluvial, refleja la relación litología-clima-vegetación (Aguirre, 2007). Valores bajos están asociados a sustratos permeables y cobertura vegetal densa y valores altos son característicos de áreas con sustratos impermeables y escasa vegetación.

En general una Dd (Km/km²) menor a 1 es considerada baja densidad, 1-2 moderada, 2-3 alta, y mayor a 3 muy alta densidad (Gómez, 2020).

La densidad de drenaje (Dd) se calcula dividiendo la longitud total de los cauces (L) entre el área total de la cuenca (Ac): $Dd = L / Ac$. Este índice determina la capacidad de la cuenca para evacuar el agua superficial.

El tiempo de concentración hidrológico (Tc)

Representa el tiempo requerido para que el agua fluya desde el punto más alejado de una cuenca hidrográfica hasta su salida o punto de interés (como un desagüe o presa). Es un parámetro fundamental en el diseño de drenajes, estimación de crecidas y modelado hidrológico (Ibañez Asensio *et al.*, 2011; Trujillo *et al.*, 2010). Se considera como bajo un Tc menor a 1 hora, entre 1 a 6 h. como estándar, y mayor a 6 h como alto, que influye en la formación de picos de caudal o a la acumulación lenta pero progresiva del agua.

Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$T_c (\text{horas}) = 0.006x \left(\frac{\text{Longitud del cauce principal hasta la divisoria}}{\sqrt{\text{Pendiente media del cauce principal}}} \right)^{0.77}$$

Donde:

- Longitud del cauce principal hasta la divisoria: distancia horizontal desde la salida de la cuenca hasta el punto más alejado en la divisoria de aguas, siguiendo el cauce principal.
- Pendiente media del cauce principal: diferencia de elevación a lo largo del cauce, dividida por su longitud (adimensional, en metros por metro, m/m).

Balance hídrico para caracterización bioclimática

El balance hídrico en una cuenca hidrográfica puede definirse como un balance de masas entre entradas y salidas de agua del sistema o ciclo hidrológico de una zona climática. Holdridge (1987) postula que la biotemperatura (Tbio) y la precipitación son los principales factores de definición bioclimática.

El método de Holdridge provee un marco conceptual robusto para la estimación de evapotranspiración potencial (ETP) particularmente mediante la corrección de la temperatura cuando el promedio mensual de una zona supera los °C24.

La biotemperatura, según Holdridge (1987), representa el rango óptimo de temperatura (0°C - 30°C) para el desarrollo de las plantas. Fuera de este rango, el crecimiento vegetal se ve limitado. Este método distingue entre evapotranspiración real (ETR), que suma la evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas, y evapotranspiración potencial (ETP), que representa la evapotranspiración en condiciones óptimas de humedad en el suelo y cobertura vegetal de la unidad en estudio.

De acuerdo con Holdridge la ETP es el resultado de multiplicar la biotemperatura (T_{bio}) por una constante, de forma que ETP es igual a $T_{bio} \times 58.93$. Si se trabaja con temperaturas mensuales mayores a 24°C, se debe corregir la biotemperatura (T_{bio}) de la siguiente forma.

$$T_{bio} = t - \left[\left(\frac{3 * \text{grados lat}}{100} \right) * ((t - 24) * 2) \right]$$

Con la ETP y la precipitación (P) podemos obtener escorrentía (R) mediante el despeje de la siguiente ecuación (Gómez y Arellano, 2016):

$$P = R + ETP \pm \Delta S$$

Donde:

- La precipitación (P) constituye el input principal.
- La escorrentía (R) integra componentes superficiales y subsuperficiales.
- La evapotranspiración (ETP) combina procesos físicos y biológicos.
- Cambio de almacenamiento promedio anual de agua subterránea ΔS , se asume cero para el promedio de varios años.

Este método, reconocido por su simplicidad y adaptabilidad a zonas tropicales, integra variables climáticas y fisiológicas para evaluar la disponibilidad hídrica en ecosistemas naturales y agrícolas. El cálculo de ETP y otros componentes del balance hídrico se detalla en la página 2010.

Capacidad de uso de suelo

El marco normativo costarricense establece un sistema jerárquico de clasificación edáfica que evalúa la aptitud productiva de los suelos mediante ocho categorías principales (I a VIII), cada una definida por sus limitaciones intrínsecas y requerimientos de manejo para uso sostenible. Esta tipología, de carácter integral, considera variables como pendiente, profundidad efectiva, textura, drenaje y vulnerabilidad a procesos degradativos.

Clasificación de capacidad de uso del suelo según el Decreto Ejecutivo N° 23214-MAG-MIRENEM:

- Clase I: tierras con pocas o ninguna limitación para el uso agrícola, pecuario o forestal. Son suelos planos o casi planos, profundos, de textura media, bien drenados y sin riesgos de inundación.
- Clase II: tierras con leves limitaciones que reducen las opciones de uso o aumentan los costos de producción. Pueden tener relieve ligeramente ondulado, suelos profundos, texturas moderadamente finas o gruesas, y drenaje moderado.
- Clase III: tierras con limitaciones moderadas que restringen la elección de cultivos o aumentan los costos. Se requieren prácticas intensivas de manejo y conservación para cultivos anuales.
- Clase IV: tierras con fuertes limitaciones, aptas para vegetación semipermanente o permanente. Los cultivos anuales solo son posibles con prácticas muy intensivas de manejo.
- Clase V: tierras con severas limitaciones para cultivos. Su uso se restringe a pastoreo o manejo de bosque natural.

- Clase VI: tierras aptas para producción forestal y cultivos permanentes (frutales, café) con prácticas intensivas de manejo.
- Clase VII: tierras con severas limitaciones, aptas solo para manejo forestal o restauración natural.
- Clase VIII: tierras sin condiciones para la producción agropecuaria o forestal. Su uso se limita a la protección de la flora, fauna y recursos hídricos.

El sistema de clasificación incorpora dos niveles de detalle adicional:

- Subclases (indicadas con letras minúsculas) que especifican el tipo de limitación dominante (e: erosión, w: exceso hídrico, s: problemas de raíces)
- Unidades de manejo (identificadas numéricamente) que definen prácticas específicas para cada condición edáfica

Esta estructura multicriterio permite adaptar las decisiones de uso del territorio a las realidades biofísicas locales, constituyendo una herramienta técnica fundamental para la planificación agropecuaria, la gestión de riesgos ambientales y el ordenamiento territorial en Costa Rica. La rigurosidad metodológica del sistema ha permitido su adopción como referencia técnica en evaluaciones de capacidad de carga productiva y estudios de impacto ambiental a nivel nacional.

Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica mediante el modelo RUSLE

La erosión edáfica, entendida como el proceso de desagregación y transporte de partículas del suelo por agentes exógenos, representa uno de los principales desafíos para la sostenibilidad de los sistemas agro-productivos a nivel global. Entre sus diversas manifestaciones, la erosión hídrica destaca por su impacto significativo en la pérdida de suelos fértiles, particularmente en regiones tropicales con patrones pluviométricos intensos (Luvai *et al.*, 2022). Este fenómeno resulta de la interacción compleja entre factores naturales y antropogénicos, donde destacan:

- Variables climáticas: la energía cinética de las precipitaciones y su intensidad determinan la capacidad erosiva inicial (Kouli *et al.*, 2009).
- Características topográficas: la longitud y gradiente de pendiente influyen directamente en la velocidad y volumen de escorrentía (Thlakma *et al.*, 2018).
- Propiedades edáficas: la textura, estructura y contenido de materia orgánica condicionan la resistencia del suelo a los procesos de desagregación (Malleswara *et al.*, 2005).
- Intervención antrópica: prácticas como el cambio de uso del suelo y métodos de labranza inadecuados pueden exacerbar los procesos erosivos naturales (Luvai *et al.*, 2022).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, siglas en inglés) constituye una herramienta cuantitativa ampliamente validada para estimar pérdidas edáficas anuales (González, 1991). Su formulación matemática:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Donde:

- A: Pérdida de suelo anual ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).
- R: Índice de erosividad pluvial ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$).
- K: Factor de erodabilidad del suelo ($t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$).
- LS: Factor topográfico combinado (adimensional).
- C: Factor de cobertura vegetal (adimensional).
- P: Factor de prácticas conservacionistas (adimensional).

El análisis paramétrico de cada uno de los factores que componen la fórmula RUSLE se detalla a continuación:

- Erosividad pluvial (R): cuantifica la energía cinética de las precipitaciones y su capacidad para iniciar procesos erosivos. Su cálculo considera la intensidad y distribución temporal de las lluvias (González, 1991).

- Erodabilidad (K): representa la vulnerabilidad intrínseca del suelo, determinada por sus propiedades fisicoquímicas. Suelos arenosos con baja cohesión muestran valores elevados (Renard *et al.*, 1997).
- Factor topográfico (LS): integra los efectos combinados de la longitud (L) y pendiente (S) del terreno sobre la acumulación de escorrentía (Barrios, 2000).
- Cobertura vegetal (C): refleja el efecto protector de la vegetación mediante la interceptación de lluvia y reducción de escorrentía (Lianes *et al.*, 2009).
- Prácticas conservacionistas (P): evalúa la eficacia de técnicas como terrazas o cultivos en contorno, pudiendo reducir las pérdidas hasta en un 80% (Jahun *et al.*, 2015).

La aplicación del modelo RUSLE requiere una calibración cuidadosa de parámetros locales, particularmente en lo concerniente a:

- Patrones pluviométricos regionales.
- Caracterización detallada de unidades edáficas.
- Evaluación precisa de usos del suelo y prácticas agrícolas.

Esta aproximación metodológica permite no solo cuantificar las pérdidas actuales, sino también evaluar escenarios potenciales bajo diferentes estrategias de manejo, constituyendo una herramienta valiosa para la planificación conservacionista y el ordenamiento territorial sostenible.

Sistema de información geográfica en la gestión de cuencas hidrográficas

En el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica, QGIS y ArcGIS representan las soluciones tecnológicas más relevantes para el procesamiento y análisis de información geoespacial. QGIS, como sistema de código abierto desarrollado bajo la filosofía de software libre, ha emergido como una alternativa competitiva frente a ArcGIS, la solución propietaria desarrollada por Environmental Systems Research Institute (Esri).

Estas plataformas ofrecen capacidades avanzadas para (Moyroud y Portet, 2018):

- Visualización y representación cartográfica profesional.
- Análisis espacial multivariado.
- Gestión integral de bases de datos geográficas.
- Modelización de procesos territoriales.
- Automatización de flujos de trabajo geoespaciales.

QGIS destaca particularmente por su ecosistema de desarrollo colaborativo, que incluye:

- Una comunidad global de usuarios y desarrolladores.
- Un repositorio extenso de “*plugins*” para funcionalidades especializadas.
- Recursos formativos accesibles en múltiples plataformas digitales.
- Actualizaciones periódicas que incorporan avances tecnológicos.

ArcGIS, por su parte, mantiene su posición como estándar industrial gracias a:

- Su integración con productos complementarios del ecosistema ESRI.
- Herramientas avanzadas de análisis espacial.
- Soluciones empresariales escalables.
- Soporte técnico especializado.

La elección entre ambas plataformas debe considerar factores como:

- Requerimientos técnicos específicos del proyecto.
- Recursos económicos disponibles.
- Capacitación del personal.
- Necesidades de interoperabilidad.
- Escalabilidad requerida.

Esta diversidad de opciones en el mercado de SIG permite a los profesionales de la geo-información seleccionar la herramienta más adecuada para cada contexto operativo, garantizando así la optimización de recursos y la calidad de los resultados geoespaciales.

Marco Metodológico

Enfoque y tipo de investigación

Diseño metodológico integrado para el análisis de sistemas citrícolas en cuencas hidrográficas

Este estudio emplea un enfoque metodológico mixto que articula técnicas cuantitativas y cualitativas, permitiendo una evaluación multidimensional de la relación entre la actividad citrícola y las dinámicas hidrológicas en el contexto de las cuencas seleccionadas. La integración sistemática de ambos abordajes facilita la triangulación de datos y la generación de conocimiento con mayor validez ecológica y aplicabilidad práctica.

Componente cuantitativo

El análisis morfométrico integral comprende la evaluación de parámetros fundamentales para la caracterización hidrológica:

- Variables geométricas: área, forma y perímetro de cuenca.
- Atributos topográficos: rangos altitudinales, pendiente media y longitud del cauce principal.
- Indicadores de drenaje: densidad de red hidrográfica y tiempo de concentración.
- Parámetros biofísicos: regímenes termo-pluviométricos, balances hídricos y tasas de erosión.

Estos indicadores, procesados mediante herramientas SIG y modelos matemáticos, proporcionan una base objetiva para evaluar la capacidad de carga ecológica del territorio y su relación con los sistemas productivos.

Componente cualitativo

La investigación incorpora técnicas etnográficas adaptadas al contexto socio-ecológico:

- Observación participante sistemática sobre unidades productivas de la zona en estudio.
- Entrevistas semiestructuradas y encuestas con actores clave (Taylor y Bogdan, 1987), incluyendo:
 - Representantes institucionales (SINAC, MINAE, MAG).
 - Liderazgos comunitarios (Coopepilangosta, Liga Comunal del Agua).
 - Productores citrícolas con diversos perfiles tecnológicos.
 - Análisis documental de fuentes primarias y secundarias.

La sistematización sigue los principios de Jara (1994), garantizando rigor en la organización y análisis de datos cualitativos. Este abordaje permite comprender las percepciones, prácticas adaptativas y conflictos socioambientales asociados a la actividad citrícola.

La convergencia e integración de métodos facilita:

- La validación cruzada de hallazgos mediante triangulación de información.
- La identificación de relaciones causa-efecto en el sistema socio-ecológico.
- La generación de escenarios prospectivos para la gestión sostenible.
- El desarrollo de recomendaciones técnicamente sólidas y socialmente pertinentes.

Marco espacial y temporal

El área de estudio comprende dos unidades hidrológicas estratégicas:

Cuenca alta del río Nosara (CarNs)

CRTM05 (EPSG: 5367):

- Latitud: 338373.7927 m a 1106089.6212 m.
- Longitud: 348412.4761 m a 1114588.3193 m.

Subcuenca del río Lajas (SrLj)

CRTM05 (EPSG: 5367):

- Latitud: 338323.7867 m a 348412.4760 m.
- Longitud: 1095448.5631 m a 1114588.31930 m.

Estos límites, ilustrados en la Figura 47, fueron definidos considerando:

- Criterios geomorfológicos naturales.
- Relevancia socioeconómica de la actividad citrícola.
- Homogeneidad ecológica dentro del Área de Conservación Tempisque.

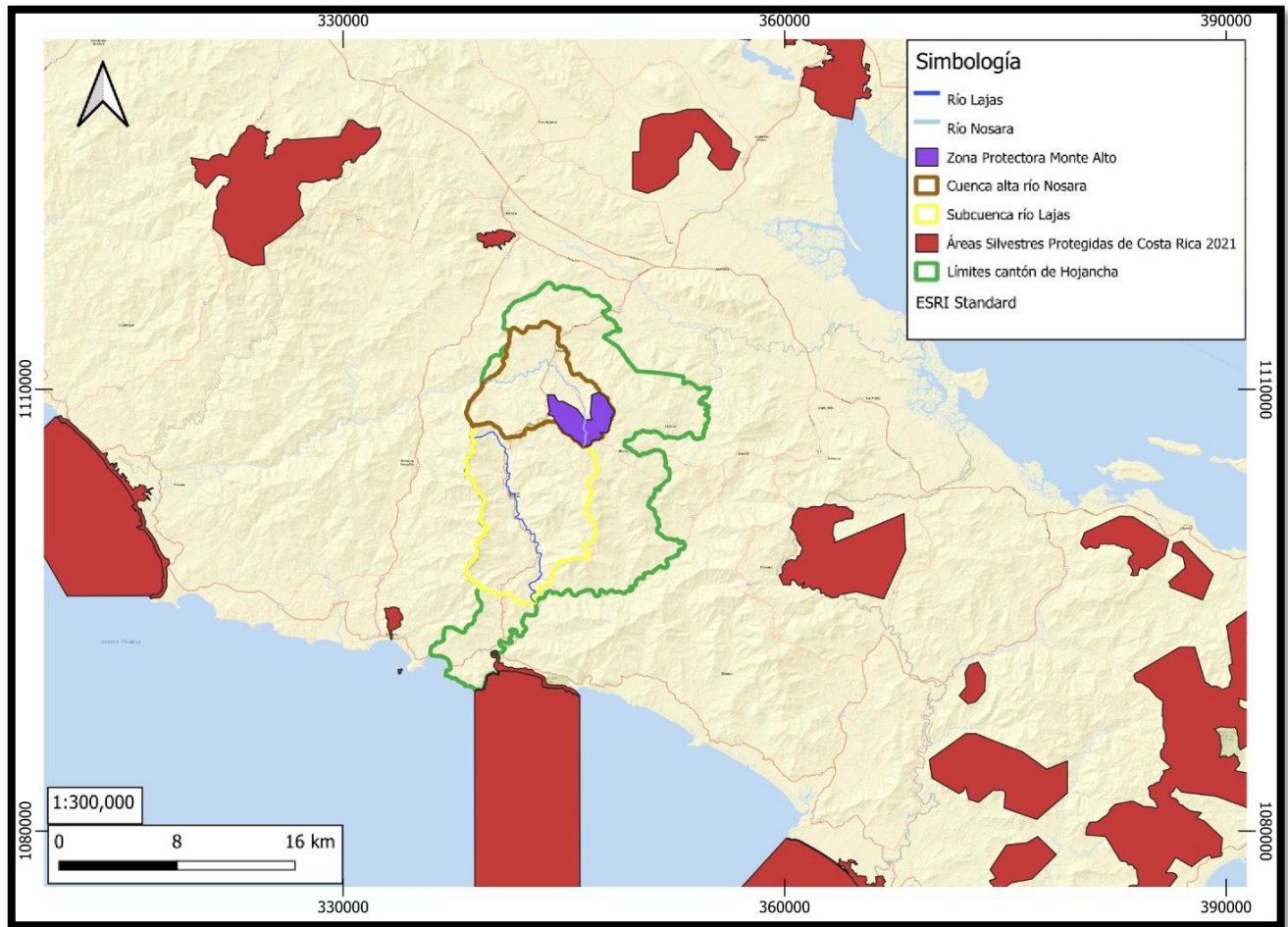


Figura 47. Ubicación área de estudio del proyecto, Hojancha, Guanacaste, Área de Conservación Tempisque. Elaboración propia.

El trabajo de campo se ejecutó entre junio y diciembre de 2024 (Ver Anexo 1), periodo que permitió capturar la variabilidad estacional en los parámetros hidrológicos y las prácticas agrícolas. Esta delimitación responde a los objetivos de investigación y a las particularidades del sistema socio-ecológico en estudio.

Sistematización de los objetivos

El presente trabajo se sustenta en una hipótesis central que emerge de la evidencia empírica la cual postula que la reducción significativa de la cobertura citrícola en Hojancha, Guanacaste, producto de la incidencia del Huanglongbing (HLB), generaría alteraciones críticas en el equilibrio socioambiental del territorio, con consecuencias particularmente severas, dada la vulnerabilidad inherente del sistema agro-productivo local.

La investigación se articula en torno a la siguiente pregunta central: ¿Qué efectos multidimensionales generaría la transformación del uso del suelo en Hojancha ante un escenario de declive acelerado de la citricultura por HLB, considerando tanto las repercusiones ambientales como los impactos socioeconómicos en una región con alta dependencia de este cultivo?

Para dar respuesta a este interrogante, se ha diseñado un marco metodológico estructurado en cuatro fases secuenciales (ver Cuadro 45), que integra:

- Enfoque epistemológico: combinando perspectivas descriptivas, correlacionales y explicativas (Finol, 2020; Reyes, 1999) para captar tanto las manifestaciones observables como las relaciones subyacentes en el sistema socio-ecológico.
- Estrategia investigativa: adoptando un diseño no experimental de métodos mixtos que permita:
 - Cuantificar variables biofísicas y económicas mediante técnicas estadísticas.
 - Interpretar dinámicas sociales y percepciones a través de aproximaciones cualitativas.
 - Establecer relaciones causales entre los diferentes componentes del sistema.
 - Infraestructura tecnológica: implementando plataformas de análisis espacial. especializadas: QGIS 3.34.1 como entorno principal de

procesamiento geoespacial y ArcGIS para operaciones específicas de parametrización avanzada.

Cada fase del proceso investigativo incorpora protocolos estandarizados de recolección de datos, instrumentos validados para captura de información, así como indicadores precisos de evaluación y control de calidad.

Mecanismos de triangulación metodológica

Este diseño integral permite no solo evaluar los impactos inmediatos del cambio de uso de suelo, sino también modelar escenarios prospectivos que informen la toma de decisiones tanto a nivel de políticas públicas como de gestión productiva local. La aproximación metodológica adoptada busca generar conocimiento aplicable que contribuya a la construcción de estrategias de adaptación resilientes ante la amenaza fitosanitaria del HLB.

Cuadro 45. Metodología para el diagnóstico y caracterización de la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas, Hojancha.

Conceptualización	Actividades	Instrumento de trabajo	Indicador
<i>Etapa 1: Definición del problema y alcance del estudio</i>			
Identificación y conceptualización de la problemática.	Interpretar y evaluar empíricamente la realidad natural y el contexto socioeconómico de la citricultura ante la amenaza de una enfermedad dañina y potencialmente devastadora.	Observación directa y participativa. Experiencia laboral y técnica.	Hipotesis de trabajo.
Delimitación del área de estudio.	Limitar espacial y temporal precisa del área de trabajo.	Sistemas de información geográfica, calendario académico 2024 de ITCR.	Localización geográfica y calendario de actividades.
Selección de las variables cuantitativas a evaluar.	Identificar y seleccionar variables morfológicas y biofísicas para la descripción, correlación y explicación holística e integral de los fenómenos ambientales y socioeconómicos concurrentes en el área de estudio.	Literatura especializada en gestión de cuencas hidrográficas.	Lista de variables cuantitativas específicas.
Selección de las variables cualitativas a evaluar.	Identificar y seleccionar variables ambientales y socioeconómicas para la descripción, correlación y explicación holística e integral de los fenómenos ambientales y socioeconómicos concurrentes en el área de estudio.	Literatura técnica ambiental y socioeconómica, entrevistas exploratorias a participantes institucionales, comunitarios y productivos clave.	Lista de variables cualitativas específicas. Lista de productores. Lista de participantes claves.
<i>Etapa 2: Recopilación de datos e información</i>			
Recopilación de datos e información cuantitativa relacionada a la gestión de cuencas hidrográficas.	Obtener y evaluar datos e información geográfica y meteorológica.	Datos satelitales, datos de estaciones meteorológicas, capas digitales: Atlas Digital de Costa Rica 2014, 2021, y de la oficina del SINAC de Hojancha.	Modelos de elevación digital, datos climáticos, mapas digitales: de división política, red de vías y ríos, clases taxonómicas y de uso de suelo, áreas de protección.
Recopilación de datos e información cualitativa de fuentes directas e indirectas relacionada a los antecedentes ambientales y socioeconómicos del área en estudio.	Obtener y evaluar datos e información del contexto biofísico, cultural y social de fuentes directas e indirectas.	Documentos de MIDEPLAN, Municipalidad de Hojancha, SINAC, MINAE, MAG, SFE, Coopepilangosta, Liga Comunal del Agua. Entrevistas y encuestas a participantes institucionales, comunitarios y del sector productivo identificados como claves	Cantidad y tipo de categorías de conservación relacionadas al área de estudio, cobertura boscosa, servicios ecosistémicos, índice de desarrollo social distrital, índice de desarrollo humano cantonal, valor público de la citricultura.

