



Universidad Nacional del Litoral

Facultad de Ciencias Agrarias

Tesis presentada para optar al grado de Doctor en Ciencias Agrarias

Determinación de la aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca utilizando sistemas de información geográfica

Doctoranda Esp. Ing. Agr. Florencia Cecilia Trabichet

Director: Dr. Gustavo Buzai. Universidad Nacional de Luján. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

Co-director: Dr. Norberto Gariglio. Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral.

Tribunal evaluador:

Dr. Raúl Emiliano Quiroga

Dr. Walter Sione

Dra. Mercedes Arias-Sibillotte

Lugar de trabajo: Departamento de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Luján, Luján, Buenos Aires.

Diciembre 2023

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis y beca doctoral, el Dr. Gustavo Buzai, por sus aportes teóricos-metodológicos, y su consejo permanente desde que inicié mi carrera de doctorado.

A mi co-director, el Dr. Norberto Gariglio, por aportar sus valiosos conocimientos y su guía en el desarrollo de esta tesis.

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral, por brindarme la posibilidad de realizar mi formación de doctorado, en especial a las autoridades y docentes de la carrera de Doctorado en Ciencias Agrarias, y a la Secretaría de Posgrado y Formación Continua.

A la Universidad Nacional de Luján, por haberme permitido formarme como Ingeniera Agrónoma y Especialista en Teledetección y SIG, y por brindarme el espacio físico y temporal para poder cumplir con esta nueva etapa de mi formación.

A mis compañeros de trabajo de la asignatura Elementos de Diagnóstico en los Recursos Naturales, de la carrera Ingeniería Agronómica de la UNLu, por su apoyo permanente, especialmente al Dr. Eloy Montes-Galbán por sus aportes teóricos-metodológicos.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por financiar el último trayecto de mi carrera con una beca de finalización de doctorado.

Al sector pecanero argentino, por embarcarse en la novedosa y noble tarea de producir nuez pecán. En especial a mi socia y amiga, la Ing. Sofía Arri, por permitirme a través del intercambio y asesoramiento enriquecer mis conocimientos.

Por último, pero no menos importante, a mis afectos: mis amigas, mis amigos, mi pareja, y mi familia. Por ser y estar siempre del otro lado, apoyando incondicionalmente.

INDICE GENERAL

	Página
INDICE DE CUADROS	VII
INDICE DE FIGURAS	VIII
GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
1.INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
1.1. El nogal pecán	2
1.1.1. Descripción de la especie	2
1.1.2. Producción y comercio mundial de pecán	4
1.1.3. Producción de nuez pecán en Argentina	6
1.1.3.1. La cadena productiva de la Nuez Pecán en Argentina	7
1.1.3.1.1. Insumos	7
1.1.3.1.2. Producción primaria	7
1.1.3.1.3. Procesamiento	8
1.1.3.1.4. Canales de comercialización	9
1.1.4. Investigaciones llevadas a cabo en Argentina	9
1.2. Área de estudio	13
1.2.1. Elección del área de estudio	13
1.2.2. Área de estudio: la provincia de Catamarca	14
1.2.2.1. Regiones según precipitaciones, relieve y actividades económicas principales	15
1.2.2.1.1. Región Centro	17
1.2.2.1.2. Región Oeste	17
1.2.2.1.3. Región Puna	17
1.2.2.1.4. Región Este	18
1.2.2.2. Caracterización productiva	18
1.2.2.2.1. Minería	18
1.2.2.2.2. Agricultura y ganadería	19
1.2.2.3. Riego en Catamarca	21
1.2.2.3.1. Recursos hídricos	21
1.2.2.4. Antecedentes para el cultivo de la nuez de Pecán en Catamarca	24
1.3. Los SIG en la determinación de aptitud de tierras	26
1.3.1. Conceptos generales	26
1.3.2. Evaluación multicriterio	28
1.3.3. Antecedentes de los SIG en la evaluación de tierras	31
1.4. Hipótesis y objetivos	32
1.5. Objetivos específicos	32
2. METODOLOGÍA	33
2.1. Selección de criterios	34
2.2. Modelado cartográfico	35
2.2.1. Fuentes de datos para el modelado cartográfico	38
2.2.2. Estandarización	39
2.2.2.1. Estandarización por lógica fuzzy	39
2.2.2.2. Estandarización booleana	41
2.2.2.3. Estandarización por puntaje de clasificación espacial omega	42
2.3. Ponderación de mapas de factores por ranking recíproco	42

2.4. Combinación lineal ponderada	44
2.4.1. Mapa de aptitud para la producción de pecán	45
2.4.2. Mapa de distribución óptima de plantas de procesamiento	46
2.5. Esquemas de procedimientos	47
2.6. Metodología específica para el modelado cartográfico de cada variable	47
2.6.1. Factores climáticos	48
2.6.1.1. Procesamiento de los datos	49
2.6.1.2. Modelado de las horas frío anuales	49
2.6.1.2.1. Estimación de HF con datos del Modelo WorldClim	50
2.6.1.2.2. Estimación de HF con datos de estaciones meteorológicas	50
2.6.1.2.3. Promedio de HF obtenidas en ambos métodos	50
2.6.1.3. Mejora de la resolución espacial de las capas Tmin, Max y Pp	51
2.6.1.4. Estandarización fuzzy	51
2.6.2. Factores edáficos	52
2.6.2.1. Procesamiento de los datos	52
2.6.2.2. Asignación de índices de aptitud a las unidades cartográficas	52
2.6.2.2.1. Criterio Profundidad	53
2.6.2.2.2. Criterio Textura	54
2.6.2.2.3. Criterio Drenaje	55
2.6.2.2.4. Criterio Rocosidad	56
2.6.2.2.5. Criterio Salinidad	57
2.6.2.2.6. Criterio Anegamiento	58
2.6.2.3. Estandarización por Puntaje Omega y cálculo de PCE	59
2.6.2.4. Rasterizado	59
2.6.2.5. Estandarización fuzzy	60
2.6.3. Factor altura	60
2.6.3.1. Procesamiento de datos	60
2.6.3.2. Estandarización fuzzy	60
2.6.4. Factor disponibilidad de recursos hídricos	60
2.6.4.1. Recursos hídricos superficiales (ríos y cursos de agua)	61
2.6.4.1.1. Procesamiento de las imágenes	62
2.6.4.1.2. Digitalización de la capa recursos hídricos superficiales	62
2.6.4.1.3. Clasificación de los polígonos digitalizados	64
2.6.4.2. Recursos hídricos subterráneos	64
2.6.4.2.1. Digitalización de polígonos	65
2.6.4.2.2. Clasificación de los polígonos digitalizados	66
2.6.4.3. Rasterización de las capas	66
2.6.4.4. Obtención de capa recursos hídricos totales	66
2.6.4.5. Estandarización fuzzy	67
2.6.5. Restricciones territoriales	67
2.6.5.1. Procesamiento de los datos	67
2.6.5.2. Rasterización y estandarización booleana	68
2.6.5.3. Obtención de mapa de restricciones global	69
2.6.6. Factores socio-económicos	69
2.6.6.1. Procesamiento de los datos	69

2.6.6.2. Generación de mapas de distancias	70
2.6.6.3. Estandarización fuzzy	70
3. RESULTADOS	72
3.1. Mapas de factores y restricciones involucrados en la obtención del mapa de aptitud para producir nogal pecán en la provincia de Catamarca	73
3.1.1. Mapas de los factores climáticos	73
3.1.1.1. Horas frío anuales	73
3.1.1.2. Temperatura máxima del mes más cálido	74
3.1.1.3. Temperatura mínima del mes más frío	75
3.1.1.4. Precipitaciones anuales	76
3.1.2. Mapas de los factores edáficos	77
3.1.3. Mapa del factor altura	81
3.1.4. Mapa del factor disponibilidad de recursos hídricos	81
3.1.5. Mapas de las restricciones territoriales	83
3.2. Mapa de aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca	84
3.3. Mapas de los factores socioeconómicos utilizados para modelar la localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán	88
3.3.1. Mapas de distancias de las variables socioeconómicas	88
3.3.2. Mapas de los factores socioeconómicos	90
3.4. Mapa de localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán	92
4.DISCUSIÓN	95
4.1. Factores y restricciones involucrados en la obtención del mapa de aptitud para producir nogal pecán en la provincia de Catamarca	96
4.1.1. Factores climáticos	96
4.1.1.1. Horas frío	97
4.1.1.2. Temperatura máxima del mes más cálido	101
4.1.1.3. Temperatura mínima del mes más frío	104
4.1.1.4. Precipitaciones anuales	105
4.1.2. Factor suelos	107
4.1.2.1. Anegamiento	108
4.1.2.2. Drenaje	109
4.1.2.3. Profundidad	109
4.1.2.4. Rocosidad	110
4.1.2.5. Salinidad	111
4.1.2.6. Textura	111
4.1.2.7. Puntaje Omega y factor suelos	112
4.1.3. Altura sobre el nivel del mar	113
4.1.4. Disponibilidad de recursos hídricos para riego	115
4.1.4.1. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Abaucán	117
4.1.4.2. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca Salar de Pipanaco	117
4.1.4.3. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Santa María	118
4.1.4.4. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca Valle Central (o Falda Oriental de Ambato)	118
4.1.4.5. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca Falda Oriental de Ancasti	119

4.1.4.6. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca Santa Rosa (o Laguna Mar Chiquita)	119
4.1.5. Restricciones territoriales	120
4.2. Mapa de aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca	124
4.3. Factores involucrados en la obtención del mapa de distribución óptima de plantas de procesamiento para nuez pecán en la provincia de Catamarca	131
4.4. Mapa de localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán	133
5.CONCLUSIONES	137
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
ANEXOS	157

INDICE DE CUADROS

	Página
2.1 Factores y restricciones generados.	36
2.2 Funciones de estandarización fuzzy aplicadas para cada grupo de factores.	41
2.3 Valores de ponderación obtenidos por ranking recíproco para los factores involucrados en la obtención del mapa final de aptitud.	43
2.4 Valores de ponderación obtenidos por ranking recíproco para los factores involucrados en el mapa de distribución óptima de plantas de procesamiento.	44
2.5 Factores y restricciones involucradas en la determinación de aptitud para producir pecán en Catamarca.	45
2.6 Clases de aptitud asignadas al mapa final de aptitud.	46
2.7 Puntos de inflexión para la estandarización fuzzy de las variables climáticas.	51
2.8 Categorías de aptitud para el nogal pecán de acuerdo al esquema FAO (1976).	53
2.9 Asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio profundidad.	53
2.10 Asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio textura.	54
2.11 Asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio drenaje.	55
2.12 Asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para la variable rocosidad.	56
2.13 Asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio salinidad	57
2.14 Asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio anegamiento.	59
2.15 Productos Landsat 8 OLI descargados para la elaboración de un mosaico con composición falso color compuesto de la provincia de Catamarca.	62
2.16 Descripción de los criterios de interpretación visual empleados para la digitalización de los recursos hídricos superficiales.	63
2.17 Asignación de índices a las clases de recursos hídricos superficiales digitalizadas.	64
2.18 Reclasificación de los resultados numéricos de la capa recursos hídricos totales y asignación de clases de aptitud de los recursos hídricos totales.	66
2.19 Puntos de inflexión aplicados en la función fuzzy para cada factor socioeconómico utilizado para la identificación de sitios de localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán en la provincia de Catamarca.	71
3.1 Reporte de áreas (km ²) aptas y no aptas de acuerdo a las restricciones territoriales involucradas en la determinación de la aptitud para producir nogal pecán en Catamarca.	84
3.2 Reporte de áreas (en km ² y en porcentaje sobre el total) para cada una de las categorías de aptitud que se presentan en el mapa final de aptitud	86
3.3 Reporte de áreas (en km ² y en porcentaje sobre el total) para cada una de las categorías de aptitud que se presentan en el mapa de localización óptima de plantas de procesamiento para nogal pecán.	93

INDICE DE FIGURAS

	Página
1.1	Zonificación para la producción de pecán en Argentina. 10
1.2	Zonificación agroclimática para producción de nuez pecán en Argentina. 12
1.3	Situación relativa de la provincia de Catamarca dentro de Argentina 15
1.4	Ecorregiones de la provincia de Catamarca de acuerdo a IDECAT. 16
1.5	Cuencas hidrográficas de Catamarca. 22
1.6	Regiones naturales de riego y departamentos de Catamarca. 24
1.7	Esquema de procedimiento multicriterio-uniobjetivo. 31
2.1	Función sigmoidea simétrica. 40
2.2	Función fuzzy lineal creciente. 40
2.3	Función lineal decreciente. 41
2.4	Esquema del procedimiento utilizado para la obtención del mapa de aptitud para la producción de pecán en Catamarca. 47
2.5	Esquema del procedimiento utilizado para la obtención de mapa de localización óptima de plantas de procesamiento. 47
3.1	Horas frío anuales estimadas por método Damario (1998), a partir de datos de estaciones meteorológicas y de WorldClim (a). Factor horas frío anuales (HF) estandarizado por lógica fuzzy (b). 74
3.2	Distribución espacial de las temperaturas máximas (Tmax) del mes más cálido para la provincia de Catamarca (medias para el periodo 1970-2000) en grados Celsius (°C) (a). Factor Tmax estandarizado por lógica fuzzy (b). 75
3.3	Distribución espacial de las temperaturas mínimas del mes más frío (Tmin) para la provincia de Catamarca (medias para el periodo 1970-2000) en grados Celsius (°C) (a). Factor Tmin estandarizado por lógica fuzzy (b). 76
3.4	Distribución de las precipitaciones medias anuales (Pp, mm) en el área de estudio para el periodo 1970-2000 (a). Mapa del factor Pp (b). 77
3.5	Distribución espacial de la aptitud para producir nogal pecán en Catamarca de acuerdo a las variables anegamiento (a), drenaje (b), profundidad (c) y rocosidad (d). 78
3.6	Distribución espacial de la aptitud para producir nogal pecán en Catamarca de acuerdo a las variables salinidad (a) y textura (b). 79
3.7	Puntaje de clasificación omega para las variables edáficas (las unidades con valor 100 presentan el máximo de aptitud y se observan en colores oscuros) (a). Mapa del factor suelos obtenido por estandarización fuzzy (b). 80
3.8	Modelo digital de elevación ASTERDEM, las alturas se presentan en metros sobre el nivel del mar (a). Mapa del factor altura obtenido por estandarización fuzzy (b). 81
3.9	Aptitud de los recursos hídricos en la provincia de Catamarca para la producción de nogal pecán (a). Mapa del factor recursos hídricos para riego estandarizada (b). 82
3.10	Restricciones territoriales para la producción de nogal pecán en Catamarca, estandarizadas por lógica booleana. Áreas protegidas (a), centros poblados (b), Ley de bosques (c), y restricciones globales (d). 83
3.11	Mapa de aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca obtenido por WLC. 85
3.12	Aptitud de las tierras de la provincia de Catamarca para la producción de nogal pecán clasificada en rangos de acuerdo a FAO (1976), dividida por cuencas. 85

3.13	Composición porcentual de las clases de aptitud para cada una de las cuencas hidrográficas de la provincia de Catamarca.	86
3.14	Distancia al puerto de Zárate (km).	89
3.15	Distancia a rutas (km).	89
3.16	Distancia a zonas candidatas (km).	90
3.17	Mapa del factor distancia a puerto de Zárate.	91
3.18	Mapa del factor distancia a rutas.	91
3.19	Mapa del factor distancia a zonas candidatas.	92
3.20	Localización óptima de plantas de procesamiento para nogal pecan obtenido por WLC.	92
3.21	Localización óptima de plantas de procesamiento para nogal pecan obtenido por WLC, reclasificada en cinco rangos de aptitud.	93
4.1	Horas frío anuales estimadas por método Damario et al. (1998) utilizando datos de estaciones meteorológicas para el periodo 2013-2018 (a) y utilizando datos provenientes de WorldClim para el periodo 1970-2000 (b).	97
4.2	Factor Tmax obtenido utilizando 18,3°C como punto de inflexión a en la estandarización fuzzy (a). Factor Tmax obtenido utilizando 15,6°C como punto de inflexión a en la estandarización fuzzy (b).	103
4.3	Polígonos de riego digitalizados y detalle de visualización de pantalla con diferentes resoluciones espaciales (Google Hybrid versus Landsat OLI 8).	116
4.4	Aptitud de las tierras de la provincia de Catamarca para la producción de nogal pecán clasificada en rangos de acuerdo a FAO (1976) (a). Mapa de aptitud obtenido considerando a los factores Pp y altura sobre el nivel del mar con un orden 5 en el ranking recíproco (b).	127
4.5	Localización óptima de plantas de procesamiento con diferente orden de factores en el ranking recíproco.	135
4.6	Localización óptima de las plantas de procesamiento luego de haber aplicado al mapa obtenido por WLC, las restricciones territoriales ley de bosques, áreas protegidas y centros poblados.	136

GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

°C: grados Celsius.

BIO5, BIO6, BIO12: variables del modelo WorldClim.

cm: centímetros.

EMC: Evaluación Multicriterio.

EPSG2346: European Petroleum Survey Group 2346, sistemas y marcos de referencia.

FOB: Free on board. Referido al precio de la nuez pecán puesta en buque que la llevará a su destino final de exportación.

Ha: hectáreas.

HF: factor horas frío anuales.

IDE: infraestructura de datos espaciales.

IGN: Instituto Geográfico Nacional.

Km²: kilómetros cuadrados.

m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar.

mm: milímetros.

OLI: Operation Land Imager.

PCE: puntaje de clasificación espacial.

Pp: factor precipitaciones medias anuales (obtenida de la variable BIO12 del modelo WorldClim).

RGB: referido a los filtros de color red/green/blue.

SIG: Sistemas de Información Geográfica.

T12: temperaturas mínimas medias anuales

T5: temperatura mínima media entre los meses mayo a septiembre.

Tmax: factor temperatura máxima media del mes más cálido (obtenida de la variable BIO6 del modelo WorldClim).

Tmin: factor temperatura mínima media del mes más frío (obtenida de la variable BIO5 del modelo WorldClim).

US\$: dólares americanos.

WGS84: World Geodetic System 1984.