...Continuación del Cuadro 45.

<u>Etapa 3: Procesamiento de la información</u>			
Utilización de software especializado para el análisis descriptivo, correlacional y explicativo de los resultados.	Analizar el fenómeno en estudio mediante la identificación de tendencias, comparaciones e interrelaciones, con el objetivo de describirlo y comprenderlo.	Software QGIS 3.34, Arc GIS PRO y Microsoft Excel.	Mapas digitales.
Tabulación de datos e información por relevancia, confiabilidad, tendencia, ocurrencia y similitud	Identificar, agrupar y resumir datos e información relevante, descriptiva y explicativa del fenómeno en estudio.	Documentos y registros oficiales institucionales. Encuestas mediante Google Forms Whatsapp. Entrevistas directas preformuladas con enfoque narrativo.	Encuestas y entrevistas formuladas.
<u>Etapa 4: Reporte y evaluación de resultados</u>			
Discusión integral de los hallazgos.	Analizar integralmente mediante un enfoque reflexivo, flexible, inferencial y emergente la información procesada.	Experiencia y formación técnica, académica y laboral del autor y asesores.	Resultados y discusión del trabajo.
Puntualización de los principales hallazgos.	Resumir de manera concisa y efectiva los principales hallazgos.	Experiencia y formación técnica, académica y laboral del autor y asesores.	Conclusiones y recomendaciones.

Etapa 1: delimitación conceptual y operativa del estudio

La fase inicial de la investigación se centró en la caracterización sistemática de la problemática asociada al impacto potencial del Huanglongbing (HLB) en el sistema socio-ecológico de Hojancha. La formulación del problema investigativo emergió de la evidencia recogida sobre la triple amenaza que representa esta enfermedad: para la sostenibilidad económica de los productores locales, la estabilidad del mercado laboral regional y el equilibrio ecológico del territorio.

Estructuración metodológica

El diseño metodológico incorporó dos categorías de variables:

Variables cuantitativas

Se estableció una diferenciación metodológica entre:

- Variables derivadas: generadas mediante procesamiento geoespacial avanzado utilizando QGIS 3.34 y ArcGIS Pro, complementado con análisis estadístico en Microsoft Excel. Este conjunto incluyó indicadores morfométricos, parámetros edafoclimáticos y métricas de cambio de uso de suelo (ver Cuadro 46).
- Variables secundarias: obtenidas de fuentes oficiales como MIDEPLAN y SINAC que proporcionaron datos demográficos, económicos y de cobertura vegetal para el análisis contextual (Ver Cuadro 47)

Variables cualitativas

Se definieron a partir de indicadores perceptuales de actores clave, evaluación de prácticas productivas y el análisis de políticas institucionales. Esta etapa sentó las bases conceptuales para las fases subsiguientes de la investigación, garantizando la coherencia entre los objetivos planteados y las herramientas metodológicas empleadas. La rigurosa delimitación de variables permitió establecer un marco analítico capaz de captar tanto las dimensiones objetivas como las subjetivas del fenómeno en estudio.

Cuadro 46. Variables cuantitativas derivadas, instrumentos de procesamiento, datos requeridos y fuente de referencia.

Variable	Instrumento	Datos	Detalles	Fuente
Delimitación geográfica de la cuenca. Área y perímetro.	QGIS 3.34 (Herramientas r.fill.dir, r.watershed, r.watershedoulet, r.to.vect.)	Modelo de elevación digital alta resolución (hires) 12.5 m x 12.5 m. (MED) (archivo GeoTIFF). Capa digital (archivo shape) división política (CDDP).	Delimitación de la cuenca mediante acumulación y dirección de flujo .Funcion área (km2) y perímetro (km) en calculadora de campos.	Atlas digital de Costa Rica 2014 (ADCR 2014), Sitio Web oficial QGIS.
Elevación y pisos altitudinales.	QGIS 3.34 (Herramienta reclass). Excel (gráfico dispersión).	MED.	Diferencia entre la altura (msnm) mín. y máx, dividida por 80 m. para obtener al menos 11 pisos altitudinales y curva hipsométrica relacionando altura y área por cada piso.	Alaska Satellite Facility (ASF)- Data search Vertex. Sitio oficial ArcGIS.
Longitud y pendiente media de la cuenca y el cauce principal.	QGIS 3.34 (Herramienta GRASS r.slope.aspec, calculadora raster, estadísticas de zona).	MED, capa digital (shp.) de ríos de Hojancha (CDRH).	Funcion de longitud (km) en calculadora de campos. Pendiente media (porcentaje) de la cuenca obtenida a partir del MED. La pendiente media del cauce principal se obtiene al rasterizar (asignando valor 1) el cauce y multiplicarlo en la calculadora raster por el MED.	ASF y SINAC.
Densidad de drenajes (Dd) de la red fluvial	QGIS 3.34 (Herramientas de geoprocreso, GRASS)	MED, CDRH.	Dd (km/km2)= Longitud de toda la red fluvial/área de la cuenca.	ASF y SINAC.
Tiempo de concentración hidrológica (Tc).	QGIS 3.34 (calculadora de campos)	MED, CDRH.	Tc (hora): $0.006 * (\text{Longitud cauce principal hasta la divisoria/raiz cuadrada de la pendiente media (m/m) del cauce principal}) \text{ elevado } 0.77$.	ASF y SINAC Hojancha. Alvarez (2009).
Forma de cuenca: Coeficiente de forma (F) y de compacidad (Kc):	QGIS 3.34 (calculadora de campos).	MED, CDRH, CDDP.	$F = \text{Área (km}^2\text{)}/\text{Longitud al cuadrado}$. $Kc = 0.28 * \text{Perímetro}/\text{raiz cuadrada de área (km}^2\text{)}$	ASF y SINAC Hojancha. Horton (1932). Gravelius (1914).
Temperatura (T).	QGIS 3.34, Excel (Grafico de dispersión).	Datos de estaciones meteorológicas, MED, CDDP.	Ecuación de la pendiente de la recta obtenida a partir de la información de temperatura media anual y la altura de diferentes estaciones meteorológicas cercanas. Con la ecuación se obtuvo la temperatura estimada para cada altura de la cuenca (°C) en formato raster.	Office 365. ADCR 2014.
Precipitación (P).	QGIS 3.34 (calculadora de campos).	Datos de pluviómetro Reserva Monte Alto.	Acumulación de lluvia (mm). 12 años de precipitación media anual	SINAC.
Evapotranspiración media anual potencial (ETP).	QGIS 3.34 (calculadora de campos, calculadora de raster).	T (raster).	$ETP \text{ (mm)} = T_{bio} * 58,93$. Tbio es igual a T cuando T es menor a °C24. Si se trabaja con temperatura mensuales mayores a 24 °C, se corrige $T_{bio} = (t) - [(3 * \text{grados Lat}/100) * (t - 24)]$ elevado al cuadrado.	Holdridge (1947).
Escorrentía (R).	QGIS 3.34 (calculadora de campos, calculadora de raster).	ETP (raster), P.	$R \text{ (mm)} = P - ETR \pm \delta$ (Cambio de almacenamiento promedio anual de agua subterránea, se asume cero para el promedio de varios años).	Holdridge (1947).
Relación de ETP (RE).	QGIS 3.34 (calculadora de campos, calculadora de raster).	ETP (raster), P.	$RE \text{ (mm)} = ETP/P$.	Holdridge (1947).
Evapotranspiración media anual real (ETR).	QGIS 3.34 (calculadora de campos, calculadora de raster).	ETP (raster). RE (raster).	$ETR \text{ (mm)} = F * ETP$, donde $F = ETR/ETP$ Si: $0,45 < RE < 1,5$ entonces $F = 1,12 - 0,44 * RE$. Si: $0,0625 < RE < 0,45$ entonces $F = (7,46 * RE \text{ al cubo}) - (10,46 * RE \text{ al cuadrado}) + (4,63 * RE) + 0,273$.	Holdridge (1947).
Balance hídrico de la cuenca: la determinación de las entradas y salidas de agua.	QGIS 3.34 (calculadora de campos).	P. R. ETR. δ .	$P = R + EVT \pm \delta$	Holdridge (1947).
Cobertura de suelo (CS)	QGIS 3.34 (Herramientas de geoprocreso: unir, cortar, disolver...)	CDDP.	Elaboración propia. Categorías: bosque, café, caserío, cítricos, cultivo corto, forestal, pitahaya, potrero, urbano, ríos, vías.	ADCR 2014
Capacidad uso de suelo	QGIS 3.34 (Herramientas de geoprocreso, calculadora de raster).	CS. Capa de clases de Suelo (CCS).	Capas rasterizadas para su combinación. Clasificación de uso: Área protegida, urbano, uso correcto, sobreuso, subuso.	Centro de Investigación Agronómica, UCR. ADCR 2014.

...Continuación del cuadro 46

Erosión (pérdida de suelo promedio anual).	QGIS 3.34, ArcGIS Pro (Herramientas de geoproceto, GRASS, calculadora de raster)	MED, CDDP, CDSus, datos meteorológicos, capa de las cuencas delimitadas (CCD), capa de clasificación de uso (CCS)	Ecuación universal para el calculo de perdida de suelo revisada (RUSLE, por siglas en inglés). A (toneladas por hectárea por año)= FACTOR R * K * L * S * C * P.	Renard et al. (1997).
Factor de erosividad de la lluvia. Representa la energía cinética de la lluvia y su capacidad para desprender y transportar partículas de suelo (Factor R).	Cuadros en referencia bibliográfica.	Datos de erosividad de las lluvias para Costa Rica.	Valor obtenido por 10 años para estaciones metereológicas de influencia del área de estudio.	Calvo, J (1999).
Factor de erodabilidad del suelo. Indica la susceptibilidad del suelo a la erosión, en función de sus características físicas y químicas (K).	QGIS 3.34, (Herramientas de interpolación)	CDSus. Datos K obtenidos apartir de la textura y materia orgánica de suelo de calicatas de suelo en estudio. Arena (Ar). Limo (L) Arcilla (Ac), Carbono orgánico (Co), SN = 1 - (Ar/100)	$K = 0.2 + 0.3 * \exp[0.0256 * Ar * (1 - L/100) * (L/(Ac+L))^{0.3} * (1 - 0.25 * Co / (Co + \exp(3.72 - 2.95 * Co)))] * (1 - 0.7 * SN / (SN + \exp(-5.51 + 22.9 * SN)))$	Benavidez, et al. (2018).
Longitud de la pendiente (L(i,j) para RUSLE.	QGIS 3.34, ArcGIS Pro (Calculadora de raster).	MED.	$L(i,j) = ((A(i,j) + D^2)^{(m+1)} - A(i,j)^{(m+1)}) / (x * m * D^{(m+2)} * (22.13)^m)$ = área aportadora unitaria a la entrada de un pixel. D = tamaño del pixel (lado). x = factor de corrección de forma. m: Es el exponente que varía según la pendiente, como se explicó en la respuesta anterior.	Rengifo et al. (2022).
Inclinacion de la pendiente (S(i,j) para RUSLE.	QGIS 3.34, ArcGIS Pro (Calculadora de raster).	MED.	$S(i,j) = (10.8 \sin \beta(i,j) + 0.03 \text{ si } \tan \beta(i,j) < 0.09 \text{ (} 16.8 \sin \beta(i,j) - 0.5 \text{ si } \tan \beta(i,j) \geq 0.09)$ = ángulo medio de todos los subgrids en la dirección de mayor pendiente.	Rengifo et al. (2022).
Factor de cobertura y manejo de cultivos. Representa el efecto de la vegetación y las prácticas de manejo en la protección del suelo contra la erosión (C).	Cuadros en referencia bibliográfica.	Varlor C: para ríos, urbano, caserío y vías (0,001), bosque secundario (0.007), cítricos y pitahaya (0.003),café (0.08) Cultivo corto (0.34), potrero (0,2, pastizal natural pastoreado), forestal (0,037, bosque degradado)	Lianes referencia a su vez a Marchamalo (2004, 2007), FAO (1987), ICE (1999), Saborio (2002), Gómez (2002), CATIE (2003).	Rengifo et al. (2022). Lianes, et al. (2009).
Factor de prácticas de conservación. Refleja la influencia de las prácticas de conservación, como terrazas, zanjas de desviación y cultivos en contorno, en la reducción de la erosión (P).	No se aplica	No se aplica	No se aplica	No se aplica
Zonas de vida.	QGIS 3.34 (Herramientas de geoproceto, GRASS)	MED, CDRH, CCD		Holdridge (1947)

Cuadro 47. Lista de variables cuantitativas secundarias, instrumentos de procesamiento, datos requeridos, detalles y fuentes referenciales.

Variable	Instrumento	Datos	Detalles	Fuente
Categorías y áreas de protección.	Literatura y documentos oficiales.	Áreas silvestres protegidas (ASP) ubicadas dentro del área de estudio o bien, con influencia ecosistémica.	Enfoque en las zonas productoras de cítricos con influencia directa o a poca distancia de ASP.	Oficina Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) Hojancha.
Cobertura Boscosa.	Literatura y documentos oficiales.	Porcentaje de ocupación de bosque primario, secundario o en uso forestal en el área de estudio.	Especialmente en la cuenca alta del río Nosara hasta su unión al río Brujo y la subcuenca del río Lajas.	Oficina Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) Hojancha.
Índice de Desarrollo Social Distrital (IDSd)	Documentos oficiales	Clasificación de Hojancha en IDSd, y puntuación en eje económico.	Información contextualizador.	IDS, 2023. MIDEPLAN.
Índice de Desarrollo Humano Cantonal (IDHC).	Documentos oficiales	Clasificación en IDH, ajustado por desigualdad y puntuación en eje económico.	Información contextualizador.	IDHC, 2022. PNUD

El componente cualitativo del estudio (ver Cuadro 48) se diseñó para evaluar las percepciones y valoraciones que la población de Hojancha asocia a los servicios ecosistémicos y al rol de la citricultura en el desarrollo territorial sostenible. Esta aproximación metodológica permitió capturar dimensiones subjetivas fundamentales para comprender la relación sociedad-naturaleza en el contexto local.

La recolección de información cualitativa se estructuró en dos componentes complementarios:

- Revisión documental sistemática de estudios previos realizados en la cuenca del río Nosara, que proporcionó un marco de referencia sobre las dinámicas socioambientales históricas y los patrones de valoración comunitaria.
- Trabajo de campo etnográfico mediante entrevistas semiestructuradas con actores clave, encuestas representativas a residentes y observación participante en actividades comunitarias.

Esta combinación metodológica permitió contrastar las construcciones teóricas existentes con las percepciones actuales de la población, generando así una comprensión multidimensional de cómo los habitantes conceptualizan y valoran:

- Los beneficios ecosistémicos derivados de la citricultura.
- El impacto socioeconómico de esta actividad productiva.
- Las posibles consecuencias de su declive por el HLB.

El análisis cualitativo se enfocó particularmente en identificar tensiones, sinergias y “*trade-offs*” entre la conservación ambiental y el desarrollo económico, desde la perspectiva de los actores locales directamente afectados por los cambios en el uso del suelo.

Cuadro 48. Lista de variables cualitativas para la valoración socio ambiental, instrumentos de procesamiento, datos requeridos, detalles y fuentes de referencia.

Variable	Instrumento	Datos	Detalles	Fuente
Efectividad de manejo áreas de protección de la zona en estudio.	Documentos oficiales. Literatura. Entrevistas y encuestas.			Informantes clave.
Servicios ecosistémicos de las áreas naturales de Hojancha.	Documentos oficiales. Literatura. Entrevistas y encuestas.	Valoraciones institucionales y/o académicas de orden nacional o internacional. Experiencia empírica y cotidiana de informantes clave.	Valoración positiva de los informantes clave como poseedores del conocimiento tradicional, empírico, profesional en los límites del área de estudio.	Informantes clave.
Valoración pública de la citricultura en la zona de estudio.	Documentos oficiales. Literatura. Entrevistas y encuestas.			Informantes clave.

Perspectiva del investigador y metodología de recolección de datos

Como actor comprometido con los procesos socioambientales de Hojancha, donde ha desarrollado actividades profesionales y residido durante los últimos seis años, el autor ha adquirido un conocimiento profundo de las particularidades geográficas, culturales y sociales del cantón. Esta posición privilegiada como investigador-participante ha

permitido una aproximación metodológica que combina el rigor científico con la comprensión contextual del territorio.

Instrumentos de Investigación

- Encuesta estructurada: se implementó un cuestionario de 16 ítems cerrados aplicado a una muestra representativa de 40 actores clave, incluyendo productores agrícolas y agentes socioeconómicos relevantes. El instrumento, desarrollado mediante la plataforma “*Google Forms*”, permitió recopilar información sobre:
 - Percepción de amenazas ambientales prioritarias.
 - Impacto económico de la citricultura en el desarrollo cantonal.
 - Estrategias productivas alternativas ante posibles escenarios de declive cítrico.
 - Valoración comunitaria de los servicios ecosistémicos.

El procesamiento automatizado de respuestas facilitó la generación de análisis estadísticos descriptivos y la identificación de patrones de opinión predominantes.

- Entrevistas cualitativas: se condujeron entrevistas en profundidad con informantes clave (Cuadro 51), seleccionados mediante muestreo intencional basado en su trayectoria institucional (funcionarios públicos), liderazgo comunitario, conocimiento histórico del territorio e Influencia en la toma de decisiones locales.

La metodología de la entrevista combinó el enfoque narrativo: para reconstruir la memoria histórica del territorio, etnográfico: para comprender prácticas culturales asociadas al uso del suelo y biográfico: para capturar experiencias personales significativas.

Este diseño multimodal, fundamentado en los trabajos de Finol (2020), Jara (1994), Reyes (1999) y Taylor y Bogdan (1987), permitió generar datos ricos en contexto y significado, complementando y triangulando la información cuantitativa obtenida mediante las encuestas.

Procedimiento para la delimitación y caracterización morfométrica de las unidades hidrográficas de estudio

La definición precisa de los límites de la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas requirió un procesamiento sistemático de información geográfica, considerando su relevancia como principales áreas citrícolas del cantón de Hojancha. Estas unidades hidrológicas presentan características topográficas distintivas con pendientes que superan el 40% donde se constituye la divisoria de aguas entre las vertientes del golfo de Nicoya y el océano Pacífico.

Metodología de delimitación hidrográfica

El proceso de demarcación se implementó mediante técnicas de análisis espacial avanzado en QGIS, siguiendo este protocolo:

- Procesamiento del Modelo de Elevación Digital (MED):
 - Descarga del MED de 12.5m de resolución (“*Alaska Satellite Facility*”).
 - Corrección de sumideros mediante la herramienta *r.fill.dir* de GRASS (MED-FILL).
 - Generación del MED corregido en formato raster.
- Procesamiento de mapas digitales (Atlas Digital 2014), segmentación de mapas hasta nivel cantonal.

Proceso para delimitación de cuencas:

- Cálculo de dirección y acumulación de flujo de agua (*r.watershed*).
- Definición de cuencas mediante puntos de salida georreferenciados de los ríos Nosara y Lajas hasta el alcance de interés.
- Creación de mapa limitado al área de estudio: cuenca alta río Nosara y subcuenca de río Lajas.
- Conversión a formato vectorial (*r.to.vec*).
- Cálculo de parámetros geométricos (área, perímetro).

La caracterización de los sistemas de drenaje se realizó mediante:

- Segmentación de la red hídrica nacional (Atlas Digital 2014).
- Identificación del cauce principal mediante análisis de longitud.
- Cálculo de parámetros morfométricos:
 - Longitud y pendiente media del cauce (r.slope.aspect).
 - Densidad de drenaje.
 - Índices de forma y compacidad.
 - Tiempo de concentración.

La estratificación altitudinal se desarrolló mediante:

- Determinación de rangos de altura (mínimo-máximo).
- Reclasificación en 11 pisos altitudinales (intervalos de 80m).
- Clasificación altimétrica (r.reclass).
- Conversión a formato vectorial (r.to.vec).

Finalmente, la generación de la curva hipsométrica (con uso de Excel) para evaluación del estado evolutivo de las unidades de estudio (Strahler, 1952)

Este procesamiento metodológico permitió obtener una caracterización integral de las unidades de estudio, proporcionando la base geomorfológica necesaria para los análisis posteriores de relación entre sistemas productivos y dinámicas hidrológicas. Los resultados obtenidos constituyen insumos fundamentales para la evaluación de vulnerabilidades y potencialidades del territorio ante escenarios de cambio de uso de suelo.

Etapas 2: Estrategia de recolección y procesamiento de datos

El proceso de recopilación de información se estructuró mediante un enfoque multimodal que integró fuentes secundarias institucionales y datos primarios recolectados en campo. Las fuentes de información se categorizaron de la siguiente manera:

- Fuentes secundarias oficiales:
 - Datos meteorológicos e hidrológicos de estaciones locales.
 - Información geoespacial del Atlas Digital de Costa Rica 2014.
 - Registros agronómicos del INTA y CIA-UCR.
 - Bases de datos territoriales del SINAC regional.
 - Indicadores socioeconómicos del MIDEPLAN.

- Fuentes primarias:
 - Entrevistas en profundidad con actores clave.
 - Encuestas estructuradas a productores y residentes.
 - Observaciones de campo sistemáticas.

Esta combinación metodológica permitió triangular información cuantitativa y cualitativa para evaluar integralmente:

- Las condiciones biofísicas del territorio.
- Las dinámicas productivas citrícolas.
- La valoración social de los servicios ecosistémicos.
- Los impactos percibidos del HLB en el sistema socio-ecológico.

El protocolo de recolección garantizó la consistencia temporal y espacial de los datos, asegurando su interoperabilidad para los análisis posteriores.

Etapa 3: procesamiento de datos y modelización ambiental

La transformación de datos en información espacial

La conversión sistemática de datos brutos en capas de información geoespacial permitió generar representaciones cartográficas temáticas que facilitan el análisis integrado de las variables ambientales. Este proceso metodológico proporciona una base objetiva para la toma de decisiones estratégicas en gestión territorial.

Análisis pluviométrico.

La estimación de precipitación media anual (P) enfrentó limitaciones debido a la escasez de estaciones meteorológicas en la zona de estudio. Ante la inviabilidad de aplicar métodos de interpolación espacial convencionales por insuficiencia de datos, se adoptó como aproximación válida el promedio simple de los registros históricos (2012-2024) de la estación Monte Alto (10.01205°N, 85.40259°O), única fuente confiable dentro del área de estudio.

Modelización del balance hídrico

El balance hidrológico se calculó mediante la ecuación fundamental:

$$R = P - ETP \pm \Delta S$$

La variación de almacenamiento ΔS es considerada nula para promedios plurianuales, como en el presente caso.

Cálculo de evapotranspiración

- Precipitación (P): obtenida del promedio simple de datos de 12 años para la zona en estudio.
- Temperatura (t): se generó una capa *raster* mediante regresión lineal entre datos termométricos del Atlas Digital 2014 y el Modelo Digital de Elevación, validada con coeficiente de determinación (R^2).
- Evapotranspiración potencial (ETP): se aplicó el método de Holdridge con corrección por biotemperatura dado que la temperatura media mensual de la zona supera los 24°C:
 - $T_{bio} = t - [(3 \times \text{latitud (grados)}/100) \times (t - 24)]^2$.
 - $ETP = T_{bio} \times 58.93$.
- Evapotranspiración real (ETR): es igual a $F \times ETP$, donde el factor de corrección (F) se define en función de la relación, $RE = ETP/P$, donde si RE :

- $0.45 < RE < 1.5$, entonces $F = 1.12 - 0.44 \times RE$.
- $0.0625 < RE < 0.45$, entonces $F = 7.46RE^3 - 10.46RE^2 + 4.63RE + 0.27$.
- Por tanto, F también es el resultado, $F = ETR/ETP$

Cálculo de escorrentía (R):

La escorrentía se determina despejando la ecuación, $R = P - ETP \pm \Delta S$, una vez obtenido los otros valores.

Generación de capas de cobertura y aptitud edáfica

El proceso de caracterización territorial comprendió la elaboración sistemática de mapas temáticos mediante técnicas de geoprocésamiento avanzado. Para la cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas, se desarrolló una metodología en tres fases:

- Clasificación de cobertura vegetal:
 - Integración de imágenes satelitales de “*Google Earth*” como base cartográfica en QGIS.
 - Delimitación vectorial mediante fotointerpretación asistida.
 - Categorización en 12 clases de cobertura por criterios espectrales y morfológicos.
 - Codificación numérica para clasificación y análisis cuantitativo posterior
- Evaluación de capacidad de uso:
 - Adaptación de la capa oficial de capacidad de uso del Atlas Digital de Costa Rica 2014.
 - Conversión a formato raster mediante codificación numérica por clase.
- Integración de capas:
 - Superposición espacial mediante álgebra de mapas.
 - Operaciones raster de combinación ("calculadora raster").
 - Generación de matriz de compatibilidad uso-capacidad.

- El producto resultante constituye una herramienta analítica multidimensional que permite:
 - Evaluar el grado de adecuación entre uso actual y potencial del suelo.
 - Identificar áreas con conflictos de uso territorial.
 - Priorizar zonas para intervención conservacionista.
 - Fundamentar decisiones de ordenamiento territorial.

Esta aproximación metodológica combina rigurosidad técnica con aplicabilidad práctica, proporcionando insumos clave para la gestión sostenible del paisaje agro-productivo en estudio.

Evaluación de pérdida de suelo mediante el modelo RUSLE

El análisis de erosión hídrica para las cuencas del río Nosara y río Lajas se realizó mediante la implementación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), metodología ampliamente reconocida en la literatura científica para la cuantificación de procesos erosivos. El modelo se expresa mediante la relación multiplicativa:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Para efectos de clasificación se considera como erosión ligera valores entre 0-10 ton/ha/año, moderada para pérdidas entre 10 y 50, severa entre 50 y 200, y muy severa para valores mayores a 200 ton/ha/año (Rengifo *et al.*, 2022).

Procedimiento de cálculo:

Factor de erosividad (R):

Se determinó mediante valores de referencia de estaciones meteorológicas adyacentes (Calvo, 1999). El factor R se puede estimar de varias maneras dependiendo de la disponibilidad de datos:

- Índice de erosividad de la lluvia (EI30) $R = EI30 / 100$. Donde: EI30 se calcula a partir de la energía cinética de la lluvia y la intensidad máxima en 30 minutos. Se puede obtener de estaciones meteorológicas o de bases de datos globales como la del “*Global Rainfall Erosivity Database*” (GloREDA).
- Ecuaciones regionalizadas de Wischmeier ($R = \alpha * P^\beta$). Donde:
 - P es la precipitación media anual.
 - α y β son coeficientes que varían según la región. Se pueden obtener de estudios previos o de literatura especializada.

Factor de erodabilidad del suelo (K)

El factor K, que cuantifica la susceptibilidad intrínseca del suelo a los procesos erosivos, se calculó mediante la ecuación de Wischmeier y Smith, considerando las propiedades edáficas documentadas en las calicatas realizadas por el INTA en el área de estudio. Esta relación matemática integra los principales atributos físicos y químicos que condicionan la resistencia del suelo a la erosión hídrica, la fórmula utilizada en QGIS es la siguiente:

$$K = 0,2 + 0,3 * \exp [0,0256 * \text{Arena} * (1 - \text{Limo}/100) * (\text{Limo}/(\text{Arcilla}+\text{Limo})) ^{0,3} * (1 - 0,25*\text{Carbono orgánico} / (\text{Carbono orgánico} + \exp (3,72 - 2,95*\text{Carbono orgánico}))) * (1 - 0,7*SN / (SN + \exp(-5,51 + 22,9*SN)))]$$

Donde los parámetros edáficos considerados son:

- A: contenido porcentual de arena.
- L: contenido porcentual de limo.
- Ar: contenido porcentual de arcilla.
- CO: concentración de carbono orgánico.
- SN: factor de normalización calculado como $SN = 1 - (A/100)$.

Los valores resultantes del factor K ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$), que se expresan en toneladas de pérdida de suelo por hectárea por hora (tasa de desprendimiento y transporte de suelo), por hectárea por megajulio de energía de lluvia por milímetro de lluvia (representa

el poder erosivo de la lluvia), permiten estratificar el territorio según su vulnerabilidad natural a los procesos erosivos, constituyendo un insumo fundamental para la modelización espacial de la pérdida de suelo.

Factor topográfico (LS)

El factor LS, que cuantifica el efecto combinado de la longitud (L) y pendiente (S) del terreno sobre los procesos erosivos, se determinó mediante un modelo matemático que integra parámetros geomorfológicos derivados del Modelo Digital de Elevación (MED). Este factor adimensional se calcula mediante dos componentes fundamentales:

- Factor de Longitud de Pendiente (L): se empleó la formulación:

$$L = [(A(i,j) + D^2)^{(m+1)} - A(i,j)^{(m+1)}] / [x \times m \times D^{(m+2)} \times (22.13)^m].$$

Donde:

- A(i,j): área de contribución de flujo acumulado (m²) en la celda (i,j).
 - D: resolución espacial del MED (m).
 - m: exponente variable en función de la pendiente (0.2-0.6).
 - x: factor de dirección de flujo (1.0 para flujo unidireccional).
- Factor de Pendiente (S): se aplicó un modelo bifásico en función del gradiente:
 - $S(i,j) = 10.8 \times \sin\beta(i,j) + 0.03$ [para $\tan\beta(i,j) < 0.09$ ($\approx 5.14^\circ$)].
 - $S(i,j) = 16.8 \times \sin\beta(i,j) - 0.5$ [para $\tan\beta(i,j) \geq 0.09$ ($\approx 5.14^\circ$)].

Donde:

- $\beta(i,j)$: ángulo de pendiente en la celda (i,j) (en grados).
- $\tan\beta(i,j)$: tangente del ángulo de pendiente (adimensional).

Parámetros Clave:

- El área de contribución ($A(i,j)$) refleja la acumulación potencial de escorrentía.
- El exponente m ajusta la sensibilidad a la longitud según la pendiente.
- La resolución D condiciona la precisión del cálculo.
- La transición en 5.14° considera el cambio en dinámica erosiva.

Esta formulación permite modelar espacialmente la influencia topográfica en los procesos erosivos, considerando tanto el efecto acumulativo de la longitud de pendiente como el incremento no lineal de la energía del flujo con la pendiente. Los resultados se integraron al modelo RUSLE mediante operaciones de álgebra (calculadora *raster*) en entorno SIG.

Factor de cobertura y manejo (C)

El factor C , que cuantifica el efecto protector de la vegetación y las prácticas agrícolas sobre los procesos erosivos, se estableció mediante un protocolo sistemático de análisis espacial. La metodología implementada comprendió la asignación de valores de C adoptando coeficientes estandarizados adaptables a las condiciones locales del área de estudio respecto a características propias como fenología vegetal y tipo de agricultura, efectos estacionales (ver Cuadro 49).

Los valores del factor C , comprendidos entre 0 (protección máxima) y 1 (sin protección), reflejan:

- La capacidad de interceptación de lluvia por la cubierta vegetal.
- El efecto amortiguador de la vegetación sobre el impacto de las gotas.
- La influencia de los residuos vegetales en la reducción de escorrentía.
- El impacto de las prácticas de manejo en la estabilidad del suelo.

Este componente del modelo RUSLE resulta particularmente relevante en áreas agrícolas, donde las variaciones interanuales en los patrones de cultivo pueden modificar sustancialmente la vulnerabilidad del suelo a los procesos erosivos. La precisión en su determinación condiciona directamente la confiabilidad de las estimaciones de pérdida de suelo.

Cuadro 49. Valores C de referencia para diferentes coberturas utilizados en el estudio.

Cobertura	Valor C	Fuente
Bosque secundario	0.007	FAO, 1989 citado por Lianes, 2009.
Caserío	0.001	Rengifo, <i>et al.</i> 2022.
Urbano	0.001	Rengifo, <i>et al.</i> 2022.
Ríos	0.001	Rengifo, <i>et al.</i> 2022.
Vías	0.001	Rengifo, <i>et al.</i> 2022.
Pastizal natural pastoreado	0,2	Saborío, 2002; Gómez, 2002 y CATIE 2003 citado por Lianes, 2009.
Árboles frutales	0.003	Lianes, 2009.
Café	0.08	Marchamalo 2004, 2007 citado por Lianes, 2009.
Bosque degradado	0.037	Lianes, 2009.
Cultivo anuales	0.34	ICE, 1999 citado por Lianes, 2009.

El valor para árboles frutales se utilizó para el cultivo de pitahaya (siembra en postes), café y cítricos, el valor de bosque degradado para el cultivo forestal, y el de pastizales naturales pastoreados para potreros.

Factor prácticas de conservación(P)

El factor P, que cuantifica la efectividad de las medidas de conservación de suelos, no fue aplicado en el presente estudio debido a la ausencia documentada de sistemas estructurados de manejo conservacionista en la región de análisis. Esta determinación se fundamenta en diagnóstico de campo por medio de inspección sistemática del área de estudio, reconocimiento de ausencia de infraestructura de conservación identificable la falta de evidencia sobre implementación de prácticas organizadas. Por tanto, para este factor se consideró un coeficiente P asumido como 1 (valor neutro).

Esta situación refleja una oportunidad para futuras intervenciones de manejo sostenible de suelos en la región, particularmente en áreas con pendientes pronunciadas y alta susceptibilidad erosiva.

Proceso de valoración socioambiental de la citricultura en Hojancha: una perspectiva integral

El análisis de los servicios ecosistémicos asociados a la actividad citrícola en Hojancha se sustentó en un enfoque metodológico que combinó investigación documental y trabajo de campo sistemático. Esta aproximación permitió evaluar tanto las dimensiones objetivas como las percepciones sociales sobre el papel de la citricultura en el desarrollo territorial. Este procedimiento incluyó:

- Revisión de literatura especializada:
 - Análisis crítico de estudios previos sobre dinámicas productivas (Madrigal *et al.*, 2012).
 - Evaluación de modelos de desarrollo local (M. Méndez y García, 2017).
 - Sistematización de experiencias en gestión ambiental (D. Méndez, 2022).
 - Revisión de indicadores socioeconómicos (Ramírez, 2015; M. Salazar, 2003; MIDEPLAN, 2023).
- Investigación de Campo:
 - Aplicación de instrumentos cualitativos y cuantitativos.
 - Entrevistas en profundidad a actores estratégicos (ver Cuadro 50): funcionarios públicos sectoriales, líderes comunitarios con trayectoria reconocida y productores agrícolas representativos.
- Encuestas estructuradas a pobladores locales.

Enfoque analítico

La evaluación consideró tres dimensiones clave:

- Económico-Productiva: contribución al empleo rural, generación de ingresos familiares y encadenamientos productivos locales.

- Socioambiental: percepción comunitaria sobre servicios ecosistémicos, valoración de externalidades positivas/negativas e identificación de conflictos uso-conservación.
- Cultural-territorial: significado de la citricultura y sostenibilidad en la identidad local, vinculación de la tierra con prácticas tradicionales, el rol antropogénico en la configuración del paisaje.

Esta triangulación metodológica permitió construir una visión holística del sistema citrícola, superando aproximaciones fragmentarias.

Etapa 4. síntesis y presentación de resultados

La fase final de la investigación integra los hallazgos obtenidos mediante un enfoque multidimensional que articula:

- Análisis geoespacial:
 - Modelización cartográfica de parámetros hidrológicos y edafológicos.
 - Representación temática de variables climáticas.
 - Integración de capas de información territorial.
- Evaluación socioambiental, diagnóstico de la percepción comunitaria sobre:
 - Valoración económica de la citricultura.
 - Importancia de los servicios ecosistémicos.
 - Impacto percibido del cambio de uso de suelo.
- Sistematización de entrevistas a actores clave.
- Análisis de encuestas aplicadas a la población local.

Lo anterior permitió correlacionar variables, identificando la relación entre características biofísicas y sistemas productivos, la interacción dinámica entre factores naturales y antropogénicos y las áreas críticas y oportunidades de intervención de la zona de estudio.

Los productos generados incluyen:

- Cartografía temática de alta resolución.
- Matrices de evaluación socioeconómica.
- Diagnósticos participativos validados.

Esta integración metodológica proporciona una base informativa sólida para la formulación de estrategias de manejo adaptativo que consideren simultáneamente:

- La sostenibilidad ecológica.
- La viabilidad económica.
- La aceptación social.
- La resiliencia climática.

Los resultados obtenidos constituyen una herramienta integral para la toma de decisiones informadas en la planificación del desarrollo territorial del cantón de Hojanca.

Cuadro 50. Lista de participantes (informantes) claves identificados para profundizar en el contexto histórico y técnico del fenómeno en estudio.

Nombre	Cargo	Profesión	Institución	Experiencia (años)	Detalles y observaciones.	Otros
Daniilo Méndez	Jefe oficina regional de SINAC para Hojancha y Nandayure.	Lic. en gestión ambiental.	SINAC.	Más de 30.	Daniilo es originario de la comunidad con más de 30 años de experiencia profesional y comunitaria. Miembro fundador Fundación pro Reserva Forestal Monte Alto.	Productor de cítricos y ganadero.
Miguel Méndez	Jefe oficina regional MINAE.	Lic. en gestión ambiental.	MINAE.	Más de 30.	Marvin es oriundo de la comunidad, con más de 30 años de experiencia profesional y comunitaria.	Ganadero. Presidente de la Fundación Pro Reserva Forestal Monte Alto.
Asdrubal Campos	Extensionista agropecuario (pensionado).	Técnico agropecuario.	MAG-Dirección Nacional de Extensión (DNEA).	Más de 40.	Asdrubal es originario de la comunidad con más de 40 años de experiencia profesional y comunitaria. Miembro fundador Fundación pro Reserva Forestal Monte Alto.	Productor forestal y ganadero
Emel Rodríguez	Director ejecutivo.	Ingeniero Forestal.	Liga comunal del Agua.	Más de 40.	Emel es originario de la comunidad, ex director regional de la oficina de MINAE, laboró en gran cantidad de proyectos ambientales con instituciones nacionales e internacionales como el CATIE, GIZ.	Actual regidor municipal de Hojancha, presidente de la junta directiva de Coopepilangosta y de la Fundación Reserva Agroecológica El Tolerito
Orlando Madrigal	Presidente.	Empresario	Canacítricos	Más de 6	Enlace político entre el gremio de productores y jercas del Poder Ejecutivo y Legislativo.	Productor de cítricos
Carlos Vasquez	Gerente general.	Bach. Amd. aduanera y comercio internacional.	Coopepilangosta	Más de 8	Vicepresidente de Canacítricos. Toda su carrera profesional la ha desarrollado en Hojancha.	Productor de café y cítricos.
Lynnette Camacho	Directora regional chorotege	Lic. en gestión ambiental.	INDER	Más de 20.	Ha afrontado la crisis de la citricultura en La Cruz y la península de Nicoya. Miembro del consejo sectorial agropecuario chorotege.	Profesora universitaria.
Guillermo Rodríguez	Jefe oficina regional chorotege SFE (pensionado).	Ing. Agrónomo	MAG-SFE	Más de 25.	Fue coordinador de la comisión nacional de plagas de los cítricos con experiencia en la epidemia de HLB.	Experimento el desarrollo de HLB en Costa Rica desde su detección oficial, hasta su retiro en 2024.
Marvin Méndez	Presidente.	Cámara de ganaderos de Hojancha.		Más de 30.	Reconocido líder comunitario del sector agropecuario de Hojancha. Oriundo del cantón.	Ganadero. Ex presidente municipal.
Jaime Salazar	Gerente general.	Ing. Agrónomo	Coopecerroazul	Más de 30.	Ha participado en numerosas comisiones productivas de la citricultura, pionero en la actividad en la región.	Productor de café y cítricos.
Silvia Zuñiga	Directora	Lic. Economía	CEMEDE-UNA	Más de 30.	Experiencia profesional en desarrollo socioeconómico en el cantón de Hojacha, líder de proyecto "Cadena de valor de cítricos de la península de Nicoya".	Profesora universitaria.

Resultados

Caracterización territorial y productiva del cantón de Hojancha

Con una extensión de 26,235 hectáreas, el cantón de Hojancha presenta una configuración territorial donde sobresale la cuenca alta del río Nosara, categorizada según los criterios de Ordoñez (2011), que junto con la subcuenca del río Lajas abarcan el 48.7% de la superficie cantonal. Este sistema hidrográfico alberga los principales núcleos poblacionales y áreas de desarrollo urbano, por lo que constituye el eje socioeconómico del territorio.

Distribución de usos del suelo

El análisis espacial revela una marcada predominancia de tres actividades principales:

- Sistemas ganaderos: ocupan el 31.3% del territorio (8,211 ha).
- Plantaciones forestales: cubren el 18.4% del área (4,827 ha).
- Bosques secundarios: representan el 33.75% de la superficie (8,854 ha).

El área dedicada a la citricultura, pesar de su reducida extensión relativa (2.1% del territorio) de las unidades de estudio, presenta características notables:

- Distribución altitudinal: se extiende desde los 400 hasta los 891 msnm, concentrándose más del 50% de la superficie cultivada por encima de los 600 msnm, donde se registran mejores condiciones agroclimáticas.
- Importancia económica: genera ingresos superiores a \$700 millones por temporada (J. Salazar y Vásquez, 2024), destacándose como una actividad de alto valor agregado en relación con su superficie ocupada.
- Localización estratégica: los cultivos se ubican predominantemente en la divisoria de aguas de las dos vertientes principales, lo que incrementa su relevancia en términos de gestión hídrica y conservación de suelos.

Esta configuración territorial refleja una dinámica productiva donde, pese a la predominancia cuantitativa de otros usos del suelo, la citricultura emerge como actividad clave por su valor económico y su localización en zonas ambientalmente sensibles. La concentración en altitudes medias y altas plantea tanto oportunidades como desafíos para la sostenibilidad del sistema productivo, particularmente en el contexto actual de presiones fitosanitarias y cambios climáticos.

Caracterización biofísica de las unidades hidrográficas de estudio

La cuenca alta del río Nosara (CarNs) y la subcuenca del río Lajas (SrLj) constituyen sistemas hidrológicos tropicales montanos con características morfo-climáticas distintivas. Clasificadas como cuencas exorreicas de relieve accidentado, presentan una red de drenaje predominantemente efímera e intermitente, donde solo los cauces principales mantienen flujo perenne, aunque significativamente reducido. Esta configuración responde a un régimen pluviométrico marcadamente estacional, con un período seco que se extiende por seis meses consecutivos (diciembre-abril).

Dinámica hidrológica y climatológica

El balance hídrico del sistema presenta variaciones altitudinales significativas:

- Zonas de Cabecera (>600 msnm):
 - Biotemperatura media: 18-24°C.
 - Mayor generación de escorrentía superficial.
 - Recarga acuífera estratégica.

- Zonas Medias y Bajas (<600 msnm):
 - Biotemperatura media: 24-27°C.
 - Mayor presión antrópica.
 - ETR elevada (1,100-1,300 mm/año).
 - Flujo base reducido en época seca.

Como parámetros climáticos clave para ambas unidades de estudio se pueden mencionar:

- Temperatura media anual: 24.5°C.
- Amplitud térmica diaria: 8-10°C.
- Precipitación media anual: 2,800 mm (rango: 2,400-3,200 mm).

Esta configuración biofísica, cuyos detalles cuantitativos se presentan en el Cuadro 51, genera un gradiente ecológico altitudinal que condiciona tanto los procesos hidrológicos naturales como la aptitud para diferentes sistemas productivos. La marcada estacionalidad del régimen hídrico plantea desafíos particulares para la gestión integrada de los recursos, especialmente en lo concerniente a la disponibilidad de agua durante el período seco y la conservación de suelos en zonas de pendiente pronunciada.

Cuadro 51. Caracterización cuenca alta río Nosara.

Característica	Valor	Unidad	Clasificación
Área	46.79	km ²	Pequeña
Perímetro	36.01	km	
Elevación mínima	188	m	
Elevación máxima	891	m	
Pendiente cauce principal	11.77	%	Fuerte
Pendiente media cuenca	23.29	%	Relieve accidentado
Factor de forma de Horton	0.74	-	Ensanchada
Longitud cuenca	7.93	km	
Longitud cauce principal	16.25	km	
Coefficiente de Gravelius	1.47	-	De oval redonda a oval oblonga. Clase II
Longitud de drenajes	173.52	km	Bien drenado
Densidad de drenajes	3.71	km/km ²	Muy alta
Tiempo de concentración	0.42	h	Baja
Precipitación media anual	2799	mm	
Orden y suborden de suelo	188-480	msnm	Alfisol (ustalfs)
Orden y suborden de suelo	480-891	msnm	Ultisol (ustults)

La CarNs con una superficie de 46,8 km², presenta una dinámica hidrológica típica de cuencas pequeñas (Campos, 1992), donde la respuesta a eventos de precipitación es

rápida y concentrada. Su desnivel altitudinal (703 m) es ligeramente menor que el registrado en la SrLj (849 m).

En ambas unidades, el perfil edáfico varía según los pisos altitudinales, lo que influye directamente en los procesos hidrológicos. Además, es imperativo indicar que los tiempos de concentración son bajos 0.42 y 0.51 horas para CarNS y SrLj, respectivamente, aspecto que intensifica los eventos erosivos por la acumulación acelerada y velocidad del flujo de agua. Para un análisis detallado de las características de la cuenca SrLj, véase el Cuadro 52.

Cuadro 52. Caracterización subcuenca del río Lajas.