WLC: Combinación Lineal Ponderada (siglas en inglés Weighted Linear Combination)

RESUMEN

El nogal pecán [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch], es una especie frutal caducifolia, de la familia Juglandáceas, originaria del sur de Estados Unidos y norte de Méjico. Debido a la gran disponibilidad de genotipos existentes, se adapta muy bien a variadas condiciones ambientales, incluyendo diferentes zonas de Argentina donde se lo cultiva, contando actualmente con más de 7500 hectáreas implantadas. Dentro de las áreas donde potencialmente podría expandirse su cultivo se encuentra la provincia de Catamarca. Para evaluar la potencialidad del territorio catamarqueño para el cultivo de nogal pecán, es necesario realizar una caracterización de la aptitud de sus tierras, con el objetivo de delimitar las zonas óptimas y diferenciarlas de aquellas áreas marginales. El análisis de la aptitud de las tierras basado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es una de las aplicaciones más ampliamente utilizadas para la planificación del territorio, a partir de la cual se evalúan las unidades de tierra mediante una comparación sistemática de los requisitos de uso con los recursos disponibles, presentando los resultados en forma de mapas de aptitud. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la aptitud de la provincia de Catamarca para la producción de nuez pecán a través de la metodología Evaluación Multicriterio (EMC) y modelado cartográfico utilizando sistemas de información geográfica (SIG), tomando en cuenta factores biológicos-productivos, legales, socio-económicos y ambientales. También se planteó como objetivo específico modelar un mapa de distribución óptima de plantas de procesamiento, en función de la distribución espacial de las zonas óptimas para producir nogal pecán en Catamarca y de factores socio-económicos. Se modelaron los mapas de los factores temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, horas frío anuales, suelos, precipitaciones anuales, altura sobre el nivel del mar, disponibilidad de recursos hídricos, distancia a rutas, distancia a zonas candidatas y distancia a puertos. Asimismo, se modelaron mapas de restricciones territoriales: áreas protegidas, Ley de Bosques y centros poblados. Todos estos mapas se combinaron mediante la aplicación de la combinación lineal ponderada (WLC), la cual es una técnica de EMC, donde los factores reciben ponderaciones de acuerdo a la importancia que tienen en el conjunto. Los resultados obtenidos indicaron que la provincia de Catamarca cuenta con un total de 3.453 km² de áreas aptas para la producción de nogal pecán, lo cual representa un 8 por ciento del territorio provincial. Estas, se distribuyen principalmente en el departamento de Santa Rosa, algunos sectores de la cuenca Salar de Pipanaco, en el Valle Central, parte de la

cuenca Falda Oriental de Ancasti, y en el Valle del río Santa María. Los factores climáticos, las características de los suelos, y la disponibilidad de recursos hídricos para riego resultaron ser los factores más importantes en la delimitación de las zonas candidatas para plantar nogal pecán. Por otro lado, se encontró que las áreas óptimas para el establecimiento de plantas procesadoras de nuez pecán se distribuyeron cercanas a las vías de comunicación dentro de los límites provinciales. Se concluye que en la provincia de Catamarca existen áreas aptas para la producción de nogal pecán, y que solo es posible su cultivo en las zonas donde existe disponibilidad de recursos hídricos para riego.

Palabras clave: nogal pecán, Catamarca, SIG, EMC.

ABSTRACT

The pecan walnut [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch], is a deciduous fruit species of the Juglandaceae family, native to the southern United States and northern Mexico. Due to the great availability of existing genotypes, it adapts very well to various environmental conditions, including different Argentina areas where currently there are more than 7,500 hectares planted. Among the areas where its cultivation could potentially expand is the province of Catamarca. In order to evaluate the potential of the Catamarca territory for the cultivation of pecan walnut, it is necessary to characterize the aptitude of its lands, with the objective of delimiting the optimal zones and differentiating them from those marginal areas. The analysis of land suitability based on Geographic Information Systems (GIS) is one of the most widely used applications for territorial planning, from which land units are evaluated through a systematic comparison of requirements of use with the available resources, presenting the results in the form of aptitude maps. The objective of this work was to characterize the aptitude of the province of Catamarca for the production of pecan nuts through the Multicriteria Evaluation (MCE) methodology and cartographic modeling using geographic information systems (GIS), taking into account biological-productive factors, legal factors, and socio-economic factors. It was also proposed as a specific objective to model a map of the optimal distribution of processing plants, based on the spatial distribution of the optimal areas to produce pecan walnut in Catamarca. The maps of the factors maximum temperature of the warmest month, minimum temperature of the coldest month, chilling hours, soils, annual rainfall, height above sea level, availability of water resources, distance to routes, distance to candidate areas were modeled and distance to ports. Likewise, maps of territorial

restrictions were modeled: protected areas, Ley de Bosques and populated centers. All these maps were combined by applying weighted linear combination (WLC), which is an MCE technique, where the factors receive weights according to the importance they have in the set. The results obtained indicated that the province of Catamarca has a total of 3,453 km² of suitable areas for the production of pecan walnut, which represents 8 percent of the provincial territory. These are distributed mainly in the department of Santa Rosa, some sectors of the Salar de Pipanaco basin, in the Central Valley, part of the Falda Oriental de Ancasti basin, and in the Santa María River Valley. The climatic factors, the characteristics of the soils, and the availability of water resources for irrigation turned out to be the most important factors in the delimitation of the candidate areas to plant pecan walnut. On the other hand, it was found that the optimal areas for the establishment of pecan nut processing plants were distributed close to communication routes within the provincial limits. It is concluded that in the province of Catamarca there are suitable areas for the production of pecan walnut, and that its cultivation is only possible in areas where there is availability of water resources for irrigation.

Key words: pecan walnut, Catamarca, SIG, MCE.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1. El nogal pecán

1.1.1. Descripción de la especie.

El nogal pecán [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] es una especie frutal caducifolia, diclino monoica, y con polinización anemófila que pertenece a la familia Juglandáceas. Tiene hojas compuestas, dispuestas en forma alternada, imparipinadas, con folíolos de forma oblongo-lanceolada, glabros y de borde aserrado. La inflorescencia masculina está compuesta por amentos péndulos los cuales están unidos por un pedúnculo, dispuestos sobre el tercio apical de ramas del último año. Las flores femeninas se disponen en una inflorescencia formando un racimo sobre las ramas nuevas, variando el número de flores producidas de acuerdo al largo de las ramas, el cultivar y el clima (Frusso, 2007). El fruto es una drupa seca de forma oblonga y elipsoide de 3 a 5 cm de largo, constituida por un epicarpio y un mesocarpio carnosos, un endocarpio liso y delgado (que constituye la cáscara) y un embrión, parte comestible normalmente conocida como almendra o kernel. El involucro se abre a la madurez formando cuatro valvas (Frusso, 2007).

El pecán es un árbol longevo que puede alcanzar una altura de más de 30 metros, produciendo frutos secos a partir del séptimo año aproximadamente; alcanza su más alto rendimiento entre los 15 y 20 años de edad en plantaciones comerciales, con rendimientos promedios de 25 kilos de nuez por planta y alrededor de 2500 kg ha⁻¹ (Sammis et al., 2004).

Es originario de Estados Unidos y el norte de Méjico (Nuñez Colima et al., 2019). Su área de distribución natural sigue los lechos del río Mississippi y sus tributarios, y los lechos de los ríos del centro y este del estado de Texas (Sparks, 2002). Esta área geográfica se encuentra entre las latitudes 30°N a 42° N (Zhang et al., 2015), donde las condiciones climáticas van desde los inviernos suaves a extremadamente duros, y desde regímenes húmedos a semiáridos (Sparks, 2005). Por esta razón, la especie comprende una amplia diversidad de genotipos (Gardea et al., 2011) adaptables a las diferentes condiciones que allí se presentan. Estos genotipos principalmente presentan diferencias en sus tasas de crecimiento, duración del periodo de dormición, cantidad de días para el desarrollo y llenado de las nueces, tamaño de nuez, porcentaje de almendra (porcentaje de kernel) y resistencia al daño por frío (Sparks, 2005).

Dada la amplia disponibilidad de genotipos originados en la zona nativa de esta especie, el pecán se adapta muy bien a variadas condiciones ambientales (Zhang et al., 2015), incluyendo diferentes zonas de Argentina donde existen condiciones propicias para su desarrollo (Gómez & Cruzate, 2007).

Si bien en el área de dispersión nativa se presentan suelos franco limosos, inundaciones temporarias frecuentes y una capa freática alta, el pecán es sensible al drenaje pobre (Sparks, 2002; Sparks, 2005). A modo de ejemplo, si se producen condiciones de anegamiento permanente durante el periodo de brotación se suprime el crecimiento de brotes y raíces (Sparks, 2005). Asimismo, esta especie no se desarrolla adecuadamente en suelos poco profundos y con poca capacidad de retención de agua, como los suelos de textura arenosa con drenaje excesivo (Sparks, 2002).

Los requerimientos de precipitaciones del pecán están en el orden de los 1000 a 1300 milímetros anuales (Andales et al., 2006; Sparks, 2002). En las zonas semiáridas donde algunos genotipos de esta especie han evolucionado, con precipitaciones anuales que rondan los 660 mm (Sparks, 2005), la estrategia de adaptación para los periodos secos consistió en dos tipos de mecanismos: por un lado, desarrollar un sistema radicular con un hábito freatofítico que le permite tomar agua suplementaria de la capa freática, y por el otro lado satisfacer los requerimientos hídricos con agua de escorrentía y/o inundación (Sparks, 2005).

Si bien todas las etapas fenológicas del cultivo tienen igual importancia respecto al suministro de agua, el déficit hídrico que se produce durante la floración, el cuaje del fruto, la expansión del fruto y su llenado, reviste de mayor importancia (Madero et al, 2016). Cuando los requerimientos de precipitaciones no se cumplen en estas etapas, puede verse afectado el rendimiento, por un menor tamaño de frutos, o por la falta de llenado de los mismos (Sparks, 1997).

Los genotipos que han evolucionado en el norte de Estados Unidos (40° N) poseen mayor tolerancia al frío y un período de desarrollo de frutos en torno a los 140 días. En cambio, los genotipos originarios de la zona sur de Estados Unidos (30°N) presentan características opuestas a los primeros: menor tolerancia al frío y un período de desarrollo de frutos cercano a los 200 días (Sparks, 2005).

Otro aspecto sumamente importante para esta especie es el requerimiento de frío, el cual varía entre 300 y 600 horas de frío anuales dependiendo del cultivar (Sparks, 2005), calculadas a partir de una temperatura base de 7,2°C (Kuden et al., 2013; Sparks, 1993). Existen reportes de otros autores que informan que el cultivar Stuart puede presentar un requerimiento de 600 a 1000 HF (Clark, 2015; Smith et al., 1992), y que otros cultivares, como Kiowa, requieren apenas entre 200 a 350 (Clark, 2015). Así, gracias a la variabilidad de cultivares disponibles, puede ampliarse el rango de horas de frío entre un mínimo de 200 y un máximo de 1000, encontrándose la mayor cantidad de cultivares dentro del requerimiento de 300 a 600 horas de frío.

Cuando estos requerimientos en horas de frío no se cumplen la brotación se retrasa y se produce en forma irregular. Este retraso en la brotación a su vez implica un retraso en la floración, lo cual puede afectar la producción de fruta (Kuden et al, 2013). Además, durante la brotación primaveral la acumulación térmica necesaria para el inicio del ciclo anual de crecimiento se modifica de acuerdo al grado de satisfacción de los requerimientos de frío invernal, cumpliendo de este modo un rol de regulación de la brotación: la suma de horas de calor requerido para la brotación disminuye a medida que aumenta la acumulación de horas frío (Sparks, 2005).

1.1.2. Producción y comercio mundial de pecán

La producción mundial de frutos secos en los últimos años ha mantenido un ritmo constante de crecimiento, alcanzando alrededor de 4,6 millones de toneladas para la temporada 2019/2020 (International nut and dried fruit council foundation, 2020). Según datos del Consejo Internacional de Frutos secos, durante la campaña 2021/2022 la producción mundial de pecán representó el 2,54% anual del total de producción de frutos secos (International nut and dried fruit council foundation, 2023), sosteniendo la tendencia de los últimos años (International nut and dried fruit council foundation, 2020).

México y Estados Unidos son los mayores productores a nivel mundial (Torassa, 2023) representando alrededor del 90% de la cosecha mundial de nuez pecán, estimada en 139.739 toneladas de nuez sin cáscara para el periodo 2019/2020 (International nut and dried fruit council foundation, 2020); en el caso de la temporada 2021/2022 se estiman unas 372.795 toneladas de nuez con cáscara y 186.466 toneladas de nuez pelada (International nut and dried fruit council foundation, 2022).

Según el reporte anual del Consejo Internacional de Frutos secos de 2020, en el año 2018 se comercializó un récord de 76.183 toneladas de nueces de pecán sin cáscara, manteniéndose México y Estados Unidos como los mayores proveedores a nivel mundial. Más del 99% de las exportaciones mexicanas tuvieron como destino los Estados Unidos; a su vez, los principales mercados para Estados Unidos fueron la Unión Europea y el Reino Unido, y Canadá (International nut and dried fruit council foundation, 2020).

Si bien la nuez pecán se exporta en su mayoría sin cáscara, entre los años 2005 y 2012 el volumen de nuez con cáscara exportado se multiplicó veinte veces gracias a la intervención de China, que compró en el año 2009 la cuarta parte de la producción de Estados Unidos (PROARGEX-PROSAP-UCAR, 2013). Para el año 2018, las exportaciones de nuez con cáscara alcanzaron las 159.534 toneladas, siendo México, Estados Unidos y China los principales países de destino (International nut and dried fruit council foundation, 2020).

Estados Unidos es el mayor consumidor mundial de nuez pecán, con una demanda anual per cápita de 241 gramos, seguido por México con 208 gramos (International nut and dried fruit council foundation, 2020), mientras que el promedio mundial es de apenas 19 gramos per cápita (Secretaría de Agroindustria, 2019).

A través de los años el precio internacional de la nuez con cáscara ha fluctuado de acuerdo a los ciclos de producción: precios bajos en años de cosechas abundantes y viceversa. Esos precios se han estabilizado por la entrada en el mercado de producciones marginales de países que producen y comercializan en contraestación de los principales mercados, y por mejoras en el manejo de las plantaciones en base a la aplicación tecnológica (PROSAP-UCAR, 2015).

Estados Unidos es el principal formador de precios, por ser el mayor productor y consumidor. A modo de referencia, el precio promedio de exportación de este país en el año 2012 se ubicó en US\$ 5,4 por kilo con cáscara y US\$ 12,7 por kilo sin cáscara (International Nut & Dried Fruit Council, 2015), mientras que para el año 2022 se registraron precios de US\$ 5,31 por kilo de nuez con cáscara y US\$ 13,02 por kilo de nuez pelada (USDA, 2023). Se estima que el volumen producido de nuez pecán a nivel mundial alcanzó unos 1,63 billones de dólares a nivel mundial para la temporada

2019/2020, mientras que para la temporada anterior (2018/2019) fue de 1,98 billones de dólares (International nut and dried fruit council foundation, 2020).

1.1.3. Producción de nuez pecán en Argentina

Se estima que el pecán llegó a la Argentina en el siglo XIX a través de semillas traídas por Domingo Faustino Sarmiento y actualmente se pueden encontrar ejemplares de más de 60 años distribuidos en varias regiones. En el país actualmente se encuentran inscriptos 36 cultivares de Pecán introducidos por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) a partir del año 1999 desde el Centro Nacional de Mejoramiento Genético de Pecán del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Madero et al., 2016).

En la actualidad existen aproximadamente 7500 hectáreas implantadas con nogal pecán, que en su mayoría son plantaciones jóvenes que aún no han entrado en su etapa de plena producción. La distribución de estas plantaciones se concentra en las provincias de Entre Ríos, Buenos Aires y Santa Fe, condensando principalmente Entre Ríos, la mayor cantidad de emprendimientos, representando el grueso de la producción nacional (Ministerio de Agricultura, 2020). También, en menor medida existen plantaciones en las provincias de Córdoba, Corrientes, Misiones, Chaco, Tucumán, Mendoza, San Juan, Catamarca, La Rioja y Salta (PROSAP-UCAR, 2015).

La principal ventaja para el desarrollo del pecán en Argentina es que la producción se puede realizar a contra estación de Estados Unidos, principal productor y consumidor a nivel mundial. Allí la cosecha comienza en octubre y termina a finales de marzo, y generalmente se almacena la nuez para ser consumida en momentos de baja producción (PROARGEX-PROSAP-UCAR, 2013). Dado que las nueces tienen un contenido elevado de lípidos que alcanza hasta 75%, son muy susceptibles a la oxidación y con frecuencia se tornan rancias durante el almacenamiento, desarrollando sabores y olores desagradables (Oro et al., 2008). Esto provoca que se deban almacenar entre 0 y 10°C y entre 50 y 75% de humedad ambiente (Ibrahim, 2005; Kader, 2013), lo cual genera costos adicionales de almacenamiento (Ibrahim, 2005). Por lo cual se considera que se podría vender la producción argentina en momentos de baja producción estadounidense, permitiendo obtener buenos precios (PROARGEX-PROSAP-UCAR, 2013) ya que con esto se reducirían los costos de almacenamiento en el país destino.

Se estima que el 30% de la producción de nuez pecán en Argentina se destina al mercado externo. Las exportaciones en el periodo 2010-2017 registraron un marcado crecimiento: de 13,5 toneladas exportadas en 2010, se alcanzaron las 247 toneladas en 2017, con un incremento en el precio promedio de U\$S 3.030,0 por tonelada en 2010 a U\$S 5.710,8 en 2017 (Secretaría de Agroindustria, 2019).

Siguiendo con la tendencia creciente, para el año 2018 las exportaciones rondaron las 350 toneladas por un valor FOB estimado de U\$S 1.100,0 por tonelada, con destino a Estados Unidos, Hong Kong, Brasil y Holanda (Secretaría de Agroindustria, 2019).

1.1.3.1. La cadena productiva de la Nuez Pecán en Argentina

La cadena productiva de la nuez Pecán en Argentina consta de varios eslabones los cuales se encuentran en diferentes estados de desarrollo.

1.1.3.1.1. Insumos

Los principales componentes de este primer eslabón lo constituyen los viveristas que proveen el material para las plantaciones. Existen viveros que están produciendo plantas de pecán injertadas, utilizando como pié variedades adaptadas a las condiciones edafoclimáticas de las diferentes zonas de producción. La mayoría de estos viveros no producen exclusivamente plantas de pecán, y dos de ellos tienen un convenio con INTA que les permite producir plantas de las variedades introducidas por esta institución en los últimos años. En total se producen alrededor de 100.000 plantas por año, una cantidad suficiente para implantar hasta 1000 hectáreas anuales utilizando un marco de plantación de 10 x 10 metros (PROSAP-UCAR, 2015).

1.1.3.1.2. Producción primaria

Este eslabón lo constituyen los productores, y se los puede dividir en función de su escala, la tecnología que utilizan en el cultivo, en la cosecha, y en la poscosecha.

La mayoría de los productores no tienen al pecán como una actividad principal (PROSAP-UCAR, 2015), aunque existen algunos emprendimientos que presentan plantaciones de mayor escala y con un alto potencial productivo en el mediano plazo.

Desde la puesta en marcha en el año 1999 del Proyecto ProPecán de INTA, a partir del trabajo realizado en la Estación Experimental Delta del Paraná, se dio inicio al programa de Cambio Rural Pecán. Este programa consistió en la agrupación de productores de zonas en común con el objetivo de recibir asesoramiento técnico (PROSAP-UCAR, 2015). También en el año 2004 se formó el Consorcio Argentino de Productores de Pecán (actualmente Cámara Argentina de Productores de Pecán, por sus siglas CAPP) con el objetivo de aunar esfuerzos para la resolución de problemáticas comunes en conjunto con INTA; a su vez los integrantes del CAPP organizan capacitaciones, negocian precios de la producción e insumos en los mercados, y organizan la comercialización promoviendo las exportaciones grupales a diferentes destinos comerciales (Cámara Argentina de Productores de pecan, 2023).

También, alrededor del año 2011, surgió el Clúster de la Nuez Pecán como respuesta a la necesidad de promoción y desarrollo del producto. Esta organización abarca toda la provincia de Entre Ríos y nuclea productores, viveristas, prestadores de servicios, técnicos, procesadores, elaboradores y comercializadores de pecán. La principal actividad de los productores del Clúster es la producción primaria de nuez pecán, concentrando alrededor de 197 empresas con una producción de 182,5 toneladas en el año 2014, sobre una superficie total plantada estimada en 1.961 hectáreas (PROSAP-UCAR, 2015).