Característica	Valor	Unidad	Clasificación
Área	81.1	km ²	Pequeña
Perímetro	49.94	km	
Elevación mínima	42	msnm	
Elevación máxima	891	msnm	
Pendiente cauce principal	7.88	%	Fuerte
Pendiente media cuenca	32.94	%	Relieve accidentado
Factor de forma de Horton	0.5	-	Ligeramente ensanchada
Longitud cuenca	12.69	km	
Longitud cauce principal	17.06	km	
Coefficiente de Gravelius	1.55	-	De oval oblonga a rectangular oblonga. Clase III
Longitud de drenajes	198.54	km	Bien drenado
Densidad de drenajes	2.45	km/km ²	Alta
Tiempo de concentración	0.51	h	Baja
Precipitación media anual	2799	mm	Alta
Orden y suborden de suelo	42-480	msnm	Alfisol (ustalfs)
Orden y suborden de suelo	480-891	msnm	Ultisol (ustults)

Parámetros de forma de las unidades en estudio

La cuenca alta del río Nosara (CarNS) presenta un factor de forma de Horton de 0,74, clasificándola como "ensanchada". Esta morfología, sumada a su bajo tiempo de concentración (0,42 h), favorece una rápida convergencia del escurrimiento hacia el cauce principal, incrementando el riesgo de crecidas repentinas, especialmente ante su elevada precipitación media anual (2799 mm). Por su parte, la subcuenca del río Lajas

(SrLj) muestra un factor de Horton de 0,5 ("ligeramente ensanchada") y un tiempo de concentración similar (0,51 h), lo que sugiere un comportamiento hidrológico análogo.

En cuanto a la elongación, el coeficiente de Gravelius (K_c) de la SrLj (1,55; clase III: oval oblonga a rectangular oblonga) indica una mayor elongación que aquella de la CarNS (1,47; clase II: oval redonda a oval oblonga). Adicionalmente, la SrLj presenta un coeficiente de anchura de 6,4, ligeramente superior al de la CarNS (6,0).

Estas características morfológicas, junto con las fuertes pendientes predominantes en ambas cuencas, condicionan los bajos tiempos de concentración, lo que en eventos de alta intensidad pluviométrica puede derivar en un rápido incremento del caudal y la velocidad del flujo, agravando procesos erosivos y riesgos hidrológicos.

Hipsometría y su influencia en las propiedades edáficas e hidrológicas de las cuencas

La CarNS presenta un relieve marcadamente accidentado, con una pendiente del cauce principal del 11,77% y una pendiente media de la cuenca del 23,29%. Esta topografía pronunciada acelera la escorrentía superficial y aumenta la susceptibilidad a la erosión hídrica, claro reto para la conservación de suelos y la gestión sostenible de los recursos hídricos. En la subcuenca del río Lajas (SrLj), el relieve también es complejo, con una pendiente del cauce principal del 7,88% y una pendiente media del 32,94%, que refleja una dinámica hidrológica intensa. Un análisis espacial de la hipsometría de la región en estudio se presenta en la Figura 50.

Las propiedades del suelo varían significativamente según la elevación:

- Zonas bajas (42–480 msnm): dominan Alfisoles, suelos fértiles y bien drenados, ideales para la infiltración.
- Zonas altas (480–891 msnm): predominan Ultisoles, suelos antiguos, arcillosos y menos fértiles, que modifican la retención hídrica y la escorrentía.

Distribución altitudinal y su impacto hidrológico

- CarNS: el 56,54% de su área se concentra entre 320–480 msnm, con una altitud media de 441 msnm.
- SrLj: el 47,57% de su superficie está entre 160–400 msnm, con una altitud media de 359 msnm.

La curva hipsométrica es una herramienta clave para analizar la relación entre relieve, escurrimiento y condiciones ecológica, en tanto la altitud influye directamente en variables climáticas como temperatura y precipitación, condicionando así los regímenes hidrológicos y la distribución de ecosistemas (Trujillo *et al.*, 2010).

Según Keller y Pinter (2002), la curva hipsométrica constituye un indicador confiable del estado evolutivo de una cuenca. Los análisis realizados revelan diferencias significativas en el desarrollo geomorfológico de las cuencas estudiadas:

- Curva hipsométrica de la CarNS: de acuerdo con Ibáñez *et al.* (2011) la unidad presenta características típicas de una cuenca en equilibrio o fase de madurez (ver Figura 48), lo que sugiere un balance entre los procesos erosivos y de deposición.

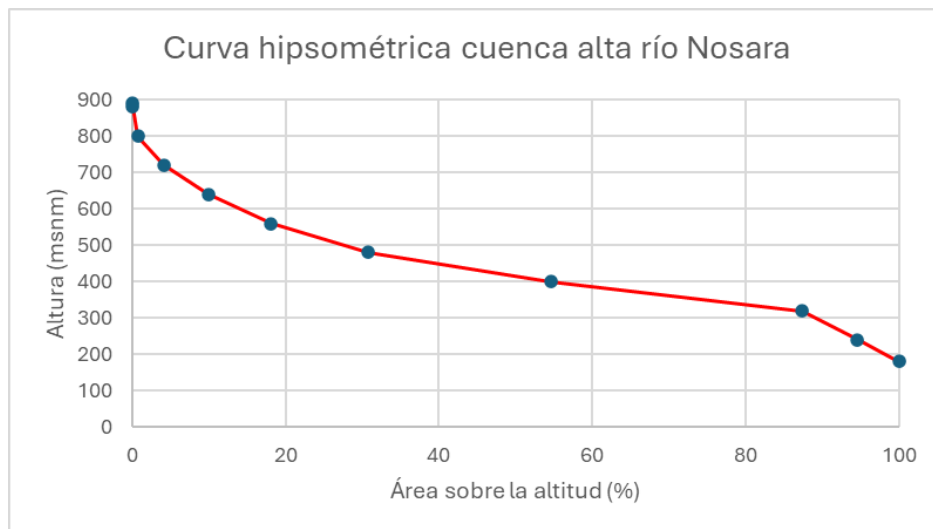


Figura 48. Curva hipsométrica cuenca alta del río Nosara.

- Curva hipsométrica de la SrLj: según los mismos autores, la unidad muestra una configuración similar, pero con marcada tendencia hacia la fase de vejez evidenciando su transición a una cuenca predominantemente sedimentaria (ver Figura 49),

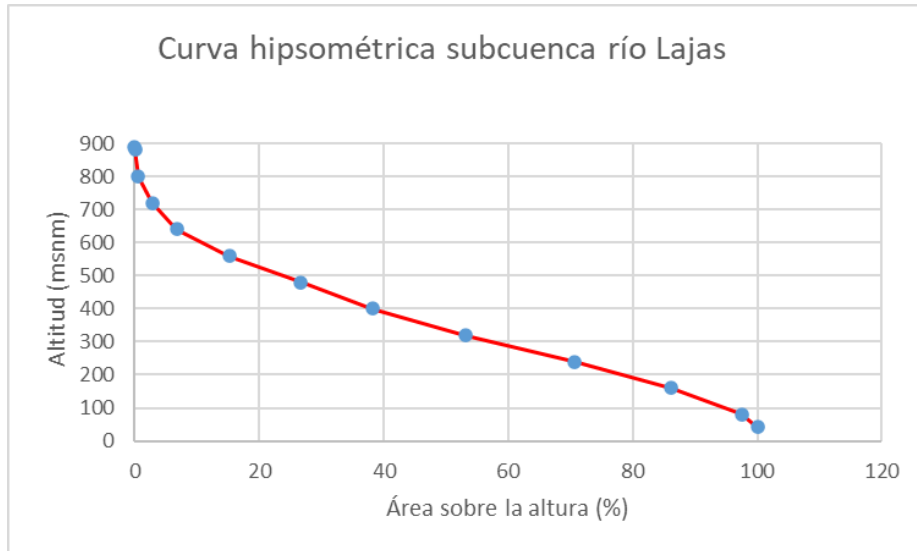


Figura 49. Curva hipsométrica subcuenca del río Lajas.

Estas diferencias evolutivas tienen importantes implicaciones para los patrones de erosión y sedimentación, la dinámica de los cauces fluviales y la gestión de recursos hídricos a largo plazo.

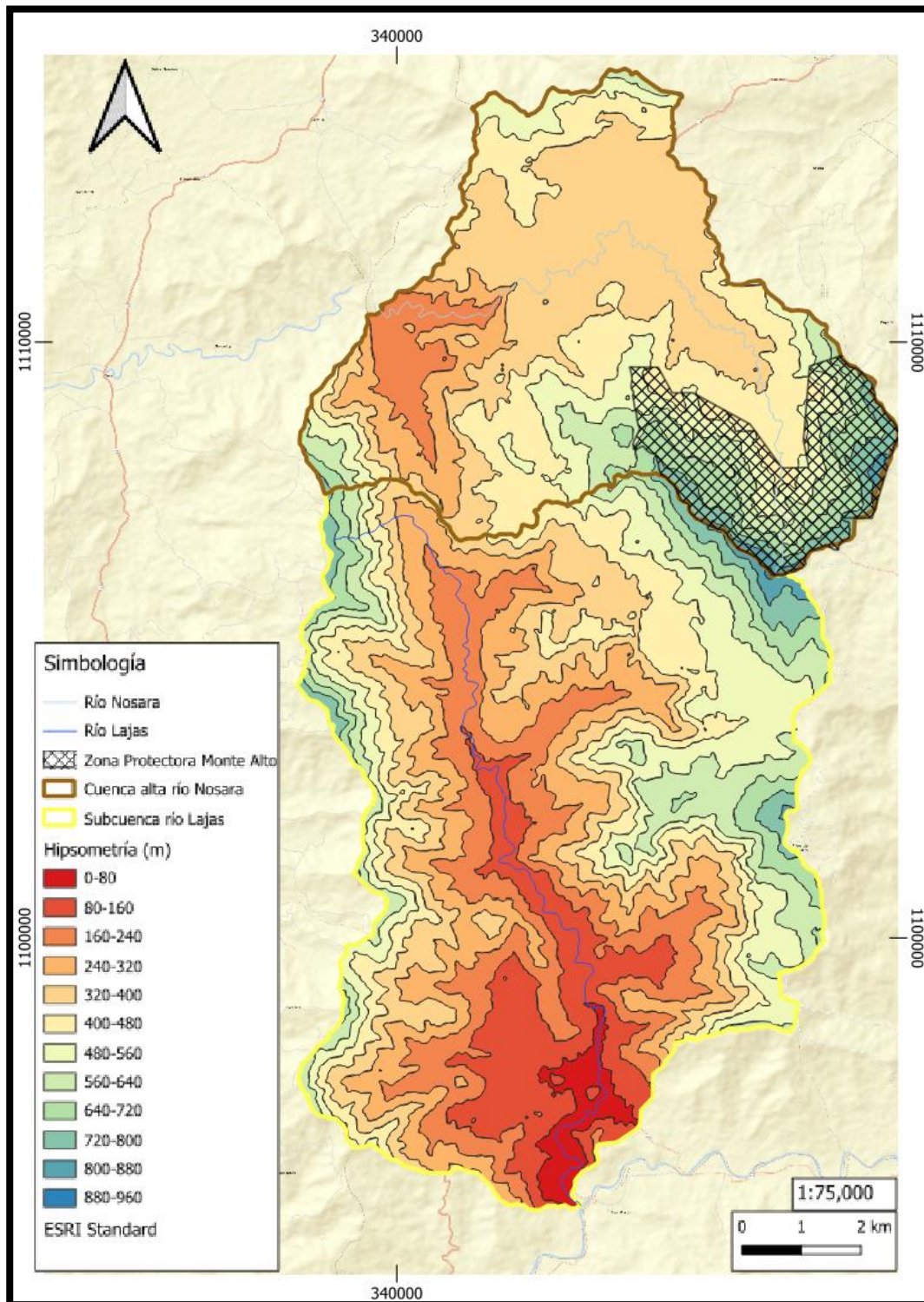


Figura 50. Mapa hipsométrico cuenca alta río Nosara y subcuenca río Lajas. Elaboración propia.

Zonas de vida de las cuencas en estudio

En Hojancha, se identifican dos zonas de vida según el sistema de clasificación de Holdridge: bosque húmedo tropical (bh-T) y bosque muy húmedo premontano (bmh-P), este último presente en las cotas superiores a 600 msnm. En la cuenca del río Nosara, el 87% del área corresponde a la zona de vida bh-T y el 13% a la zona bmh-P. En la subcuenca del río Lajas, los porcentajes varían ligeramente, con un 88,5% correspondiente a bh-T y un 11,5% a bmh-P.

Caracterización de la red de drenaje y su influencia en la dinámica hidrológica de las cuencas

El flujo hidrológico en las cuencas está determinado por la gravedad y el gradiente topográfico, encontrando resistencia en los obstáculos físicos del terreno. La morfología del “talweg” (la línea del punto más profundo a lo largo del curso de una corriente de agua) resulta de la interacción entre la corriente fluvial y los materiales erosionables del lecho (Ibañez *et al.*, 2011). En ambas cuencas se observa un régimen de flujo turbulento, con fluctuaciones significativas en velocidad y dirección (ver Figura 51).

Características de drenaje:

- Frecuencia de drenaje:
 - CarNS: 12.37 drenajes/unidad de área.
 - SrLj: 6.78 drenajes/unidad de área.

- Patrones de drenaje:
 - Predominio dendrítico en ambas cuencas.
 - Presencia secundaria de patrones paralelos y rectangulares/angulados (Díaz, 2004 citado por Trujillo *et al.*, 2010).
 - Clasificación morfológica: meándrica irregular (De Pedraza y González, 1996).

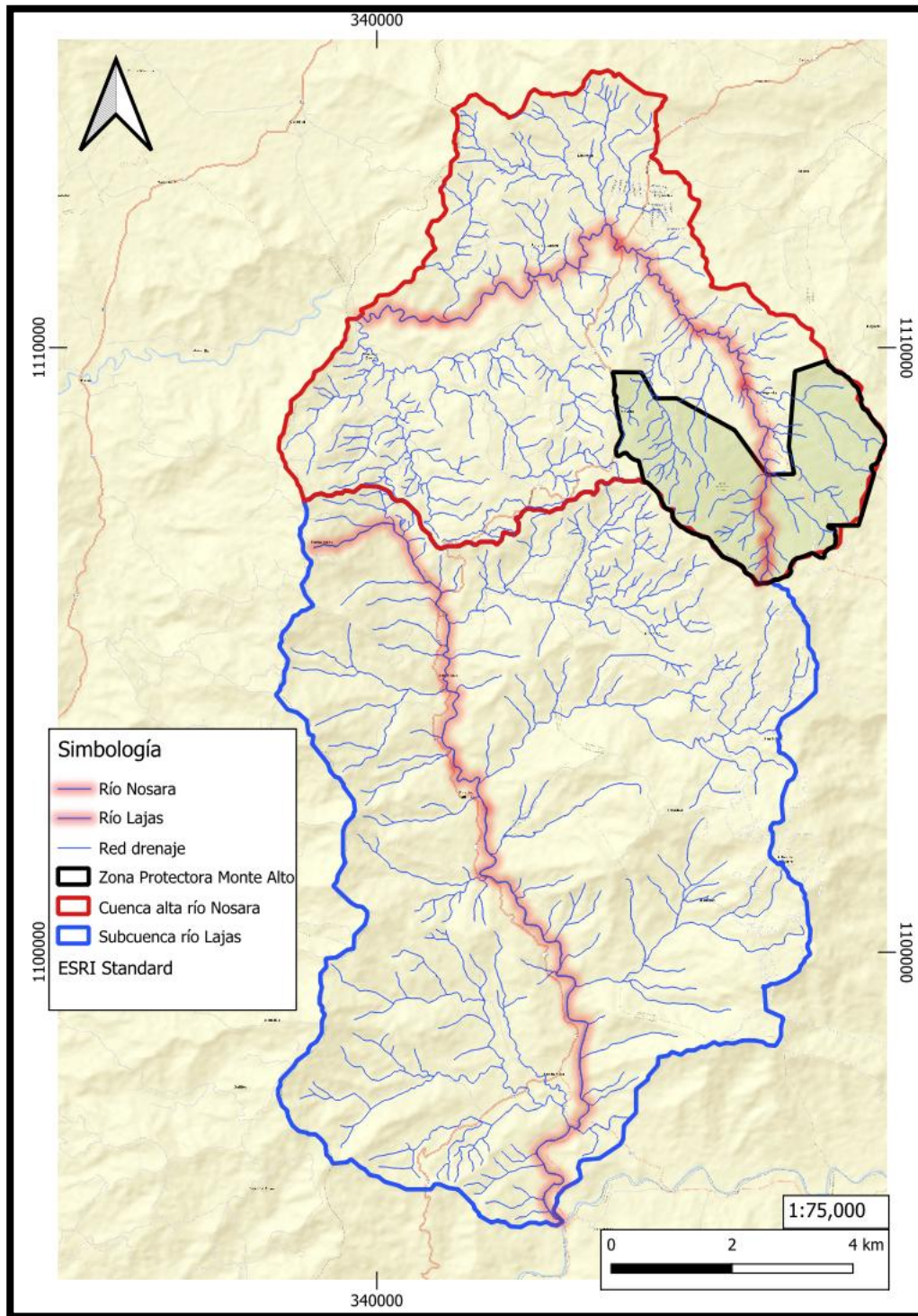


Figura 51. Mapa delimitación de la cuenca alta del río Nosara y subcuenca del río Lajas, cauce principal y red hídrica o drenaje. Elaboración propia.

Densidad de drenaje (Dd) y sus implicaciones en CarNS: $Dd = 2.45 \text{ km/km}^2$ (alto, según Delgadillo y Páez, 2008).

- Sistema fluvial bien desarrollado.
- Mayor eficiencia en transporte hídrico.
- Elevado riesgo erosivo en zonas de pendiente pronunciada.

Densidad de drenaje (Dd) y sus implicaciones en SrLj: $Dd = 3.71 \text{ km/km}^2$ (muy alto, según Delgadillo y Páez, 2008).

- Red fluvial más compleja y desarrollada.
- Riesgo erosivo significativamente mayor.

Morfometría de cauces principales:

- CarNS, longitud cauce: 16.25 km y cuenca: 7.93 km.
- SrLj longitud cauce: 17.06 km y cuenca: 12.6 km.

Estas diferencias morfométricas reflejan variaciones en la configuración de las redes de drenaje, los procesos erosivos dominantes y la historia geológica de cada cuenca.

Análisis de cobertura y uso del suelo en las cuencas CarNS y SrLj

La distribución de la cobertura forestal (ver Cuadro 53) se determinó en el 52.17% del área de estudio. Donde:

- CarNS: 46% (incluye bosques y cultivos forestales).
- SrLj: 55.93% (incluye bosques y cultivos forestales).

La caracterización de uso del suelo en la SrL nos presenta una baja densidad poblacional, de vocación histórica maderera, cuenca con 1,622 ha. de cultivos forestales, un área urbana de 27.86 ha. y suelos predominantes Clase VII (60%) con limitaciones severas

(solo aptitud forestal) y Clase III (14%) y VI (21%) con limitaciones moderadas (agricultura con prácticas de conservación) a severas (aptitud para cultivos permanentes y forestales)

Por su parte, la caracterización de usos del suelo cuenca alta del río Nosara (CarNS) nos muestra una mayor concentración poblacional con un área urbana de 129.23 ha., cultivos forestales por 735 ha. y suelos predominantes Clase VI (66.46%) y Clase III (33.23%).

La Srlj muestra mayor vocación forestal por sus características edáficas y menor presión antrópica, por su parte la CarNS presenta mayor intervención humana. Las limitaciones edáficas condicionan los usos potenciales del suelo en ambas cuencas. Un análisis espacial de la cobertura de suelo de las unidades de estudio se muestra en la Figura 52.

Cuadro 53. Resumen comparativo de cobertura y capacidad de uso del suelo.

Parámetro Cobertura	Cuenca río Nosara		Cuenca río Lajas	
	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)
Potrero	1537.36	32.81	2462.52	30.36
Bosque	1404.04	29.97	2914.17	35.93
Forestal	753.35	16.08	1622.06	20
Ríos	526.13	11.23	608.58	7.5
Vías	178.32	3.81	250.82	3.09
Cítricos	81.42	1.74	187.56	2.31
Urbano	68.06	1.45	0	0
Caserío	61.26	1.31	27.86	0.34
Café	49.55	1.06	28.3	0.35
Cultivo corto	23.49	0.5	8.84	0.11
Pitahaya	2.31	0.05	0.4	0
Clase				
II	0	0	398.28	4.91
III	1556.74	33.23	1134.96	13.99
VIs123e12	3113.47	66.46	1712.93	21.12
VII	14.78	0.32	4864.2	59.97

La regeneración boscosa ha impulsado una mayor captación y disponibilidad de agua para las comunidades, además de contribuir a reducir los procesos de compactación del

suelo y aumentar la capacidad de infiltración. Esto ha favorecido la recarga de los acuíferos y una mejor regulación del flujo hídrico en la región.

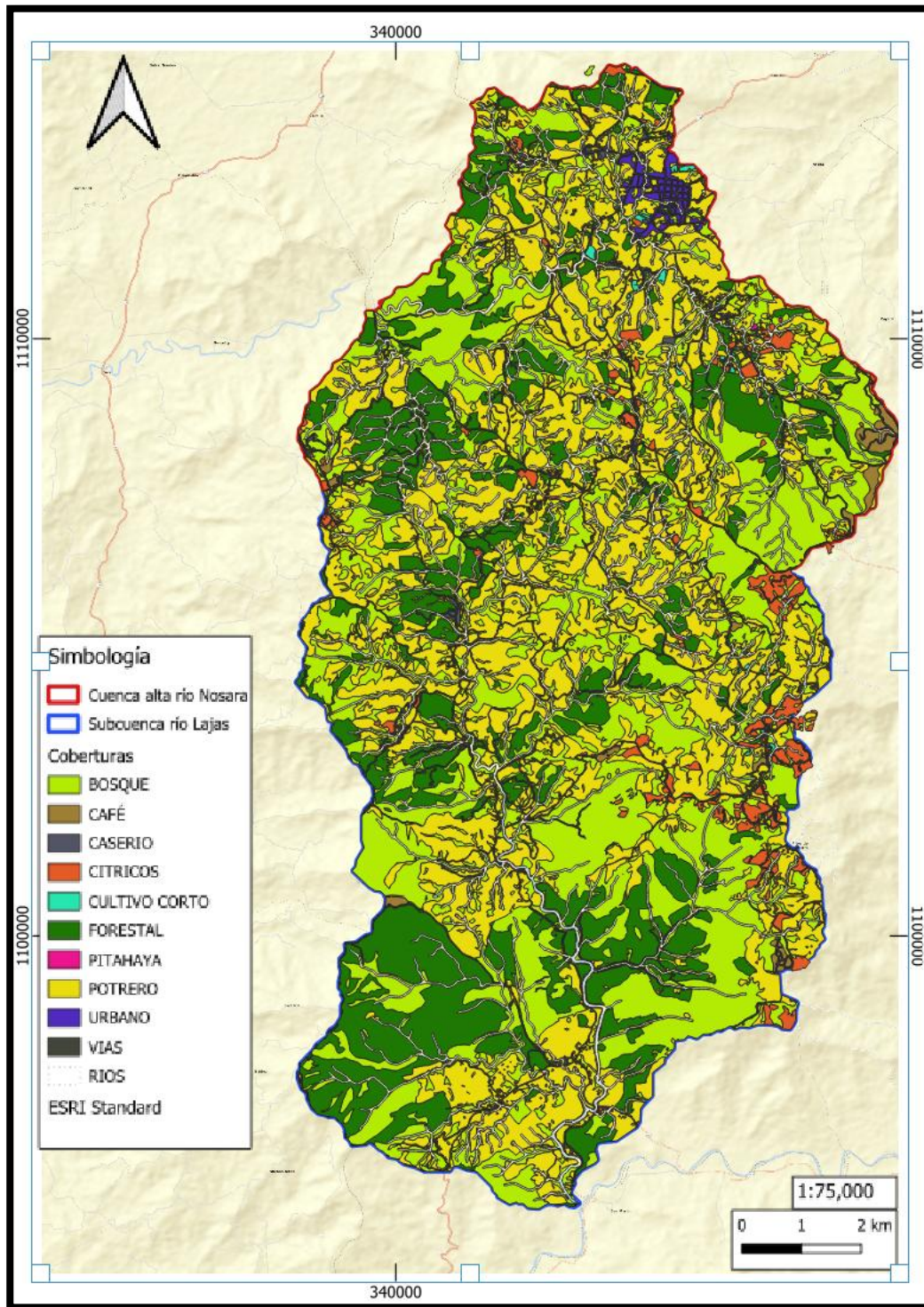


Figura 52. Mapa de cobertura de suelo en la cuenca alta río Nosara y subcuenca río Lajas. Elaboración propia.