Actualmente ambas instituciones, el Clúster de la nuez pecan y el CAPP, se nuclean en el Comité Argentino del Pecán representando a los actores de la cadena del pecán en Argentina.

1.1.3.1.3. Procesamiento

Este eslabón comprende el acondicionamiento y secado de la nuez. En la actualidad existen varios establecimientos procesadores y acondicionadores de nuez pecán, distribuidos principalmente en la provincia de Entre Ríos, con la dificultad que representa la escasa escala de producción y la baja sistematización de los procesos. Algunos productores también realizan un procesamiento artesanal y comercializan directamente con pequeños comercios de la región (PROSAP-UCAR, 2015).

1.1.3.1.4. Canales de comercialización

Existen canales minoristas y mayoristas, y a su vez se distinguen como productos la nuez con cáscara y la nuez pelada, los cuales acceden a diferentes mercados dependiendo de la tecnología de procesamiento o empaque que se emplee.

El mercado interno abarca el grueso de la producción, y se da a través de canales informales con un alto grado de dispersión. La demanda de nuez pecán aumenta a fines de octubre y desciende luego de diciembre, pasadas las fiestas.

Con respecto a las exportaciones argentinas de nuez pecán, en los años 2012, 2013 y 2014 los exportadores Delta Berries y el Consorcio Argentino de Productores de Pecán (CAPP) exportaron alrededor de 30, 40 y 100 toneladas de nuez pecán con cáscara, respectivamente, a Estados Unidos, China, Vietnam y Argelia (PROSAP-UCAR, 2015).

En el año 2018, se accedió el mercado de Brasil y la empresa Delta Comex, socio del Clúster del Pecán, concretó la primera exportación de 17,5 toneladas a San Pablo (Secretaría de Agroindustria, 2019).

También en 2018 el CAPP exportó 5 toneladas de nuez pelada a Rotterdam, siendo la primera exportación de este tipo de producto (Secretaría de Agroindustria, 2019).

Respecto de las importaciones argentinas de nuez pecán, puede decirse que son insignificantes (PROARGEX-PROSAP-UCAR, 2013).

1.1.4. Investigaciones llevadas a cabo en Argentina

Dentro de las líneas de investigación desarrolladas en el marco del Proyecto Propecan de INTA (Estación Experimental Delta del Paraná) en el año 2007 se realizaron una serie de estudios para la determinación de la aptitud agroclimática para la producción de nuez pecán en Argentina.

Gómez & Cruzate (2007) llevaron a cabo un estudio cuyo objetivo fue determinar la aptitud de los suelos argentinos para la producción de pecán, para lo cual se utilizaron los mapas de suelos de Argentina en escalas 1:500.000 y 1:1.000.000, y las tasas climáticas de los suelos, que detallan los regímenes de humedad y de temperatura (SAGyP-INTA, 1990). La aptitud del suelo fue definida como la adaptabilidad de una unidad cartográfica

para un uso definido y los requerimientos de suelo del cultivo de pecán fueron tomados de Herrera (1999).

Como resultado de dicho estudio se establecieron cuatro clases de aptitud: óptima, apta, marginal y no apta. Las clases óptimas se distribuyeron en las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Sur de Santa Fe, Este de Córdoba y el área de las Yungas; las clases aptas rodearon esta zona óptima y se distribuyeron en el centro y varias zonas en el noreste del país; las marginales se ubicaron principalmente en la región de suelos áridicos y en la Pampa deprimida de la provincia de Buenos Aires; finalmente la clase no apta comprendió las regiones Patagónica y la Alta Cordillera (figura 1.1). Vale aclarar que en este estudio, no se ha tenido en cuenta la disponibilidad de recursos hídricos aptos para riego.

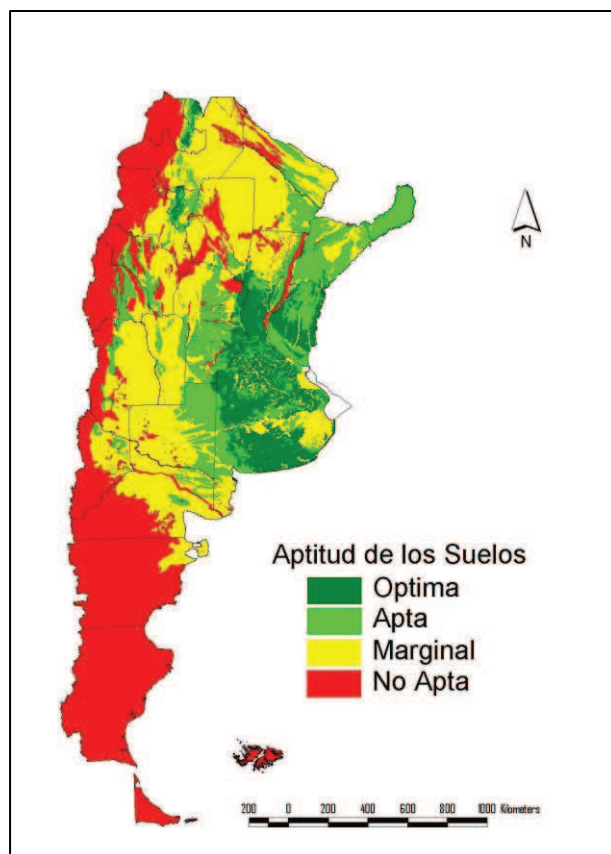


Figura 1.1: Zonificación para la producción de pecán en Argentina. Fuente: extraído de Gómez y Cruzate (2007).

Otro de los estudios realizados en el marco de las líneas de investigación del proyecto INTA ProPecan fue el de Sierra et al. (2007), el que consistió en la realización de una primera zonificación agroclimática para el cultivo de pecán en la Argentina considerando

los parámetros biometeorológicos (periodo libre de heladas, temperatura media del verano, sumatoria de temperaturas base 10°, sumatoria de horas frío efectivas, precipitaciones) definidos por Sparks (1996, 1997) y Wolstenholme (1979).

La caracterización de las condiciones hídricas se llevó a cabo teniendo en cuenta las precipitaciones medias durante la estación de crecimiento de las nueces, que comprende los meses de octubre a abril, a partir de las cuáles se definieron las zonas hídricas (Sierra et al., 2007). La caracterización de las condiciones térmicas se llevó a cabo teniendo en cuenta cuatro índices desarrollados según la metodología empleada: duración de la estación de crecimiento (período libre de heladas), temperatura media del verano (de diciembre a febrero), sumatoria de temperatura sobre la base de 10°C durante la estación de crecimiento, sumatoria de horas de frío efectivas durante el período mayo a septiembre. La zonificación agroclimática del territorio argentino según su aptitud para el cultivo del pecán se llevó a cabo combinando los índices hídricos y térmicos (Sierra et al., 2007).

El estudio llevado a cabo permitió comprobar que, sobre el centro y norte de Santa Fe, el extremo sur de Corrientes y la provincia de Entre Ríos, se extiende una zona termohídrica óptima (figura 1.2) (Sierra et al., 2007). Asimismo, hacia el oeste de la zona óptima se ubica un área que ocupa el sur y parte del centro de Santiago del Estero, el norte de Córdoba y el extremo noroeste de Santa Fe, que resulta óptima desde el punto de vista térmico, pero que requiere riego complementario (Sierra et al., 2007). Hacia el norte de las zonas óptimas, se extiende una amplia franja con condiciones aptas, que ocupa el este del Noroeste Argentino, la Región del Chaco, el extremo norte de la Región Pampeana y el norte de la Mesopotamia. Si bien las diferencias en la aptitud hídrica podrían ser suplidas mediante el uso de riego, estas zonas presentan el inconveniente de observar una estación invernal excesivamente cálida. No obstante, empleando variedades adecuadas a este ambiente, sería posible superar esta limitante (Sierra et al., 2007) (figura 1.2).

Hacia el sur de las zonas óptimas se extiende una franja con condiciones de tipo aptas. Desde el punto de vista hídrico, el empleo de riego podría eliminar los riesgos de irregularidades en el régimen de precipitaciones, pero las disponibilidades térmicas comienzan a hacerse limitantes por defecto (figura 1.2).

Finalmente, hacia el oeste y sur de las zonas aptas, se extiende una serie de zonas con condiciones de tipo marginal donde la disponibilidad térmica se hace definitivamente

limitante por defecto, tanto por el incremento de la altura sobre el nivel del mar, que se da hacia el oeste, como por la disminución de la radiación solar, que se da hacia el sur (figura 1.2).

Los resultados de los estudios desarrollados por Gómez & Cruzate (2007) y Sierra et al. (2007) han permitido la delimitación de regiones con diferentes grados de aptitud para la producción de nuez pecán en función de los requerimientos biológicos-productivos de la especie, y esta información sirve de base para la pre-selección de zonas en las cuales se puede producir pecán a nivel nacional.

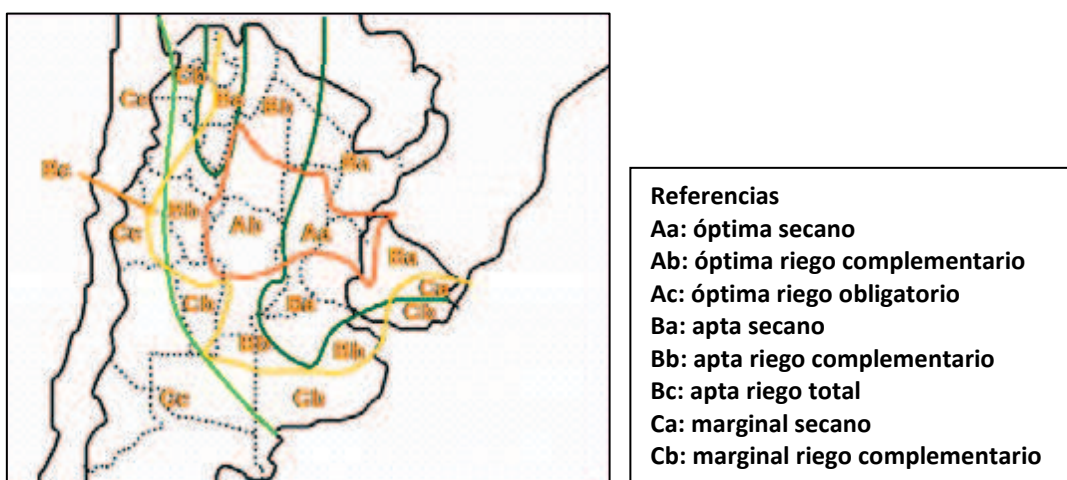


Figura 1.2: Zonificación agroclimática para producción de nuez pecán en Argentina. Fuente: extraído de Sierra et al. (2007).

Los resultados hallados por Sierra et al. (2007) coinciden con los informados por Conti et al. (2016), quienes determinaron que las zonas agroclimáticas más favorables para el establecimiento del cultivo de pecán dentro de la región Pampeana se distribuyen hacia el norte-noreste de la provincia de Buenos Aires y sur de Entre Ríos, donde actualmente existen numerosas plantaciones de pecán.

Sin embargo, se considera necesario que para la planificación de proyectos específicos y la toma de decisiones acerca de si determinada zona es apta o no, se aborde la temática desde una escala de análisis más detallada, ya que las unidades delimitadas en los estudios previos no son homogéneas, sino que dentro de ellas se generan diferenciaciones espaciales en la distribución de las características estudiadas (Buzai & Baxendale, 2013), y que además se generan interacciones entre estas y otras variables que no fueron tomadas en cuenta a esa escala de trabajo.

Además, se considera que la aptitud de un área debería ser definida no solo a través de variables biológico-productivas sino también a través de variables socio-económicas, legales y ambientales (Ministerio de minas y energía de Colombia, 2012), aspectos que sólo pueden ser analizados en escalas detalladas.

Una escala de trabajo adecuada para llevar a cabo este tipo de estudios podría ser la escala regional, tal como se presenta en Conti et al. (2016), o la de nivel provincial, ya que cada provincia tiene la posibilidad de implementar su propio plan de ordenamiento del territorio y su marco legal de aprovechamiento de los recursos naturales, según lo establecido en el artículo 124 de la Constitución Argentina. Un ejemplo de esto lo constituye la regulación de las obras de riego por parte de la Secretaría del agua y del ambiente de la provincia de Catamarca según la ley de Aguas N° 2577/73 que regula la concesión y utilización del agua pública, y la ley de bosques provincial N° 5311. El proceso de organización del territorio es el resultado de múltiples interacciones entre la sociedad y el medio (Buzai & Baxendale, 2013), por lo que para determinar el potencial de expansión del pecán dentro de una provincia deberán tenerse en cuenta también el contexto socio-económico local, las restricciones legales, y la disponibilidad de infraestructura zonal.

Además, se considera de interés realizar un estudio de la cadena productiva en su totalidad, desde la determinación de los sitios aptos para producir hasta el modelado de la distribución óptima de plantas de acondicionamiento de nuez pecán, y cuáles serían los mercados a los que se podría acceder en función de la distribución óptima de las plantaciones, de la distancia a los puertos, y de los accesos a la infraestructura vial.

1.2. Área de estudio

1.2.1. Elección del área de estudio

La elección de la provincia de Catamarca como área de estudio para este proyecto, surgió como respuesta a la necesidad de evaluar la posibilidad de expandir la producción de pecán en Argentina hacia la región NOA, en el marco de las actividades planteadas en el proyecto ProPecan de la EEA INTA Delta del Paraná. Este proyecto fue creado en el año 1999 y financiado principalmente con aportes de Fondo Tecnológico Argentino del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación, y tuvo como objetivos la generación de cultivares que se adapten a las condiciones locales, la

adaptación tecnológica en el manejo de los montes y la difusión y transferencia tecnológica (PROSAP-UCAR, 2015).

A partir del año 2012, el proyecto ProPecan estableció una red de ensayos de cultivares en varias provincias del país, dentro de la cual se incluye una parcela experimental de 8 variedades en la EEA INTA Catamarca, ubicada en la localidad de Sumalao, en el Valle Central (Delgado & Carabajal, 2018). Los resultados arrojados por este ensayo brindan la evidencia de que es posible producir pecán en dicha área, utilizando riego complementario, obteniendo nueces de buena calidad.

Entre las provincias del NOA, la que resultó de mayor interés, ya sea por el éxito del ensayo implantado en la EEA INTA Catamarca, como por la tradición nogalera y la infraestructura pre existente, resultó ser la provincia de Catamarca. Por lo tanto, se consideró necesario evaluar la totalidad del territorio provincial para caracterizar las áreas con distinta aptitud en función de los requerimientos de la especie, y evaluar la factibilidad de expansión del cultivo hacia otras zonas de la provincia.

1.2.2. Área de estudio: la provincia de Catamarca

La provincia de Catamarca está ubicada en la región noroeste de la República Argentina entre los 25°12' y 30°04' de Latitud Sur y entre los 69°03' y 64°58' de Longitud Oeste (figura 1.3). Su extensión es de 102.602 km² y solo el 22% de esta superficie está constituida por valles y llanuras, siendo el resto montañoso y con limitantes para la actividad agropecuaria (Nuñez-Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

La mayor parte de la provincia es de clima árido y semiárido. Está surcada por cordones montañosos, que se ubican en sentido norte-sur y constituyen una barrera para el paso de los vientos húmedos provenientes del Este. Ello provoca la disminución de las precipitaciones en sentido Este-Oeste. Los vientos húmedos del Pacífico son interceptados por la Cordillera de Los Andes. Debido a ello no existen cursos de agua caudalosos.

Presenta un clima templado continental con una precipitación media que varía entre los 400 y 751 mm anuales en el Este (Fick & Hijmans, 2017), disminuyendo hacia el Oeste a menos de 150 mm en la Puna cordillerana, donde el déficit hídrico es compensado por las precipitaciones nivas (Cabrera, 1971; Nuñez -Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

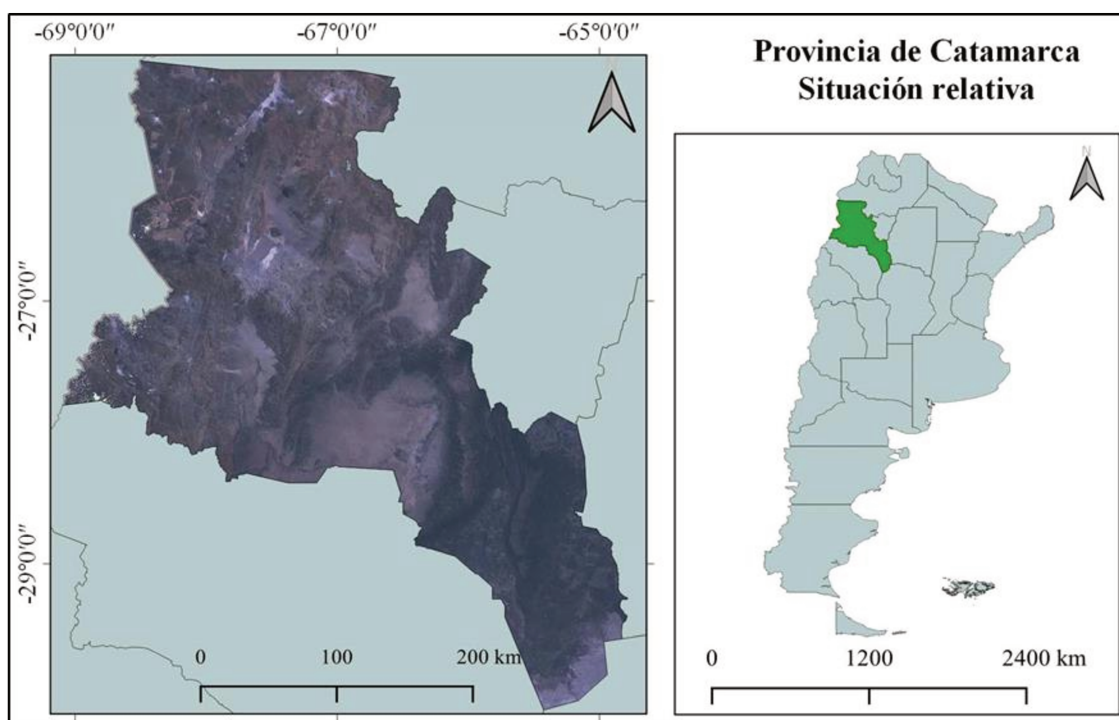


Figura 1.3: situación relativa de la provincia de Catamarca dentro de Argentina
Fuente: elaboración personal. Imagen de fondo Landsat 5 composición color natural (RGB: 321) obtenida de *Google Engine*. Mosaico libre de nubes periodo enero a diciembre de 2010. Sistema de referencia: EPGS: 4326, WSG84

1.2.2.1. Regiones según precipitaciones, relieve y actividades económicas principales

En el territorio de la provincia de Catamarca pueden diferenciarse cuatro regiones: la Puna, la Cordillera Central en el Sudoeste, el Sistema de Famatina y las Sierras Pampeanas. A su vez, todo este territorio abarca cinco ecorregiones: las Yungas, el Chaco Seco, el Monte de Sierras y Bolsones, la Puna y los Altos Andes (Maldonado, 2011). El número de ecorregiones se amplía si se considera el mapa disponible en la infraestructura de datos espaciales de Catamarca (IDECAT, 2021) (figura 1.4).