Capacidad de uso de suelo en la cuenca alta del río Nosara y subcuenca del río Lajas

EL contexto demográfico de las unidades en estudio nos define:

- Densidad poblacional promedio: 31.4 hab/km².
- Distrito central: 53.9 hab/km² (51% población cantonal).
- Resto del cantón: 21.67 hab/km².
- Principales núcleos poblacionales, a parte del distrito central: Santa Marta, Estrada, Playa Carrillo, San Miguel, San Rafael, Maravilla, Monte Romo, Huacas, San Isidro y El Socorro.

Asimismo, los patrones de cobertura nos delimitan tres categorías principales que dominan el paisaje, potreros (ganadería extensiva), áreas forestales (plantaciones maderables y bosque secundario) y zonas urbanas.

Lo anterior permitió analizar y clasificar el uso real del suelo por su capacidad (ver Cuadro 54), evidenciando:

- Uso adecuado del suelo: >50% del área.
- Sobreuso significativo: 18 (SrLj) y 23% (CarNs) del territorio (asociado principalmente a ganadería extensiva).
- Superficie agrícola: <4% total. CarNS: 3.35% y en la SrLj: 2.77%.

La presión ganadera representa el principal factor de sobreutilización. Las áreas forestales mantienen una importante presencia en el paisaje, Finalmente la baja proporción de uso agrícola sugiere limitaciones edáficas o preferencias productivas.

Cuadro 54. Clasificación de suelo por capacidad de uso en la cuenta alta del río Nosara y subcuenca del río Lajas.

Clasificación uso de suelo	CarNs		SrLj		ZPMA	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Uso correcto	2465.47	52.68	4738.78	58.42	680.55	76.18
Sobre uso	867.63	18.54	1841.76	22.71	177.63	19.88
Área protegida	536.74	11.47	629.26	7.76	—	—
Sub uso	503.39	10.76	619.08	7.63	28.97	3.24
Uso urbano	307.11	6.56	275.95	3.40	6.17	0.69

En la Figura 53, se puede observar la clasificación de uso de suelo en la Zona Protectora Monte Alto (ZPMA), que refleja fuertes procesos degradativos donde coincide con zonas de potreros.

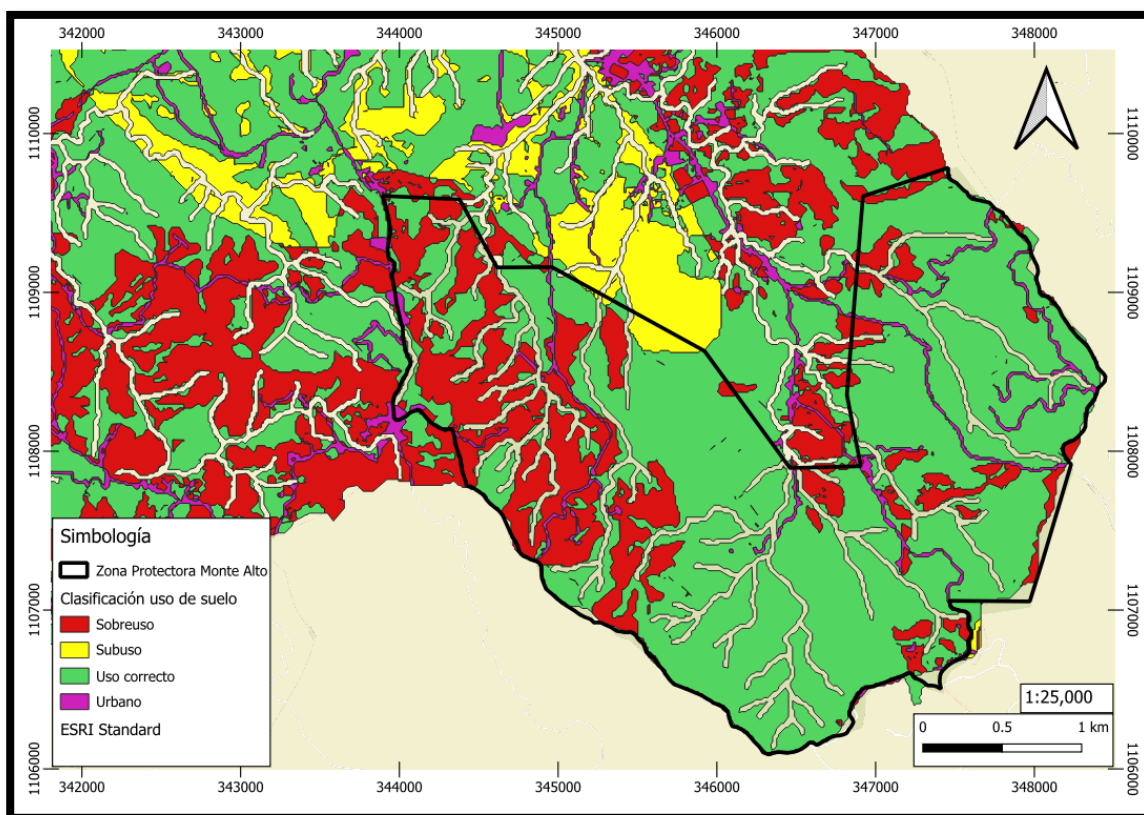


Figura 53. Clasificación por capacidad de uso del suelo en ZPMA. Elaboración propia.

La Figura 54 evidencia que, a nivel general, el 58% del área presenta un uso adecuado del suelo asociado a la recuperación boscosa. No obstante, este porcentaje podría incrementarse con la implementación de sistemas de ganadería sostenible que favorecería una mayor conservación del recurso edáfico y la biodiversidad.

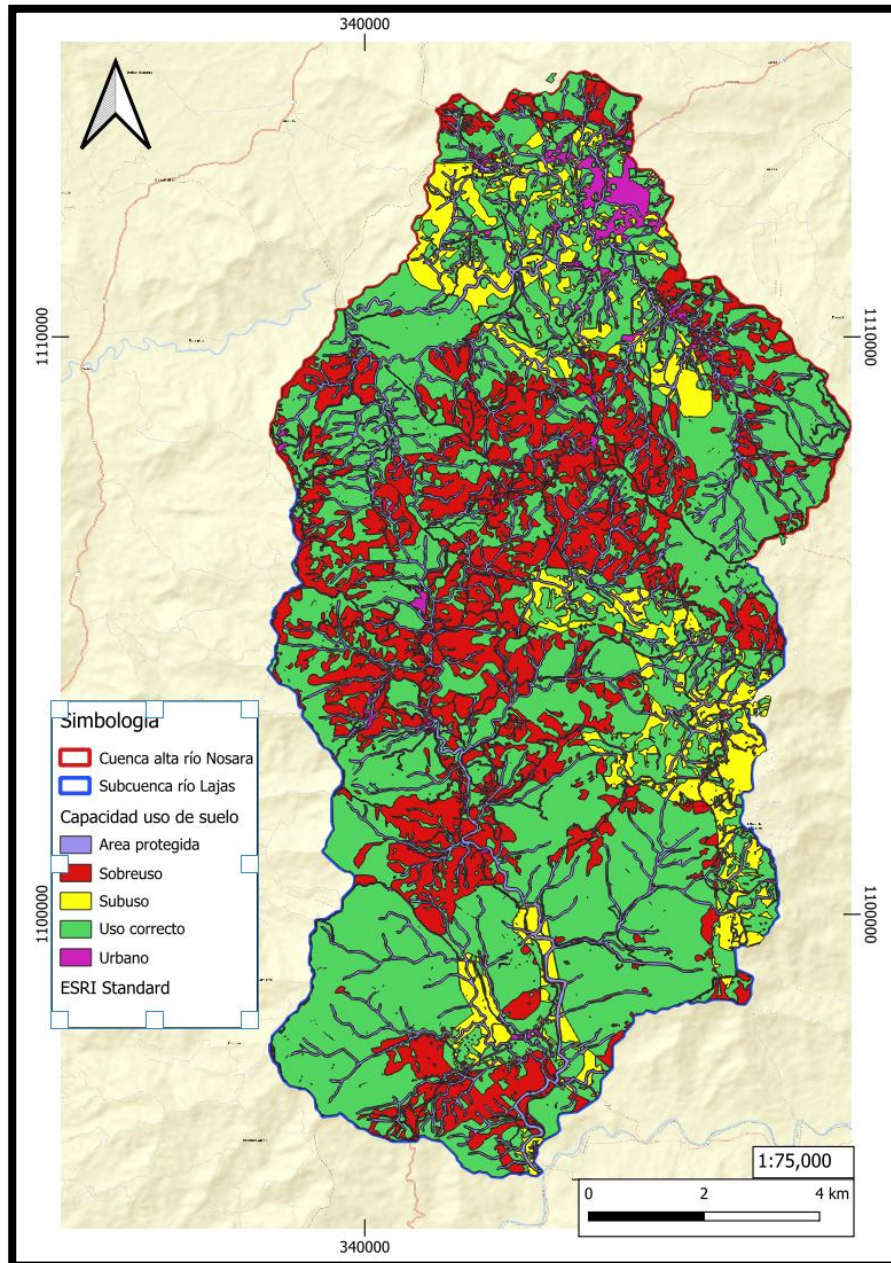


Figura 54. Clasificación por capacidad de uso del suelo en las cuencas CarNS y SrLj. Elaboración propia.

Dinámica hídrica y balance hidrológico en las cuencas de estudio

El análisis revela una clara relación entre la evapotranspiración real (ETR) y la topografía: los valores de ETR aumentan progresivamente en zonas de menor pendiente, dado que las zonas bajas y planas favorecen los procesos de infiltración, los valores mínimos se identifican en las zonas de mayor relieve y pendiente correspondiente a zonas de transporte de materiales. La menor capacidad de ETR conforme incrementa la altura responde principalmente a dos factores clave: una mayor exposición a la radiación solar con respecto a las áreas bajas cubiertas y la reducida capacidad de retención hídrica de los suelos en estas zonas (ver Figura 55).

Por otro lado, la escorrentía superficial muestra su máxima intensidad en las zonas de cabecera, con puntos críticos concentrados en la divisoria de aguas, correspondiente a las mayores elevaciones del territorio (ver Figura 56).

La ETR media de la CarNs se determinó en 1324 mm y la escorrentía media en 1474, en tanto la ETR media de la SrLj se tasó en 1342 mm y la escorrentía media en 1455 mm, lo cual es consistente con lo supra citado, dado las menores alturas de la SrLj.

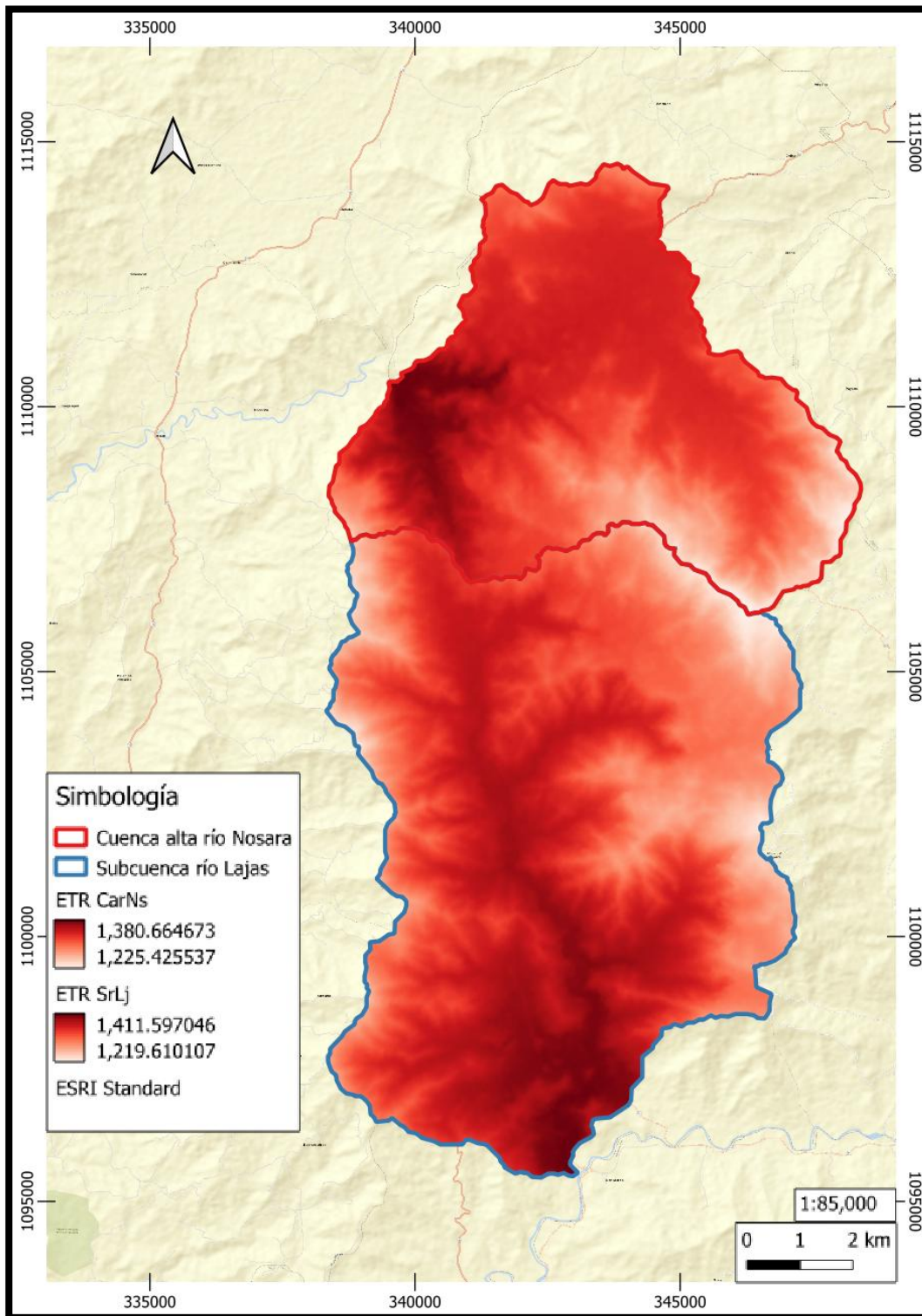


Figura 55. Modelación espacial de ETR (mm) en las unidades de estudio. Elaboración propia.

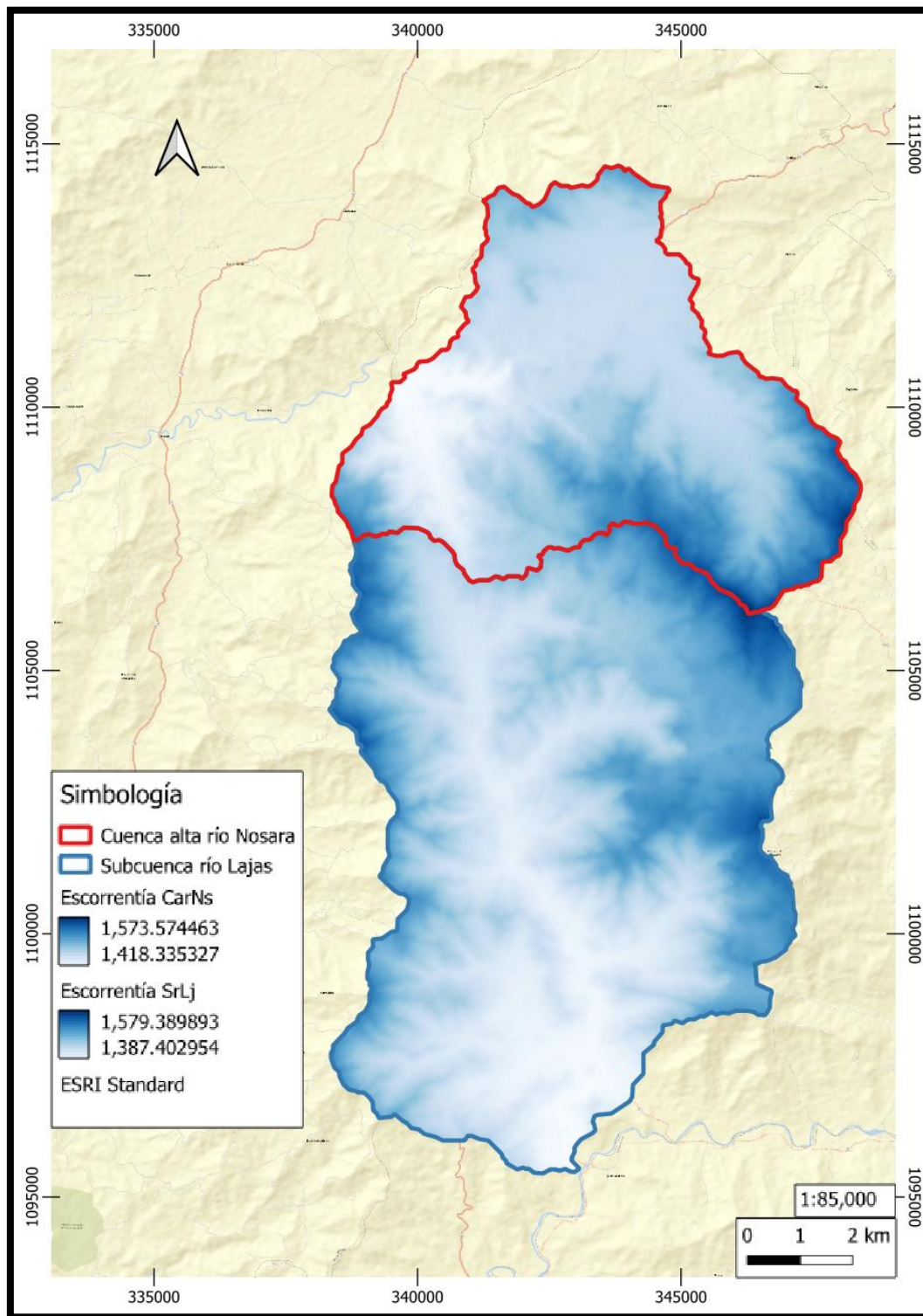


Figura 56. Modelación espacial de flujos hídricos que identifica áreas críticas de escorrentía (mm) en las unidades de estudio. Elaboración propia.

En los últimos años se ha registrado una notable alteración en el régimen pluviométrico de la cuenca, caracterizada por una concentración anormal de las precipitaciones en los meses de septiembre y octubre, acompañada de una marcada reducción de eventos lluviosos durante el resto del año. Este cambio en los patrones de distribución temporal de las lluvias está modificando significativamente la dinámica hídrica de la región.

Los impactos hidrológicos de esta variabilidad climática son múltiples y preocupantes. Durante los periodos de máxima precipitación se observa un incremento en la saturación edáfica estacional, lo que a su vez genera una mayor frecuencia e intensidad de eventos de crecida y procesos erosivos.

Debido a lo anterior es recomendable implementar sistemas de monitoreo continuo que permitan anticipar y responder eficazmente a estos fenómenos, garantizando así la sostenibilidad de los ecosistemas y la seguridad hídrica de la región.

Pérdida de suelo por erosión

La erosión del suelo es un fenómeno complejo que surge de la interacción de múltiples factores, entre los que destacan el relieve, la intensidad de las precipitaciones, la textura y estructura del suelo, la geomorfología, así como el uso y la transformación del terreno. En un escenario donde la altitud, el tipo de suelo, el uso del suelo y la intensidad de la lluvia se mantienen constantes, la cobertura vegetal y la aplicación de prácticas de conservación de suelos se perfilan como elementos clave en la determinación de la magnitud de la pérdida de suelo.

Situación actual del manejo del suelo

El sector ganadero se caracteriza por el predominio de sistemas extensivos con escasa implementación de prácticas conservacionistas. En contraste, la actividad agrícola muestra diferencias significativas según el cultivo: mientras los cultivos anuales (granos básicos y hortalizas) presentan un manejo más agresivo, la citricultura ha adoptado

avances notables, como la eliminación de herbicidas en pendientes, siembra en contorno, terraceo, manejo orgánico y conservación de barreras boscosas.

Principales hallazgos erosivos

El Cuadro 55 revela que la mayor afectación por erosión se concentra en la Zona Protectora Monte Alto (ZPMA), principalmente debido a la presencia de potreros en laderas pronunciadas con cobertura vegetal insuficiente. Estos resultados destacan la vulnerabilidad de las áreas ganaderas frente a los sistemas citrícolas, que demuestran menor impacto erosivo gracias a las prácticas de conservación implementadas.

Cuadro 55. Pérdida de suelo en las unidades de estudio por hectárea al año.

Unidad estudio	Área unidad (ha)	Erosión (toneladas/año)	Máx. (ton/ha/año)	Min. (ton/ha/año)	Media (ton/ha/año)
CarNs	4680	745290	32614,4	0,0832	<u>158,72</u>
ScrLJ 64	8092	853677	19340,8	0,0832	<u>105,6</u>
Unidad	Área potrero				
CarNs	1537	571762	32614,4	4,864	<u>371,2</u>
ScrLJ	2642	446494	19328	1,6	<u>181,12</u>
Unidad	Área cítricos				
CarNs	81,42	5415	712,96	0,832	<u>65,92</u>
ScrLJ	187,6	15641	2328,96	8,32	<u>83,2</u>

Los datos revelan diferencias significativas en los procesos erosivos entre las unidades CarNS y SrLJ. La cuenca CarNS presenta mayores tasas máximas (32,614.4 ton/ha/año) y medias (158.72 ton/ha/año) de erosión en comparación con SrLJ (19,340.8 y 105.6 ton/ha/año respectivamente), pese a su menor extensión. Este patrón se acentúa en áreas de potrero, donde CarNS registra valores medios de 371.2 ton/ha/año, más del doble que SrLJ (181.12 ton/ha/año), sugiriendo una mayor vulnerabilidad en estas zonas a las prácticas de ganadería.