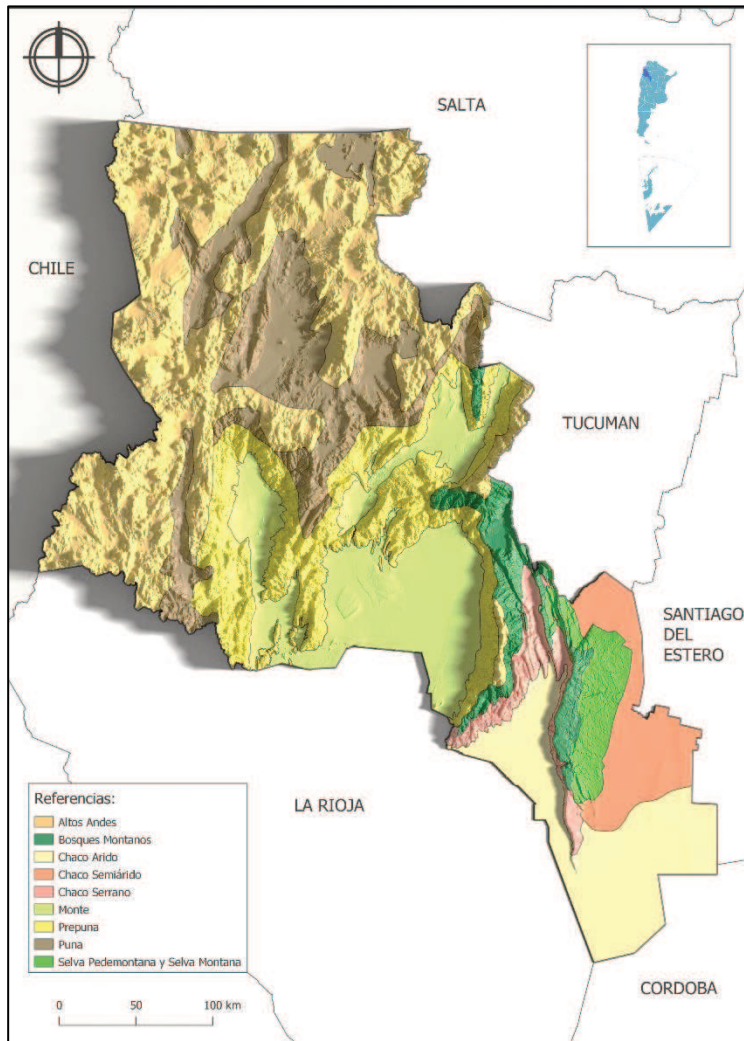


Figura 1.4: ecorregiones de la provincia de Catamarca de acuerdo a IDECAT. Fuente: extraído de la infraestructura de datos espaciales de Catamarca (IDECAT, 2021).

Si bien el territorio provincial presenta en general una calidad ambiental muy buena, el Plan Estratégico Territorial de 2011 (Maldonado, 2011) señala que existen algunas presiones antrópicas que comprometen los procesos naturales en algunos ecosistemas; por ejemplo, algunas actividades productivas que degradan los recursos naturales en los valles y el uso poco sustentable de los recursos hídricos, que son escasos. Existen en la provincia importantes obras de infraestructura hídrica (diques) que cumplen con la función de almacenaje de agua, para compensar el marcado déficit hídrico (Maldonado, 2011), por ejemplo, el dique de embalse Las Pirquitas que regula los caudales del río del Valle en el departamento de Capayán, y el dique Sumampa ubicado en el departamento de Santa Rosa, que riega la colonia Los Altos (Nuñez-Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

1.2.2.1.1. Región Centro

Esta región ocupa el valle central y las serranías adyacentes. Presenta un clima semiárido y precipitaciones que van desde los 430 mm en el sur a los 630 mm en el extremo norte (Fick & Hijmans, 2017), presentándose numerosos microclimas por efecto de la orientación de los valles y serranías especialmente en la ladera oriental de la Sierra de Ambato (Nuñez-Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004). El río más importante en cuanto a caudal se encuentra en esta región: el Río el Valle, el cual se aprovecha para irrigación (Maldonado, 2011; Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

En cuanto a la estructura productiva se destacan la agroindustria olivícola, el comercio y los servicios, la industria textil y alimenticia, el turismo, la fruticultura (nogal y cítricos), y la ganadería tradicional (en las zonas serranas adyacentes) (Maldonado, 2011).

1.2.2.1.2. Región Oeste

Esta región presenta un relieve montañoso de sierras pampeanas y escasos recursos hídricos, donde las lluvias son inferiores a los 150 - 200 mm anuales en los departamentos del Oeste (Nuñez -Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004) y aumentan a alrededor de los 400 mm anuales hacia el Este del departamento de Pomán (Fick & Hijmans, 2017). Se incluyen en esta área las zonas que integran las ecorregiones Monte y Prepuna de los departamentos Santa María, Belén, Andalgalá, Pomán y Tinogasta (Maldonado, 2011).

En la estructura productiva del área se destacan la minería de cobre y oro (Maldonado, 2011; Nuñez -Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004), y la agroindustria olivícola. También, la fruticultura (nogal y otros frutales), el cultivo de especias (pimentón y hierbas aromáticas), la agroindustria vitivinícola, la producción de papa semilla (en las zonas más altas), el turismo con atractivos naturales y culturales, las actividades textiles artesanales, y la manufactura de dulces y confituras (Maldonado, 2011).

1.2.2.1.3. Región Puna

De acuerdo al Plan Estratégico Provincial 2011 (Maldonado, 2011), esta región comprende un área desértica de altura que incluye las ecorregiones del Alto Andino y la Puna. Abarca la totalidad del departamento de Antofagasta de la Sierra y las comunidades de altura de los departamentos Santa María, Belén y Tinogasta (Maldonado, 2011).

Como actividades económicas principales se pueden mencionar a la minería (extracción de litio), el turismo, la cría de camélidos y ovinos (para producción de lanas y fibras) y la manufactura de textiles artesanales (Maldonado, 2011).

Es importante destacar que en esta región se encuentra también La Reserva de la biosfera de Laguna Blanca, en el norte del departamento Belén, la cual protege la fauna autóctona y rescata prácticas productivas ancestrales.

1.2.2.1.4. Región Este

Esta región se encuentra emplazada entre el cordón del Ancasti y la llanura que limita con las provincias de Santiago del Estero y Tucumán. Incluye los departamentos El Alto y Santa Rosa al norte y Ancasti y La Paz al sur (Maldonado, 2011). Corresponde a las llanuras del Chaco semiárido con lluvias inferiores a los 400 mm en el sur y entre los 400 a 500 mm en el centro y norte (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

En cuanto a las actividades económicas se destacan las producciones agroexportadoras de granos y ganadería, la industria de los alimentos, la cría tradicional de ganado (bovino y caprino), el tabaco, las hortalizas y la fruticultura (cítricos), la explotación forestal para leña y carbón, y el turismo (Maldonado, 2011).

1.2.2.2. Caracterización productiva.

1.2.2.2.1. Minería

La minería es una actividad importante para la economía de la provincia; la mina Bajo la Alumbraera produjo oro, plata y molibdeno hasta su cierre en el segundo semestre de 2018 (Ministerio de Hacienda Presidencia de la Nación, 2019). Los yacimientos de las minas Farallón Negro y Alto de la Blenda generan oro y plata y son los centros más importantes de toda la provincia. En Fiambalá existe un área extensa con importantes yacimientos de estaño; en salar del Hombre Muerto existe un importante yacimiento de litio que es un mineral metalífero empleado en la industria (Provincia de Catamarca, 2014). En volumen de explotación, el rubro minero más importante es el de las rocas de aplicación: cantos rodados, arena, arcillas, lajas, caliza, y mármol ónix (Provincia de Catamarca, 2014).

1.2.2.2.2. Agricultura y ganadería

Según datos del censo nacional agropecuario 2002 la provincia de Catamarca cuenta con 1,6 millones de hectáreas de uso agrícola, forestal o ganadero, de las cuales sólo un 10% son cultivadas o implantadas; el 90% restante corresponde en su mayor parte a pastizales y/o montes naturales con severas restricciones de agua. En ganadería se destacan el ganado bovino, el ovino y el caprino (Provincia de Catamarca, 2014).

La ganadería caprina está orientada a la producción del cabrito mamón para la producción de carne y constituye una actividad fundamentalmente de subsistencia, con explotaciones pequeñas y familiares, sistemas extensivos de encierre nocturno y con problemas de la tenencia de la tierra. En menor medida, se producen quesos, que suelen ser para autoconsumo (Ministerio de Hacienda Presidencia de la Nación, 2019).

La ganadería de camélidos se desarrolla en las zonas de puna, prepuna y altoandina. Esta actividad está fundamentalmente asociada a la producción de artesanías textiles y al turismo rural. Las especies que predominan son la llama y la vicuña silvestre (Ministerio de Hacienda Presidencia de la Nación, 2019).

Las forrajeras anuales y perennes son los cultivos implantados de mayor importancia, y representan casi el 50% del área cultivada distribuyéndose mayormente en la región Este, que es la más favorecida por las precipitaciones (Provincia de Catamarca, 2014). El área sembrada con cereales, en 2018 alcanzó las 53 mil hectáreas, donde el trigo ocupó la mayor superficie con 39 mil hectáreas, seguida por el maíz (13 mil hectáreas) y el resto sorgo. En tanto, las oleaginosas registraron 40 mil hectáreas (de soja, en su totalidad) (Ministerio de Hacienda Presidencia de la Nación, 2019).

Los cultivos perennes o permanentes comprenden mayoritariamente a todos los frutales y suman 28.902 hectáreas y se distribuyen en un 54% en la región Oeste y un 43% en el Valle Central; la región Este sólo cuenta con el 3% restante (INDEC, 2002).