Las áreas cítricas muestran una dinámica contrastante: mientras SrLJ presenta mayores valores máximos (2,328.96 ton/ha/año) y medios (83.2 ton/ha/año) que CarNS (712.96 y 65.92 ton/ha/año respectivamente), ambos sistemas muestran tasas significativamente menores que los potreros. Esto indica que los cultivos de cítricos, aunque no exentos de erosión, representan una alternativa de uso del suelo con menor impacto erosivo comparado con la actividad ganadera extensiva. La marcada diferencia en los valores mínimos (0.0832 ton/ha/año en áreas naturales vs. 1.6-4.864 en potreros de la SrLj y CarNs, respectivamente) refuerza la relación entre uso antrópico y degradación edáfica. En términos generales se destaca que los procesos erosivos en el área de estudio no son severos, lo que podría demostrar una gestión de cuencas bastante exitosa.

La Figura 57 presenta la clasificación de los niveles de erosión en el área de estudio, obtenida mediante la aplicación de la metodología RUSLE (*“Revised Universal Soil Loss Equation”*).

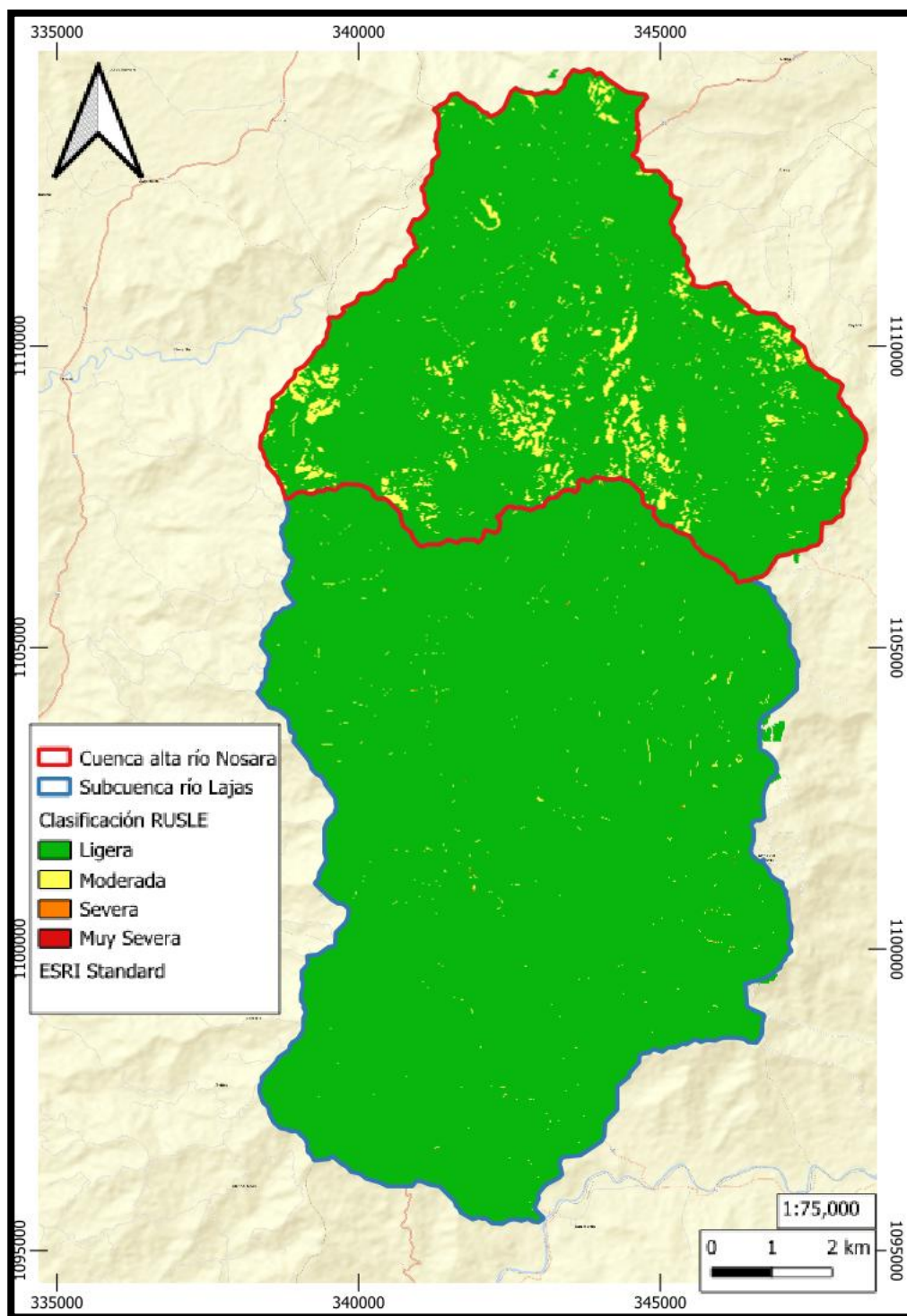


Figura 57. Clasificación espacial de erosión en CarNS y SrLj. Elaboración propia.

La diferencia entre la citricultura y la ganadería extensiva en cuanto a preservación de suelo podría explicarse por varios factores. Por ejemplo, la densidad de siembra de los cítricos genera un dosel elevado que reduce la energía cinética de las gotas de lluvia y, por ende, su impacto erosivo. Además, la eliminación del uso de herbicidas y el control manual de malezas favorecen el establecimiento de una cobertura vegetal ligera en el suelo (Figura 58).

En general en la zona en estudio contribuye el uso marginal de la tierra para cultivos anuales y de ciclo corto donde predominan tradicionales como granos básicos (frijol y maíz) que tienden a cultivarse aprovechando espacios entre plantaciones permanentes o en terrenos planos a cotas menores, en suelos de pendientes menos pronunciadas. Estos elementos contribuyen a disminuir la velocidad y el volumen de la escorrentía, promoviendo una mayor infiltración del agua y un incremento en la evapotranspiración real (ETR), que reduce el riesgo de procesos erosivos intensivos.



Figura 58. Cultivo de cítricos en la cabecera de la cuenca alta del río Nosara.

En la Figura 59 se proyecta la distribución de las áreas de potrero y cítricos en el territorio en estudio.

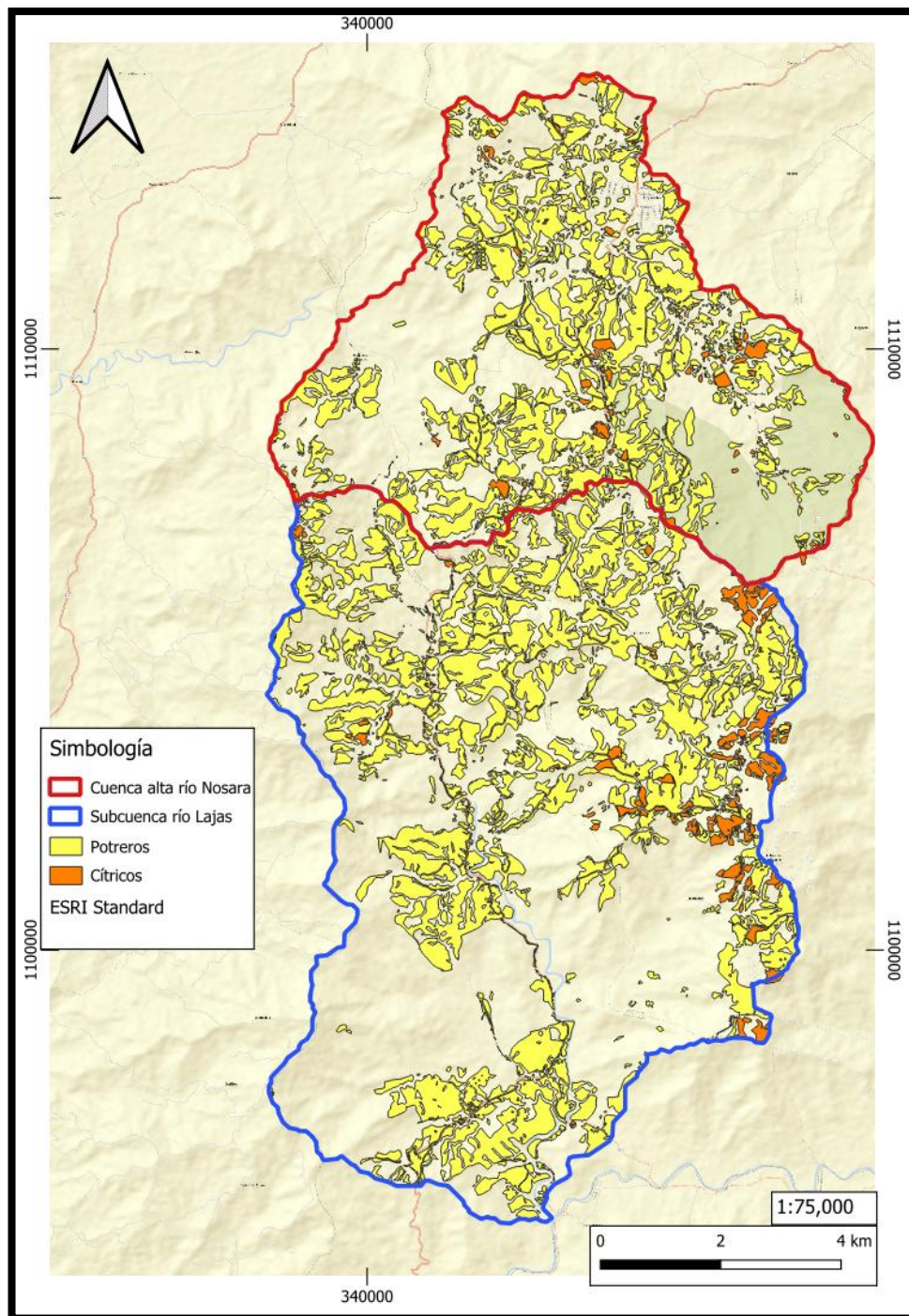


Figura 59. Mapa distribución área de potrero y cultivo de cítricos en la cuenca alta del río Nosara y subcuenca del río Lajas. Elaboración propia.

Valoración socioeconómica y ambiental de la citricultura en la zona de estudio

Los resultados evidencian la importancia estratégica de la citricultura como herencia de adaptación productiva y su actual rol multidimensional en la economía local. Para la valoración socioeconómica y ambiental se procedió con un diseño metodológico que incorporó:

- Realización de encuestas estructuradas a 40 actores clave del territorio en estudio.
- Desarrollo de entrevistas a informantes calificados con enfoque agentes productivos directos y representantes de la dinámica socioeconómica local.

La muestra en estudio correspondió en un 85% productores activos (n=34) donde un 27.5% (n=11) determinó la citricultura como de dependencia económica principal. Un 35% (n=14) reconoce la importancia económica del cultivo como complemento a sus ingresos. Los agentes institucionales/comunitarios sumaron un 15% (n=6) de los entrevistados. Los hallazgos del proceso se describen a continuación.

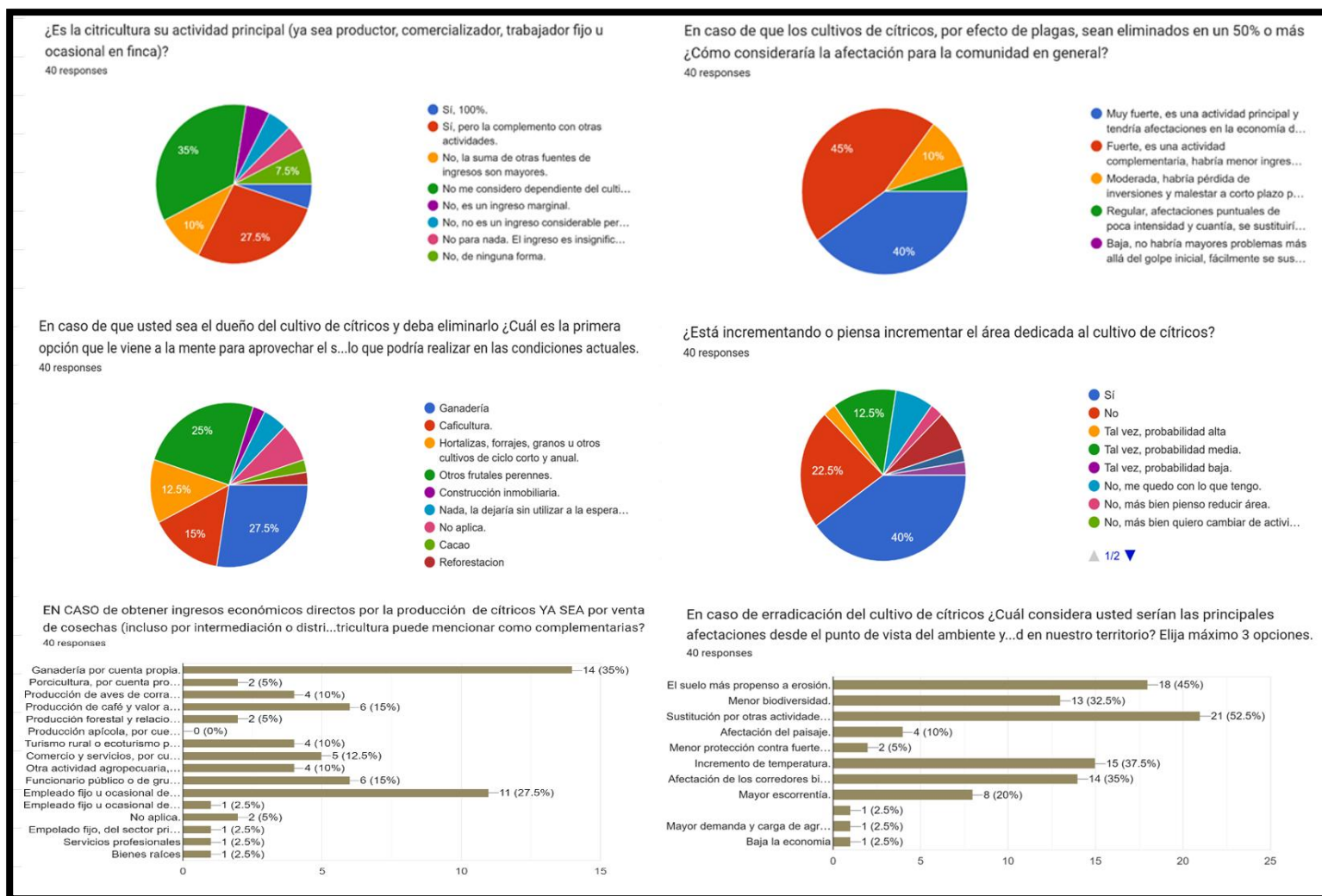
Evolución histórica del cultivo de cítricos:

La fase inicial parte con el uso de naranjos como sombra para cafetales. Esta transición productiva responde a la crisis cafetalera (caída de precios internacionales) provocando una reconversión gradual desde finales de los noventa.

La consolidación de este proceso resulta de la conversión de la citricultura en una alternativa económica viable que conllevó a un mayor desplazamiento del café en áreas específicas. Actualmente la citricultura es la principal actividad para un cuarto de los productores y un ingreso considerable para un tercio restante, donde la citricultura goza de un reconocimiento unánime en su impacto positivo para la economía cantonal.

Los principales resultados de la encuesta se resumen en la Figura 60.

Figura 60. Principales resultados de la encuesta para determinar el valor socioeconómico de la citricultura en Hojancha.



Impacto socioeconómico y ambiental potencial del HLB en la citricultura local

Los datos de la encuesta determino que el 45% de los productores considera que el HLB tendría un impacto "muy fuerte" al ser la citricultura una actividad económica fundamental, otro 40% lo califica como "fuerte" por conformar este cultivo un ingreso complementario.

Actualmente los productores encuestados complementan sus ingresos con: ganadería (35%), actividades en el sector privado no agrícola (27.5%), como funcionariado público/ONGs (15%) y el cultivo de café (15%).

Entre sus perspectivas de inversión se rescata que un 40% planea expandir superficie cítrica y hasta un 80% invertiría si contará con acceso a plantas certificadas y asistencia técnica especializada.

Como alternativas productivas ante erradicación potencial de cultivos de cítricos, los encuestados indican: ganadería (27.5%), frutales perennes (25%), café (15%) y cultivos anuales (12.5%).

Ante los potenciales impactos ambientales percibidos de perder la cobertura de cítricos, se extrae que un:

- 52% considera que cultivos o actividades sustitutas serían menos sostenibles.
- 45% prevé aumento de erosión edáfica.
- 37.5% anticipa incremento térmico por pérdida de cobertura.
- 35% alerta sobre afectación a corredores biológicos.
- 32.5% prevé reducción de biodiversidad.

En cuanto a la valoración que recibe el cultivo en la comunidad, un 87.5% califica la citricultura con 8-10/10 en importancia económica, un 47.5% le asigna puntuación máxima (10/10) (ver Figura 61).

Claramente esto demuestra implicaciones clave como una alta dependencia económica de la citricultura en las unidades de estudio y el cantón en general, una decidida

disposición a modernizar cultivos con apoyo técnico. También refleja preocupación por parte de los encuestados de las externalidades ambientales negativas de la pérdida del cultivo y denota una necesidad de implementar estrategias de reconversión productiva guiada.

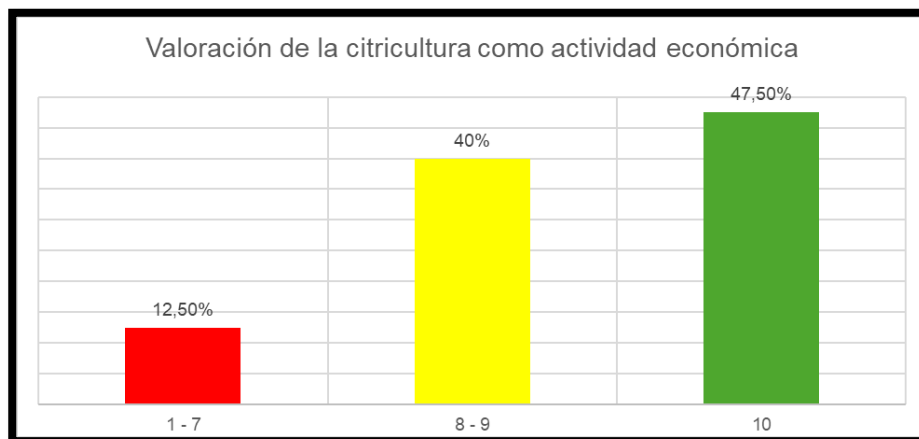


Figura 61. Distribución porcentual de la valoración económica comunitaria de la citricultura.

Percepción comunitaria sobre el arraigo de la citricultura en Hojancha

El 70% de los encuestados cuenta con familiares directamente involucrados en la actividad cítrica. El 87,5% de estos productores considera el cultivo económicamente rentable.

En contraste a la percepción cultural se identificó una notable divergencia en la valoración del arraigo cultural ya que apenas un 40% de los participantes reconoce una cultura cítrica consolidada, un 35% niega que exista una cultura cítrica y un 20% manifiesta indecisión al respecto. Entre los posibles factores explicativos se resume;

- Temporalidad del cultivo: relativa juventud de la actividad en la región.
- Déficit de difusión: estrategias insuficientes de promoción técnica y cultural.
- Brecha informativa: falta de datos oficiales sistematizados.
- Dinámica productiva: carácter familiar de las unidades productivas.

Estos hallazgos demuestran la necesidad de fortalecer la identidad citrícola mediante:

- Programas de capacitación continua.
- Espacios de intercambio generacional.
- Documentación de buenas prácticas.
- Oportunidad para institucionalizar el conocimiento tradicional.
- Importancia de articular políticas públicas que reconozcan el valor cultural de la actividad.

Este contraste perceptual sugiere que, pese a la relevancia económica demostrada, la citricultura aún no ha consolidado su dimensión identitaria en el imaginario colectivo cantonal.

Logros y desafíos ambientales en el cantón de Hojancha

La región en estudio destaca internacionalmente por su gestión comunitaria ambiental exitosa donde más del 50% del territorio presenta cobertura boscosa que evidencia estabilidad ecosistémica en el transcurso de los años, lo que ha permeado en la consolidación de una cultura ambiental en las cuencas estudiadas.

Principales desafíos identificados

Los encuestados identificaron al efecto de los vientos, y calores extremos, la caza y tala ilegal, las deficiencias en planificación urbana y en menor medida la presencia de botaderos ilegales (sin hallazgos de casos en inspecciones de campo) y la contaminación hídrica.

Los vientos y temperaturas extremas se perciben dañinos principalmente por su impacto durante la época seca, que suelen provocar daños a infraestructura habitacional, sistemas productivos y las polvaredas acarrear consecuencias a la salud pública.

La caza y tala ilegal, es una actividad que evolucionó de práctica de subsistencia a recreativa con raíces en la tradición colonial de estas tierras. Por su parte las deficiencias

en planificación urbana corresponden a la carencia de servicios básicos (agua potable, conectividad) en estos territorios y a limitaciones serias en infraestructura vial y transporte.

La carencia de infraestructura de protección (taludes, desagües, puentes, muros de contención, otros) la sobreexplotación del suelo y envenenamiento de ríos, relacionados a prácticas agrícolas, son hallazgos de interés para la gestión ambiental.

Percepción ciudadana respecto a su compromiso ambiental

Los encuestado se auto percibieron con un alto compromiso ambiental calificándose con un 7.83/10. Este compromiso se puso a prueba al consultar sobre el uso que realizaban de los centros y procesos municipales de recuperación de materiales, siendo que apenas un 35% eran usuarios frecuentes de estos servicios y un 37.5% se reconocían como usuarios ocasionales (1-2 veces/año).

Es interesante destacar que los participantes tienen una percepción que eventos como, inundaciones o intoxicaciones de agroquímicos son de rara ocurrencia en el cantón. Esto puede deberse a los fuertes controles de la oficina local de SINAC, habitar en terrenos elevados y a la baja intensidad relativa en el uso de agroquímicos en la zona en general.

Estos y otros datos se obtienen de los resultados de la encuesta que se muestran en la Figura 62.

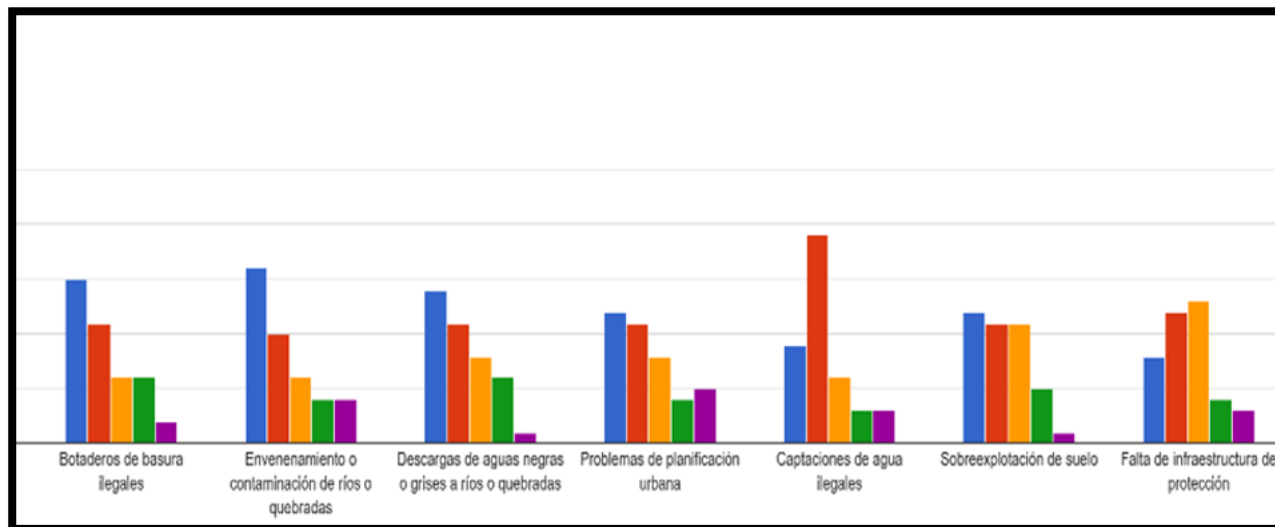
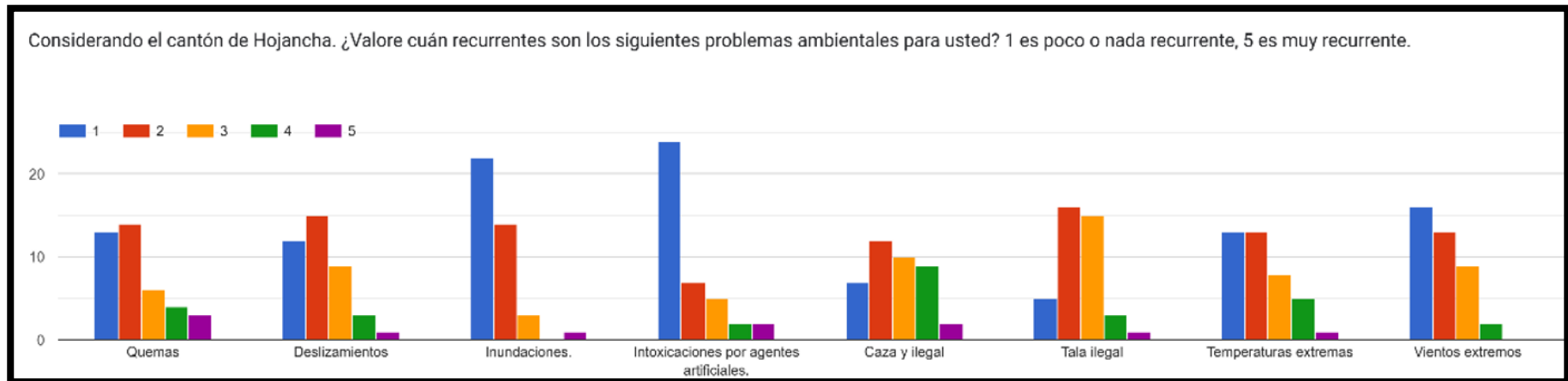


Figura 62. Jerarquización de problemáticas ambientales según percepción comunitaria.

Percepción comunitaria sobre servicios ecosistémicos: vulnerabilidad climática y prioridades ambientales

En el marco del estudio sobre las cuencas del río Nosara y río Lajas, una serie de servicios ecosistémicos fueron calificados en orden de importancia por parte de actores clave de la comunidad. Inicialmente, se identificaron los diez servicios ecosistémicos más importantes para los habitantes de la cuenca:

1. Provisión de agua.
2. Regulación de la temperatura.
3. Conservación de la biodiversidad / Conservación del suelo.
4. Mitigación de riesgos climáticos / Regulación hídrica.
5. Recreación y turismo de naturaleza.
6. Provisión de hábitat.
7. Soporte de la biodiversidad.
8. Oportunidades para la investigación y la educación.
9. Provisión de alimentos.
10. Recreación.

Definido lo anterior, se aplicó una encuesta a los vecinos para determinar su percepción sobre la importancia de cada uno de los servicios ecosistémicos enumerados. La importancia de cada servicio se midió en una escala de 1 a 5, representando 1 poca o nula importancia y 5 la máxima (ver Figura 63).

Entre los principales hallazgos puede mencionarse que los servicios ecosistémicos más valorados son: provisión hídrica (prioritario), regulación térmica y la conservación de ecosistemas y los menos: la provisión de alimentos (pese a ser zona productora de café, ganado y cítricos) y la recreación.

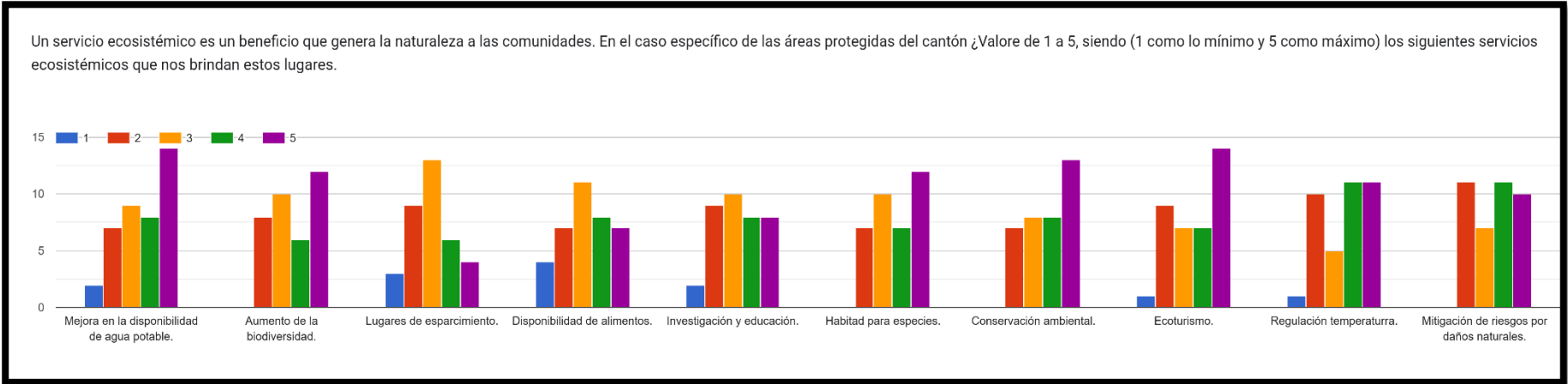


Figura 63. Resultados de la valoración de los servicios ecosistémicos percibidos en la comunidad de Hojancha.

Esto denota una paradoja en una región agrícola, una baja valoración a la provisión de alimentos, una preocupación predominante por seguridad hídrica y una alta sensibilidad al estrés térmico, lo cual claramente responde a las condiciones propias de las unidades en estudio que pertenecen a una zona amenazada por el cambio climático como lo es el corredor seco centroamericano que les expone a eventos climáticos extremos, exacerbado por la experiencia histórica de escasez recurrente del recurso hídrico y altas temperaturas.

Esta jerarquización comunitaria percibida refleja: vulnerabilidad climática latente, dependencia crítica de servicios de regulación, necesidad de fortalecer estrategias de resiliencia basadas en los ecosistemas.

Perspectiva estratégica

Los resultados evidencian una conciencia ambiental adaptativa, donde la comunidad prioriza instintivamente los servicios ecosistémicos que mitigan sus principales riesgos climáticos, incluso por encima de beneficios económicos inmediatos. Este patrón subraya la urgencia de desarrollar:

- Políticas hídricas con enfoque de cuenca.
- Soluciones basadas en naturaleza para regulación térmica.
- Reconversión productiva climáticamente inteligente.

Discusión

El presente estudio proporciona un análisis integral de las dinámicas biofísicas, socioeconómicas y de gestión ambiental en las cuencas alta del río Nosara (CarNs) y subcuenca del río Lajas (Srlj), situadas en la región montañosa de Hojanca, Guanacaste. Estos sistemas fluviales tropicales, aunque de dimensiones reducidas (46,8 km² y 81,1 km², respectivamente), presentan características morfométricas e hidrológicas diferenciadas que condicionan su vulnerabilidad a procesos erosivos y su capacidad de regulación hídrica.

Diferencias morfométricas e implicaciones hidrológicas

La CarNs exhibe una forma más compacta (factor de Horton: 0,74), lo que se traduce en un menor tiempo de concentración (0,42 h) en comparación con la SrLj (0,51 h; factor de Horton: 0,5). Esta disparidad influye directamente en la respuesta hidrológica ante eventos extremos: la CarNs presenta mayor predisposición a crecidas repentinas debido a su rápida concentración de escorrentía, mientras que la SrLj, con una red de drenaje menos densa (2,45 km/km² frente a 3,71 km/km² en la CarNs), experimenta una atenuación relativa en la generación de caudales pico. No obstante, ambas cuencas comparten un relieve accidentado (pendientes promedio del 23,29% y 32,94%, respectivamente) que, sumado a la alta densidad de drenaje, favorece la erosión hídrica, especialmente en áreas con suelos ultisoles típicos de las zonas altas del territorio, más meteorizados y menos fértiles que los alfisoles de las áreas bajas.

La estacionalidad marcada de las lluvias, con picos en septiembre y octubre, intensifica estos procesos, generando cárcavas e inestabilidad en taludes (ver Figura 64). A pesar de ello, las inundaciones son eventos poco frecuentes, atribuible a la baja densidad poblacional y a la ubicación estratégica de los asentamientos humanos en zonas con buen drenaje.

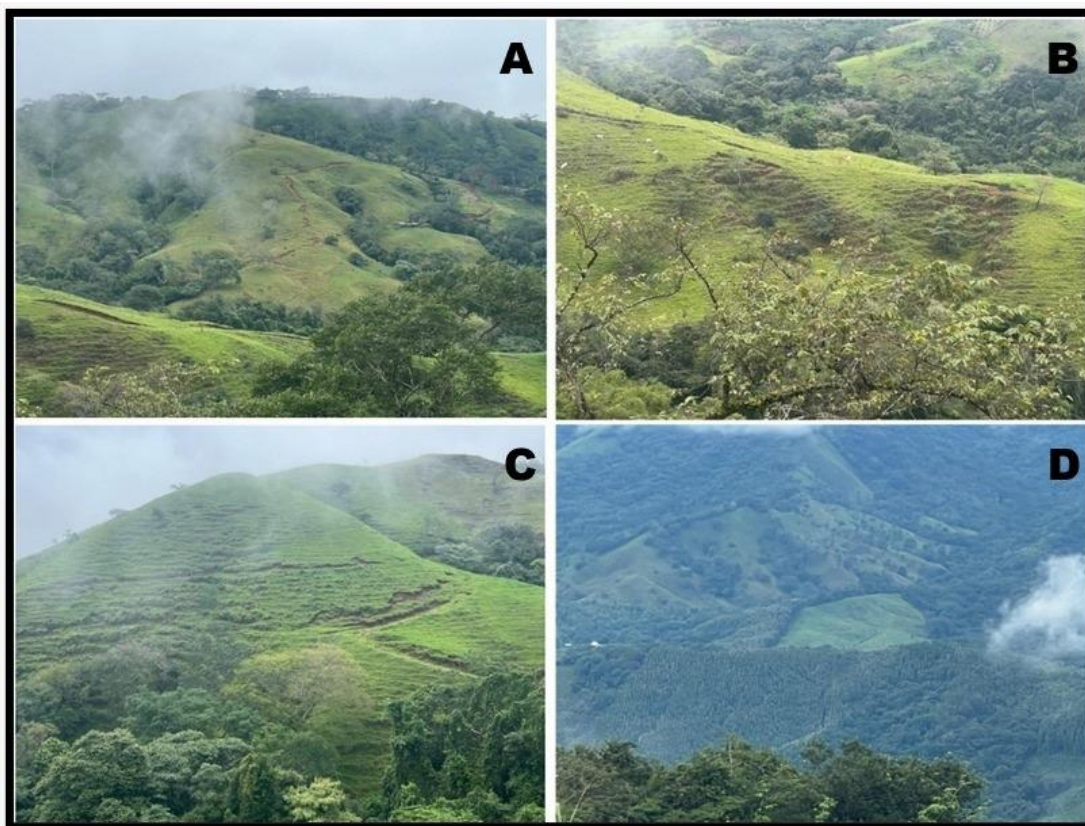


Figura 64. Potreros en las cabeceras de la CarNs (A) y SrLj (B y C) en Monte Romo, Hojancha. Potrero y finca forestal maderable (*Tectona grandis*) en la SrLj (D).

Uso del suelo y sostenibilidad socioambiental

El patrón de uso del suelo en ambas cuencas refleja una tensión histórica entre actividades productivas y conservación. La ganadería ocupa el 31,3% del área, seguida por la cobertura forestal (18,4%), mientras que la citricultura, pese a su relevancia identitaria, solo abarca el 2,1%. Esta última destaca por su menor impacto erosivo debido a la cobertura vegetal y prácticas sostenibles, además de su contribución al empleo local. Sin embargo, su viabilidad está amenazada por el Huanglongbing (HLB), lo que podría propiciar una transición hacia sistemas ganaderos extensivos con mayor potencial degradante.

La ganadería, aunque económicamente relevante, evidencia limitaciones técnicas que exacerbaban la erosión, como el sobrepastoreo y la deforestación histórica. Urge implementar sistemas silvopastoriles y técnicas de conservación de suelos para mitigar estos efectos. De lo contrario, la posible expansión ganadera ante el declive citrícola podría comprometer la estabilidad de las cuencas, especialmente en áreas con pendientes pronunciadas.

Gestión ambiental: logros y desafíos

La creación de la Zona Protectora Monte Alto (ZPMA) en 1994 marcó un hito en la gestión participativa, logrando avances significativos en la recuperación boscosa y la protección hídrica. No obstante, persisten retos como la erosión en zonas altas, la caza ilegal y la contaminación de fuentes de agua. La coexistencia de propiedades privadas (97% del área de la ZPMA) demanda mecanismos efectivos de gobernanza, como planes de manejo adaptativos e incentivos para prácticas agroforestales.

Entre las oportunidades destacan:

- Fortalecimiento de la citricultura sostenible como alternativa al HLB, integrando control biológico, prácticas de conservación de suelos y diversificación productiva.
- Reconversión ganadera hacia modelos silvopastoriles con asistencia técnica y financiera.
- Planificación territorial basada en capacidad de uso del suelo, priorizando la restauración de áreas críticas.
- Consolidación de la ZPMA como modelo de gobernanza participativa, articulando actores locales y políticas públicas.

Reflexiones finales

Las cuencas estudiadas representan sistemas socio-ecológicos complejos donde la interacción entre factores biofísicos y antrópicos define su sostenibilidad. Si bien la

comunidad de Hojanca ha demostrado capacidad de organización, ejemplificada en la ZPMA, la permanencia de amenazas como la erosión y el HLB exige una gestión adaptativa. La transición hacia sistemas productivos resilientes, junto con una planificación territorial que integre criterios hidrológicos y de conservación, será clave para garantizar la provisión de servicios ecosistémicos a largo plazo. Este estudio subraya la necesidad de políticas que equilibren desarrollo socioeconómico y preservación ambiental, especialmente en contextos tropicales con alta vulnerabilidad al cambio climático.

Conclusiones

En conclusión, la evaluación de la cuenca alta del río Nosara y subcuenca del río Lajas permite identificar los principales riesgos ambientales y las oportunidades para la gestión sostenible del territorio. Es fundamental promover prácticas de conservación de suelos, apoyar la citricultura como actividad productiva sostenible y orientar la ganadería hacia modelos más amigables con el ambiente. La participación comunitaria y la gestión integral de los recursos naturales son pilares fundamentales para el desarrollo sostenible de la región.

- La cuenca alta del río Nosara y la subcuenca del río Lajas presentan una dinámica hidrológica compleja, influenciada por su relieve accidentado, la variabilidad edáfica y la estacionalidad de las lluvias.
- La erosión del suelo es un problema relevante, aunque no severo en ambas cuencas, especialmente en áreas dedicadas a la ganadería.
- La citricultura se destaca como una actividad productiva sostenible, con un menor impacto en la erosión del suelo y un alto valor socioeconómico.
- La gestión ambiental participativa y la educación ambiental son fundamentales para la conservación de los recursos naturales y el desarrollo sostenible de la región.

Este análisis integral aporta información valiosa para la planificación del territorio y la toma de decisiones en materia de conservación y desarrollo sostenible. La participación comunitaria, la gestión integral de los recursos naturales y la adaptación al cambio climático son elementos clave para garantizar el bienestar de las generaciones presentes y futuras.

Recomendaciones

- Fortalecer las prácticas de conservación de suelos en ambas cuencas, especialmente en áreas dedicadas a la ganadería. Promover la implementación de sistemas silvopastoriles, la construcción de terrazas y el uso de cultivos de cobertura.
- Fomentar la citricultura como una alternativa productiva sostenible y promover la investigación y la innovación en este sector. Brindar asistencia técnica a los productores para el manejo integrado de plagas y enfermedades, y en materia de adaptación al cambio climático.
- Fortalecer la gestión de la ZPMA, promover la participación comunitaria en la conservación de la biodiversidad y los recursos hídricos. Implementar programas de monitoreo de la biodiversidad y la calidad del agua, y promover el ecoturismo como una alternativa económica compatible con la conservación.
- Mejorar la planificación del uso del suelo a nivel cantonal, considerando la capacidad de uso del suelo y la vulnerabilidad a la erosión. Promover la restauración de áreas degradadas y la conservación de los ecosistemas forestales.
- Fortalecer la educación ambiental a nivel local, con énfasis en la importancia de los servicios ecosistémicos y la gestión sostenible de los recursos naturales. Desarrollar programas educativos dirigidos a diferentes grupos de edad y sectores de la comunidad.
- Realizar investigaciones científicas para profundizar en el conocimiento de la dinámica de las cuencas y su respuesta a los cambios ambientales. Generar

información relevante para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y desarrollo sostenible.

Bibliografía

Abdelnour Esquivel, A., Bermudez, L., Alvarenga, S., y Rivera, C. (2006). Cultivo de meristemas, termo y quimioterapia en chayote (*Sechium edule* Jacq. Sw.) para la erradicación del virus del mosaico del chayote (ChMV). *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología* Número 77. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7229>

Adamo, S., Calvo, A., Miraglia, M., Natenzon, C. E., Roldán, I., Sabassi, F., Tissera, S., y Villa, A. (1989). Cuenca hidrográfica. Una exploración sobre el concepto. *Seminario-taller sobre uso tradicional de recursos naturales en ecosistemas de montaña*, San Salvador de Jujuy, Argentina. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/242423133_cuenca_hidrografica_una_exploracion_sobre_el_concepto

Agencia Extensión Agropecuaria de Hojancha. (2024). *Fincas dedicadas al cultivo de cítricos en Hojancha*. (Informes anuales). Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Aguirre, N. (2007). Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas. Área Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables. Carrera Ingeniería Forestal. Universidad nacional de Loja. Disponible en: https://www.academia.edu/31926541/Universidad_Nacional_de_Loja

Aguirre Tapullima, C. D., y Ordoñez Chimbo, R. B. (2019). *Estado del arte del aprovechamiento de energía geotérmica para climatización de ambientes mediante la técnica de pozo canadiense*- Trabajo de Suficiencia Profesional. Universidad Científica del Perú. Disponible en: <http://repositorio.ucp.edu.pe/items/4d8a3aff-b2ad-47f3-b5c3-be8037faea88>

Albrecht, U., Zeckri, M., y Williamson, J. (2021, abril). *Citrus Propagation*. Publicación HS1309. Disponible en: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS1309>

Alvarado, J. (2024, junio 17). Cada limón en ¢220: Enfermedad del dragón amarillo afecta los árboles de cítricos en Costa Rica y sube precio de la fruta. *El observador*. Disponible en: <https://observador.cr/cada-limon-en-220-enfermedad-del-dragon-amarillo-afecta-los-arboles-de-citricos-en-costa-rica-y-sube-precio-de-la-fruta/>

Alferez, F. (2024, marzo). *Combining individual protective covers and brassinosteroids prolongs young citrus tree health under endemic HLB*. VII International research conference of HLB, Riverside, California.

Andreo Navarro, E. (2024). *Efecto de la integral de luz diaria sobre el desarrollo de plantas de pimienta*. AGRIS. FAO. Disponible en: <https://agris.fao.org/search/en/providers/125048/records/67488b536b7cc10eeb5ac9d2>

Barrios, A. (2000). Distribución espacial del factor LS (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles con IDRISI. Aplicación en una microcuenca andina. *Revista forestal venezolana*, 44(1), 57-64. Disponible en: <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/TEC.000065946/Details>

Bassanezi, R. B., Lopes, S. A., De Miranda, M. P., Wulff, N. A., Volpe, H. X. L., y Ayres, A. J. (2020). Overview of citrus Huanglongbing spread and management strategies in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 45(3), 251-264. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00343-y>

Bataglia, O., Furlani, P., Ferrarezi, R., y Medina, C. (2008). Nutritional guidelines for citrus seedlings production. *Araraquara: Vivecitrus*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/274512230_Nutritional_guidelines_for_citrus_seedlings_production_in_Portuguese

Belasque, J., Bassanezi, R. B., Yamamoto, P. T., Ayres, A. J., Tachibana, A., Violante, A. R., Tank, A., Di Giorgi, F., Tersi, F. E. A., Menezes, G. M., Dragone, J., Jank, R. H., y Bové, J. M. (2010). Lessons from Huanglongbing management in São Paulo State, Brazil.

Journal of Plant Pathology, 92(2), 285-302. JSTOR. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/41998803>

Bové, J. (2006, abril). hHuanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. *Journal of Plant Pathology*, 88(1). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/238787611_Huanglongbing_A_destructive_newly_emerging_century-old_disease_of_citrus

Buaer, J., y Campos, J. (1986). *Madeleña, seguimiento del proyecto Leña-* [Noticias de los proyectos.]. CATIE. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3659>

Calvo, J. (1999). *Principios de hidrología forestal*. ITCR. Disponible en: <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/UP.110382/Description>

Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., López de Armentia, A., Del Río, J. L., y De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 73-97. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3832/383257036005/html/>

Campos, D. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. S. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/618945182/Procesos-del-ciclo-hidrologico-Campos-Aranda>

Cano Molina, J. (2013). *Análisis comparativo de la técnica Greb y la implementación del Pozo Canadiense, como alternativas a sistemas constructivos y de climatización convencional*.

Carvalho, S. A. de, Girardi, E. A., Mourão Filho, F. de A. A., Ferrarezi, R. S., y Coletta Filho, H. D. (2019). Advances in citrus propagation in Brazil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 41, e. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/0100-29452019422>

CEMEDE. (2022). *Construcción de Infraestructura de reservorios de Isla Venado, Puntarenas*. UNA.

CIPF. (2002). *NIMF 16. Plagas no cuarentenarias reglamentadas: Concepto y aplicación*.
FAO. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/cf2827a6-15c3-44d8-86455b2b9a8f3684/content#:~:text=La%20definici%C3%B3n%20de%20una%20plaga,juzgar%C3%A1n%20como%20aceptables%20o%20inaceptables>.

Cubero, D. (2001). *Clave de Bolsillo para Determinar la Capacidad de Uso de Las Tierras* (1er). ACCS, MAG, Araucaria. Disponible en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P32-10323.pdf>

Dannehl, D., Kläring, H.-P., y Schmidt, U. (2021). Light-mediated reduction in photosynthesis in closed greenhouses can be compensated for by CO₂ enrichment in tomato production. *Plants*, 10(12), 2808. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/12/2808>

De Pedraza Gilsanz, J., y González, R. M. C. (1996). *Geomorfología: Principios, métodos y aplicaciones*. Rueda. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/235864020_Geomorfologia_Principios_Metodos_y_Aplicaciones_Texto

Dou, H., y Niu, G. (2020). Plant responses to light. En *Plant Factory* (pp. 153-166). Elsevier. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/338806177_Plant_responses_to_light

EFSA PHL panel, Bragard, C., Dehnen-Schmutz, K., Di Serio, F., Gonthier, P., Jacques, M.-A., Jaques Miret, J. A., Justesen, A. F., Magnusson, C. S., Milonas, P., Navas-Cortes, J. A., Parnell, S., Potting, R., Reignault, P. L., Thulke, H.-H., Van der Werf, W., Civera, A. V., Yuen, J., Zappalà, L. y MacLeod, A. (2021). Pest categorisation of *Diaphorina citri*. *EFSA Journal*, 19(1), e06357. Disponible en: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6357>

Estrada Cuzcano, A., y Alfaro Mendives, K. L. (2015). El método de casos como alternativa pedagógica para la enseñanza de la bibliotecología y las ciencias de la

información. *Investigación bibliotecológica*, 29(65), 195-212. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187358X2015000100009&script=sci_abstract

Faustino, J., y Jiménez Otárola, F. (2000). *Manejo de cuencas hidrográficas*. CATIE. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8431>

FAO. (1995). Bosques, Árboles y Comunidades Rurales - Fase II - Documento de Trabajo: Estudio de Caso Sobre Investigación y Extensión Campesina - Proceso Endógeno y Lógico de Investigación Campesina. II Caso de Hojancha. Informe Final. Disponible en: <https://www.fao.org/4/x5601s/x5601s00.htm#Contents>

FAO. (2016). *Corredor seco América Central informe de situación – Junio 2016* (p. 4) [Boletín]. FAO. Disponible en: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/emergencias/docs/CorredorSeco-Infomedesituacio%CC%81nJunio%202016.pdf

Finol, M. (2020, junio). Paradigmas, enfoques y métodos de investigación: Análisis teórico. *Mundo Recursivo*, 3(1). Disponible en: <https://www.atlantic.edu.ec/ojs/index.php/mundor/article/view/38>

Foster, G. (1996). RUSLE User's Guide. *Soil and Water Conservation Society*.

Fundecitrus. (2024). *Tree inventory of the São Paulo and westsouthwest Minas Gerais citrus belt: Snapshot of groves in March 2024/* (2446-7731). Disponible en: https://www.fundecitrus.com.br/pdf/pes_relatorios/2024_06_10_Tree_Inventory_and_Orange_Crop_Forecast_2024-2025.pdf

García, Y., Ramos, Y., Sotelo Cardona, P., y Kondo, T. (2016). Biología de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) bajo condiciones de invernadero en Palmira, Colombia. *Revista colombiana de entomología*, 1, 36-42. Disponible en: <https://doi.org/10.25100/socolen.v42i1.6667>

Gaspari, F. J., Vagaría, A. M. R., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., y Besteiro, S. I. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Augm Domus*, 4, 143-158. Disponible en: <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/476>

Ghosh, D., Kokane, S., Savita, B. K., Kumar, P., Sharma, A. K., Ozcan, A., Kokane, A., y Santra, S. (2023). Huanglongbing Pandemic: Current Challenges and Emerging Management Strategies. *Plants*, 12(1). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants12010160>

Gmitter, F. G., y Hu, X. (1990). The possible role of Yunnan, China, in the origin of contemporary citrus species (rutaceae). *Economic Botany*, 44(2), 267-277. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF02860491>

Gómez, C. V., y Arellano, H. O. (2016). Balance hidrológico. Comparación del método de Holdridge y Thornthwaite para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial (EVTp). *Geográfica digital*, 13(25), 1-24. Disponible en: <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/geo/article/view/2328>

Gómez, A. 2020. Caracterización de una cuenca: principios y métodos. Serie de Seminarios Virtuales 2020. Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMI). México. 40 pp. Disponible en: https://www.riego.mx/files/webinars/webinar04.pdf?utm_source=chatgpt.com

Gómez, J. E. (2006). Certificación de cítricos: Una herramienta de buenas prácticas agrícolas. *Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.12324/15601.*

González de Tánago, M. (1991). La ecuación universal de pérdidas de suelo: Pasado, presente y futuro. Disponible en: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/1eb544bb-e794-44e4-9178-7dc60967ecfa>

Gottwald, T. R. (2010). Current epidemiological understanding of citrus huanglongbing. *Annual review of phytopathology*, 48(1), 119-139. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20415578/>

Gravelius, H. (1914). *Flusskunde*. Goschen'sche Verlagshandlung.

G.Vidalakis, Da Graca, J., Dixon, W., Ferrin, D., Kesinger, M., R.R.Krueger, R.F.Lee, M.J.Melzer, J.Olive, M.L.Polek, P.J.Siebert, L.L.Williams, y G.C.Wright. (2010a). Citrus quarantine, sanitary, and certification programs in the USA. Prevention of introduction and distribution of citrus diseases. Part 1—Citrus quarantine and introduction programs. *Citrograph*, 1, 26-35. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/280881585_Citrus_quarantine_sanitary_and_certification_programs_in_the_USA_Prevention_of_introduction_and_distribution_of_citrus_diseases_Part_1_-_Citrus_quarantine_and_introduction_programs

G.Vidalakis, Da Graca, J., Dixon, W., Ferrin, D., Kesinger, M., R.R.Krueger, R.F.Lee, M.J.Melzer, J.Olive, M.L.Polek, P.J.Siebert, L.L.Williams, y G.C.Wright. (2010b). Citrus quarantine, sanitary, and certification programs in the USA. Prevention of introduction and distribution of citrus diseases. Part 2— Certification schemes and national programs. *Citrograph*, 1, 27-39. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/280881760_Citrus_quarantine_sanitary_and_certification_programs_in_the_USA_Prevention_of_introduction_and_distribution_of_citrus_diseases_Part_2_-_Certification_schemes_and_national_programs

Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida* (Número 83). IICA Biblioteca Venezuela. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/items/ebeb4482-85b8-4be0-81dc-f0ee12c9e348>

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions of the American Geophysical Union*, 13(1), 350-361. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/TR013i001p00350>

Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., y Gisbert Blanquer, J. M. (2011). *Morfología de las cuencas hidrológicas*. Disponible en: <https://riunet.upv.es/entities/publication/c5014341-19a0-446f-82e6-c00a5a30d1e3>

IICA. (2021). *Nueva metodología con crioterapia elimina virus en plantas de piña por Embrapa*. Disponible en: <https://www.redinnovagro.in/noticiaE.php?idenNoticia=5719>.

Jahun, B., Ibrahim, R., Dlamini, N., y Musa, S. (2015). Review of soil erosion assessment using RUSLE model and GIS. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 5(9), 36-47. Disponible en: <https://core.ac.uk/reader/234660977>

Jara, O. (1994). Para sistematizar experiencias. Alforja San José. Disponible en: https://centroderecursos.alboan.org/ebooks/0000/0788/6_JAR_ORI.pdf

Jones, R. (2024, junio 3). USDA Reports Florida's Citrus Production Is At Record Lows [Sitio Web]. Disponible en: <https://precisionriskmanagement.com/news/usda-reports-floridas-citrus-production-is-at-record-lows/>

Kesinger, M. (2013). *DPI Division of Plant Industry*. Florida Department of Agriculture and Consumer Services. Disponible en: <https://ccmedia.fdacs.gov/content/download/25182/file/Citrus-Nursery-Stock-Certification-Manual-02-14-13.pdf>

Latorre, A. (2004). La investigación-acción. *Conocer y cambiar la práctica educativa*, pp 121. Disponible en: <https://www.uv.mx/rmipe/files/2019/07/La-investigacion-accion-conocer-y-cambiar-la-practica-educativa.pdf>

Lee, R. F. (2004). Certification Programs for Citrus. En S. A. M. H. Naqvi (Ed.), *Diseases of Fruits and Vegetables Volume I: Diagnosis and Management* (pp. 291-305). Springer Netherlands. Disponible en: https://doi.org/10.1007/1-4020-2606-4_6

Lee, R. F., y Garnsey, S. M. (1996). Citrus Virus and Viruslike Pathogens: A Continuing Evolution of Progress and Problems. *International Organization of Citrus Virologists*

Conference Proceedings (1957-2010), 13(13). Disponible en:
<https://doi.org/10.5070/C57K2397D9>

Lee, R. F., Keremane, M. L., y Ramadugu, C. (2021). Use of young plants for biological indexing of graft transmissible pathogens of citrus. *Crop Protection*, 143, 105524. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105524>

Lianes, E., Marchamalo, M., y Roldan, M. (2009). Evaluación del factor c de la rusle para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, costa rica. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 217-235. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6722>

Luvai, A., Obiero, J., y Omuto, C. (2022). Soil Loss Assessment Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Model. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022(1), 2122554. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2022/2122554>

Madariaga, M., Ramírez, I., Nuñez, Y., Molina, A., y Horta, M. (2020). Producción de plantas de ajo libres de virus. *del ajo (Allium sativum)*, 31. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/654309408/Boletin-INIA-N-424>

Madrigal, P., Solís, R., y Ayales, I. (2012). La experiencia forestal de Hojancha Más de 35 años de restauración forestal, desarrollo territorial y fortalecimiento social. *Serie técnica. Boletín técnico/CATIE*, 50, 96. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8671>

MAG. (1983). *Programa para la Conservación de Recursos Naturales Renovables (CORENA). Prestamo GCR/AID-515T-032*. (p. 47) [Programa]. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Disponible en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P01-3502.pdf>

Maidment, D. R. (1993). *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill LLC. Disponible en: <https://www.mhprofessional.com/handbook-of-hydrology-9780070397323-usa>

Malleswara Rao, B., Umamahesh, N., y Reddy, G. T. (2005). GIS based soil erosion modelling for conservation planning of watersheds. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 11(3), 11-23. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/254244807_Gis_based_soil_erosion_modelling_for_conservation_planning_of_watersheds

Melville, R. (1997). El concepto de cuencas hidrográficas y la planificación del desarrollo regional. *Nueve estudios sobre el espacio: representación y formas de apropiación*, 77-90 p. Disponible en: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-12/010013213.pdf

Méndez Chávez, M. (2014). Evaluación del efecto de la aplicación de métodos criogénicos sobre el saneamiento del virus del mosaico de la caña de azúcar (*Surgarcane Mosaic Virus, SCMV*). Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/items/0dcea6d9-e8d4-4dae-90e2-efb9d636a134>

Méndez, M., y García, J. (2017). Experiencia de Manejo Participativo Fundación Pro-Reserva Monte Alto Sinac/ACT. Infoterra Editores S.A. Disponible en: <https://www.sinac.go.cr/ES/partciudygober/Sistematizacion%20Experiencias/INFORME%202%20-%20MONTE%20ALTO.pdf>

Méndez, D. (2022). La Reserva Natural Monte Alto: La historia de una comunidad que se unió para restaurar y proteger sus fuentes de agua y la biodiversidad de su entorno. Red Latinoamericana de Bosques Modelo (RLABM). 15-20 p. Disponible en: <https://bosquesmodelo.net/wp-content/uploads/2024/02/Foro-Restauracion.pdf>

MIDEPLAN. (2023). *Indice de Desarrollo Social, 2023*. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. Disponible en: <https://documentos.mideplan.go.cr/share/s/Ye4P-LqDQqqjSD5jn6T4rQ>

Moreno, P., Ambrós, S., Albiach-Martí, M., Guerri, J., y Peña, L. (2008). Citrus tristeza virus: A pathogen that changed the course of the citrus industry. *Molecular plant pathology*, 9, 2. Disponible en: doi.org/10.1111/j.1364-3703.2007.00455.x.

Moyroud, N., & Portet, F. (2018). Introduction to QGIS. *QGIS and generic tools*, 1, 1-17. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/322621930_Introduction_to_QGIS

Mukhopadhyay, S. (2004). *Citrus Production, Post Harvest, Disease and Pest Management* (1 st). Boca Ratón. CRC Press. 290 pp. Disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482280210/citrus-mukhopadhyay>

Navarro, L. (1992). Citrus Shoot Tip Grafting in Vitro. En Y. P. S. Bajaj (Ed.), *High-Tech and Micropropagation II* (pp. 327-338). Springer Berlin Heidelberg. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-642-76422-6_17

NCPN-Citrus. (2024). *Our clean plant centers and programs*. [Sitio Oficial]. Disponible en: <https://www.nationalcleanplantnetwork.org/citrus-1>

OIRSA, y ICDF. (2015). *Protocolo para la producción de plantas sanas de cítricos*. Disponible en: https://www.oirsa.org/contenido/2018/Sanidad_Vegetal/WEB%20-%20DRSVUCom%20HLB/HLB/Protocolos%20HLB/Produccion%20de%20planta%20sana_Final.pdf

OIRSA. (2017). *Avanza producción de plantas sanas de cítricos de proyecto HLB en Nicaragua* [Sitio Web]. Disponible en: <https://web.oirsa.org/avanza-produccion-de-plantas-san-as-de-citricos-de-proyecto-hlb-en-nicaragua/>

OIRSA, I. (2019). *Compendium para el manejo integrado del HLB*. FyG editores. Disponible en: <https://web.oirsa.org/wp-content/uploads/2024/01/Compendio-HLB.pdf>

Ollitrault, P., Curk, F., y Krueger, R. (2020). Chapter 4—Citrus taxonomy. En M. Talon, M. Caruso, & F. G. Gmitter (Eds.), *The Genus Citrus* (pp. 57-81). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812163-4.00004-8>

OMC. (1994). *OMC | Medidas sanitarias y fitosanitarias—Explicación del Acuerdo de la OMC sobre la Aplicación de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias*. Disponible en: https://www.wto.org/spanish/tratop_s/sps_s/spsund_s.htm

OMC. (2024). *La OMC y la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF)* [Sitio Oficial]. Disponible: https://www.wto.org/spanish/thewto_s/coher_s/wto_ippc_s.htm

Ordoñez Galvez, J. J. (2011). *Cartilla técnica: Aguas subterráneas-acuíferos*. Sociedad Geográfica de Lima.v Disponible en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf

Palaka, R., y Sankar, G. J. (2016). Study of watershed characteristics using Google Elevation Service. *Geospatial world*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/260595644_Study_of_Watershed_Characteristics_using_Google_Elevation_Service

Passos, O. S., Da Cunha Sobrinho, A. P., & Santos Filho, H. P. (2000). Citrus Certification Programs in Brazil. *International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings (1957-2010)*, 14(14). Disponible en: <https://doi.org/10.5070/C50892Z8KX>

Peña, L. (2024, marzo 26). *Nuevos hallazgos HLB*. International reasearch conference on HLB VII., Riverside, California.

Pina, J., Chomé, P., Vives, M., & Navarro, L. (2015). The citrus nursery tree certification program in Spain. *Acta Horticulturae*, 745-751. Disponible en: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1065.93>

PNUD. (2023). *Atlas de Desarrollo Humano Cantonal en Costa Rica, 2022*. Disponible en: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-06/informe_atlas_de_desarrollo_humano_cantonal.pdf

Ramakrishna, B. (1997). *Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: Conceptos y experiencias* (Número 3). IICA. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/items/a193c94c-e9b9-41c8-8016-fe79aa826682>

Ramírez, M. (2015). *Evaluación de la efectividad de manejo en las Áreas Silvestres Protegidas del Área de Conservación Tempisque, Costa Rica*. CATIE. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8210/Evaluacion_de_la_efectividad_de_manejo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ramírez-Granados, P., Alfaro-Jiménez, K., Álvarez-Jiménez, M., Solís-Torres, L. D., y Castro Solís, J. (2021). *Revista geográfica de américa central*, 67, 121-143. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/4517/451768112005/451768112005.pdf>

Renard, K., Weesies, G., Foster, G., McCool, D., y Yoder, D. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture. Disponible en: <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/ruslech2.pdf>

Reyes, T. (1999). Métodos cualitativos de investigación: Los grupos focales y el estudio de caso. *Forum empresarial*, 4(2), 74-87. Disponible en: <https://revistas.upr.edu/index.php/forumempresarial/article/view/2913>

Rolón, R., Vertoni, E., De los Santos, A., Goncálvez, L., Maeso, D., Bertalmío, A., y Rivas, F. (2023). La microinjertación de cítricos como herramienta para evitar la difusión de enfermedades transmisibles por injerto. *Revista INIA*, 75, 77-80. Disponible en: <https://www.inia.uy/la-microinjertacion-de-citricos-como-herramienta-para-evitar-la-difusion-de-enfermedades>

Ross, K. (2014). *Citrus Nursery Stock Pest Cleanliness Program*. Disponible en: https://www.cdfa.ca.gov/plant/pe/nsc/docs/regs/ccr_3701_citrus.pdf

Salazar, J., y Vásquez, C. (2024, junio 16). *Comunicación personal. Importancia económica de la citricultura en Nandayure y Hojancha. Gerencias de Coopecerroazul y Coocepilangosta*. [Oral]. Comisión regional de cítricos territorio NAHONI.

Salazar, M. (2003). *Evaluación de la restauración del paisaje en el cantón de Hojancha, Guanacaste, Costa Rica*. [Mag. Sc.]. CATIE. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1956>

Santivañez, T., Vernal, P., Mora-Aguilera, G., Díaz, G., & López-Arroyo, I. (2013). *Citrus: Marco Estratégico para la Gestión Regional del Huanglongbing en América Latina y el Caribe*. FAO. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/be30e590-f015-4e97-b7e2-473e8c306509/content>

SFE. (2024). *Huanglongbing o Dragón amarillo*. Disponible en: https://www.sfe.go.cr/SitePages/HLB/HLB_Inicio.aspx

Singh, A. K., Meetei, N. T., Kundu, S., Salma, U., y Mandal, N. (2019). In vitro micrografting using three diverse indigenous rootstocks for the production of Citrus tristeza virus-free plants of Khasi mandarin. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 55, 180-189. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/328817023_In_vitro_micrografting_using_three_diverse_indigenous_rootstocks_for_the_production_of_Citrus_tristeza_virus-free_plants_of_Khasi_mandarin

Statista. (2022). *Fruit: World production by type 2022*. Statista. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/264001/worldwide-production-of-fruit-by-variety/>

Strahler, a. n. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *gsa Bulletin*, 63(11), 1117-1142. Disponible en: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:haoet\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:haoet]2.0.co;2)

Taylor, S. J., y Bogdan, R. (1987). *Introducción a los métodos cualitativos de investigación* (Vol. 1). Paidós Barcelona. 301 pp. Disponible en: <https://pics.unison.mx/maestria/wp-content/uploads/2020/05/Introduccion-a-Los-Metodos-Cualitativos-de-Investigacion-Taylor-S-J-Bogdan-R.pdf>

Teixeira, D. do C., Wulff, N., Lopes, S., Yamamoto, P., Miranda, M. de, Spósito, M., Belasque Júnior, J., & Bassanezi, R. (2010). Characterization and etiology of the bacteria associated with huanglongbing. *Citrus Research and Technology*, 31(2), 115-118. CABI Databases. Disponible en: <https://doi.org/10.5935/2236-3122.20100012>

Thakuria, D., Chaliha, C., Dutta, P., Sinha, S., Uzir, P., Singh, S. B., Hazarika, S., Sahoo, L., Kharbikar, L. L., y Singh, D. (2023). Citrus Huanglongbing (HLB): Diagnostic and management options. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 125, 102016. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102016>

Thlakma, S., Iguisi, E., Odunze, A., y Jeb, D. (2018). Estimation of soil erosion risk in mubi south watershed, adamawa state, Nigeria. *J Remote Sensing & GIS*, 7(226), 2. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/324649262_Estimation_of_Soil_Erosion_Risk_in_Mubi_South_Watershed_Adamawa_State_Nigeria

Trujillo, A. R., Barroso, F. U., y Escobar, Y. C. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* (Vol. 5). Universidad del Valle. <https://programaeditorial.univalle.edu.co/gpd-guia-basica-para-la-caracterizacion-morfometrica-de-cuencas-hidrograficas-9789586708555-63324b79e35bd.html>

UCR. (2007). *CCPP. Citrus Clonal Protection Program*. University of California Riverside. Disponible en: <https://ccpp.ucr.edu/facilities/CCPP.pdf>

USDA. (2024). *Citrus Production Forecast (Historic)* [Sitio Oficial]. Disponible en: https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_State/Florida/Publications/Citrus/Citrus_Forecast/history.php

Valverde, J., Vieto Morales, R., y Pacheco, A. (1995). *Estudio de caso sobre investigación y extensión campesina. Proceso endógeno y lógico de investigación campesina. Informe final. Bosques, árboles y comunidades rurales. Fase II. Documento de trabajo*. Disponible en: <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/UNANI.028206/Description>

Vapnek, J. (2009). *Legislatively establishing a health certification programme for citrus*. FAO. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/cf4f94a0-2b31-4d45-8798-18a47fd88452/content>

Vega-Almeida, R., y Marti-Lahera, Y. (2005). *Converging and diverging points in the objective and subjective representation of information sources*. 13. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/297359153_Converging_and_diverging_points_in_the_objective_and_subjective_representation_of_information_sources

Vega, F., y Wilfredo, J. (2023). *Integral de luz diaria para la producción de plántula de chile morrón con sistema de iluminación LED*. Disponible en: <http://repositorio.uas.edu.mx/jspui/browse?type=author&order=ASC&rpp=20&value=F%C3%A9lix+Vega%2C+Jes%C3%BAs+Wilfredo>

Wang, M.-R., Cui, Z.-H., Li, J.-W., Hao, X.-Y., Zhao, L., y Wang, Q.-C. (2018). In vitro thermotherapy-based methods for plant virus eradication. *Plant methods*, 14, 1-18. Disponible en: <https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-018-0355-y>

Wang, Q., y Valkonen, J. P. (2009). Cryotherapy of shoot tips: Novel pathogen eradication method. *Trends in Plant Science*, 14(3), 119-122. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19217342/>

Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (2000). *Terrain analysis: Principles and applications*. John Wiley & Sons. 524 pp. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-us/Terrain+Analysis%3A+Principles+and+Applications-p-9780471321880>

Zamora-Rodríguez, V., Peña, I., Hernández Rodríguez, L., & Cueto-Rodríguez, J. (2016). *Producción de material de propagación certificado de cítricos / Production of certified propagation material of citrus*. 33, 3-13. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/326479791_produccion_de_material_de_propagacion_certificado_de_citricos_production_of_certified_propagation_material_of_citrus

Zhang Shanghong, Zhao Bohua, & Erdun E. (2014). Watershed Characteristics Extraction and Subsequent Terrain Analysis Based on Digital Elevation Model in Flat Region. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(11), 04014023. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000961](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000961)

Zhou, C. (2020). The status of citrus Huanglongbing in China. *Tropical Plant Pathology*, 45(3), 279-284. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00363-8>

ANEXOS

Anexo 1. Calendario de actividades del proyecto 2024.