De los cultivos perennes el más importante es el olivo; actualmente se estiman más de 18.700 hectáreas olivícolas, siendo las áreas más importantes Pomán y Capayán, representando aproximadamente el 70% de la superficie provincial (Ministerio de Hacienda Presidencia de la Nación, 2019). Le siguen en importancia los frutos secos, con amplio predominio de nogales europeo, que con 4.574 hectáreas alcanzan el 16,6% del

área de frutales, siendo los principales productores los departamentos de Belén, Pomán, Ambato, Capayán y Andalgalá (INDEC, 2002); esto posiciona a Catamarca como el segundo productor de frutos secos a nivel nacional (Ministerio de Hacienda Presidencia de la Nación, 2019).

El tercer cultivo en importancia lo constituye la vid, que cuenta con 3.451 hectáreas, y representa el 12,5% del área total de frutales (Provincia de Catamarca, 2014). Catamarca representa el 0,6% de la elaboración de vino del país y las zonas productoras se distribuyen principalmente en los departamentos del oeste: Tinogasta-Fiambalá y la región de los Valles Calchaquíes en Santa María (Ministerio de Hacienda Presidencia de la Nación, 2019).

Los cítricos cuentan con 1.916 hectáreas distribuidas entre naranjas y mandarinas. Los principales productores son los departamentos de Capayán y Santa Rosa. Con áreas mucho más reducidas, pero en expansión, pueden mencionarse los cultivos de la tuna en los departamentos de Santa Rosa, Capayán y Santa María; los frutales de pepita (peras y manzanas) en Andalgalá y el oeste, y la higuera en Capayán (INDEC, 2002, como se citó en Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004). La producción de frutales de carozo (ciruelas y duraznos) registró entre los censos 1998 y 2002 una disminución del 15% del área, en Andalgalá, Capayan y Santa María (INDEC, 2002, como se citó en Nuñez-Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

En los departamentos de Santa María y Belén se cultivan aromáticas y pimiento para la elaboración de pimentón; este último es el más importante ocupando unas 520 hectáreas en Santa María (INDEC, 2002, como se citó en Nuñez -Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

La provincia presenta una elevada concentración de explotaciones de superficie reducida, que normalmente se hallan asociadas a las áreas de riego tradicionales.

Las exportaciones catamarqueñas representaron en el año 2009, el 2% del total nacional, y en su mayoría correspondieron al complejo minero, y en menor escala al complejo olivícola. Los grandes rubros de dichas exportaciones fueron los siguientes: productos primarios (87%), manufacturas de origen agropecuario (3%) y manufacturas de origen industrial (10%) (Maldonado, 2011).

1.2.2.3. Riego en Catamarca

Debido a las condiciones de aridez que imperan en la mayor parte del territorio provincial, la disponibilidad de agua es lo que ha delineado el desarrollo de los asentamientos poblacionales a lo largo de su historia. La disponibilidad de agua es lo que hace posible el desarrollo de la agricultura, pero su relativa escasez es a la vez lo que limita su expansión (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

De acuerdo al Censo Nacional Agropecuario 2002, de una superficie total con explotaciones agropecuarias de 1.588.806 hectáreas, se cultivan 160.000 hectáreas y se riegan un total de alrededor de 62.000 hectáreas (38% del total cultivado). El 39% de esta superficie se riega mediante sistemas por gravedad y utilizan como fuente aguas superficiales, mientras que un total de 37.700 hectáreas (61%) se riegan mediante sistemas presurizados, estimándose que la mayor parte del agua utilizada en estos sistemas se obtiene de fuentes subterráneas (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004; Provincia de Catamarca, 2014).

Los sistemas de riego tradicionales de la provincia de Catamarca reflejan la distribución de los recursos hídricos, que se caracterizan por la cantidad de cursos de agua, sus reducidos caudales, su estacionalidad y su distribución. El módulo total de riego se estima en 22 a 24 m³ s⁻¹; los más importantes tienen promedios anuales que oscilan entre los 2 y 4 m³ s⁻¹ y concentran la mitad del recurso. El resto se distribuye en cursos de agua menores (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

1.2.2.3.1. Recursos hídricos

La provincia de Catamarca cuenta con 9 cuencas hídricas (figura 1.5) y 52 cursos de agua, cuyo módulo total se estima en aproximadamente 24 m³ s⁻¹. La gran mayoría de estos cursos son de carácter esporádico y de régimen torrencial, lo que ocasiona grandes inconvenientes para su aprovechamiento racional y eficiente; esto hace necesaria su regulación con obras de embalse para su aprovechamiento (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

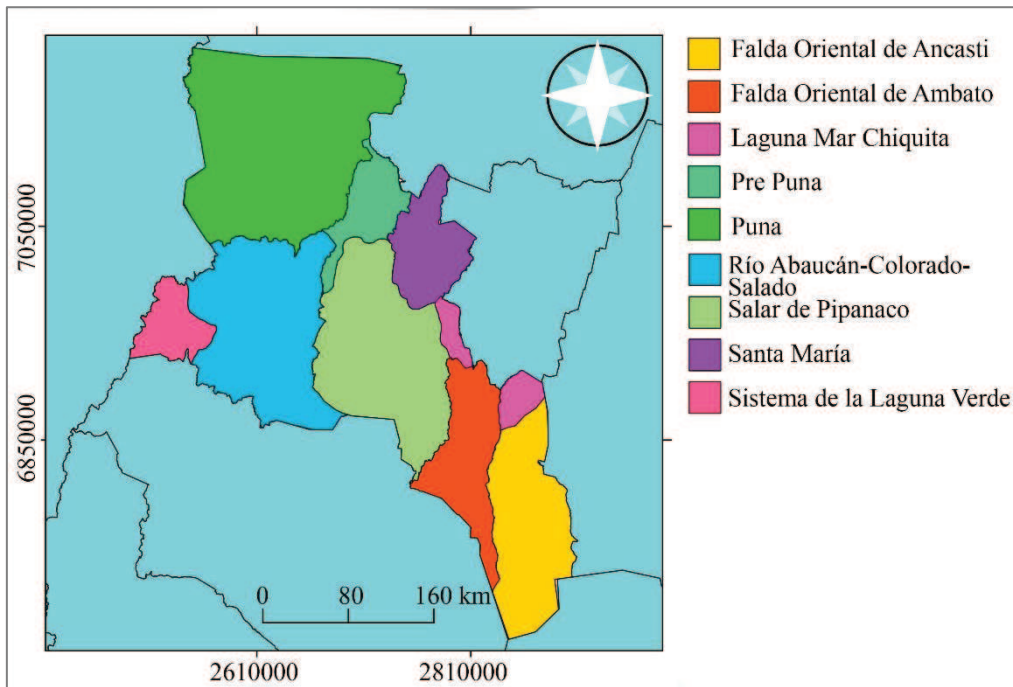


Figura 1.5: cuencas hidrográficas de Catamarca. Fuente: elaboración personal empleando datos de IDECAT (2017).

En todos los valles y bolsones de la provincia hay recursos de agua subterránea. Su aprovechamiento económico y sustentable, para riego, industria y minería ha sido probado a todo lo largo y ancho del territorio provincial. Los caudales estimados de los acuíferos son de $10.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en la cuenca de Bolsón Pomán Belén; de $4.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en el Valle de Santa María, y de $8.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en la cuenca del Valle de Catamarca (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004). Pueden diferenciarse tres regiones naturales de riego (Nuñez - Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004)(figura 1.6).

- Región Oeste: constituida por el pedemonte y las montañas de la Cordillera de Los Andes y donde, en la mayor parte del territorio, las lluvias son inferiores a los 150 - 200 mm anuales. Esta región tiene un módulo de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ y abarca los departamentos de Tinogasta, Santa María, Belén, Andalgalá, Pomán y Antofagasta de la Sierra. Comprende las cuencas hidrográficas Puna, Prepuna, Sistema de Laguna Verde, Río Abaucán-Colorado-Salado, Santa María y Salar de Pipanaco (ver figuras 1.5 y 1.6). En las tres primeras cuencas (Puna, Prepuna y Sistema de Laguna Verde) no existen recursos hídricos importantes que permitan el desarrollo productivo, sumado esto al efecto de las temperaturas extremas y las escasas precipitaciones que generan condiciones climáticas desfavorables para la producción de cultivos; la actividad económica en esta zona se limita a la producción pecuaria (Paoli, 2003). En el resto

de las cuencas de la región oeste existen recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, que permiten el desarrollo de cultivos.

- **Región Centro:** corresponde al área del Valle Central, con lluvias que van de los 430 mm en el sur a los 630 mm en el extremo norte, presentándose numerosos microclimas por efecto de la orientación de los valles y serranías especialmente en la ladera oriental de la Sierra de Ambato. Esta región abarca el Valle Central de la provincia y tiene un módulo de $6\text{ m}^3/\text{s}$ (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004). Abarca los departamentos de Fray Mamerto Esquiú, Valle Viejo, Capayán, Paclin, Capital y Ambato. Abarca por completo la cuenca Falda Oriental de Ambato (cuenca del río Del Valle), donde hay múltiples desarrollos productivos en base a recursos hídricos superficiales y subterráneos.
- **Región Este:** esta región presenta lluvias de alrededor de 540 mm en el sur y entre los 500 mm a 761 mm en el centro y norte (Fick & Hijmans, 2017). Esta región tiene un módulo de $4\text{ m}^3/\text{s}$ y tiene 5 embalses (con una capacidad original de 52 hm^3) (Provincia de Catamarca, 2014). Abarca los departamentos de Ancasti, El Alto, La Paz y Santa Rosa, y las siguientes cuencas hidrográficas: Falda Oriental de Ancasti y Laguna Mar Chiquita (también denominada cuenca de Santa Rosa). Se pueden diferenciar dos zonas ambientales, la zona agrícola en el Norte, principalmente en Santa Rosa y la zona ganadera en el sur en los departamentos del Alto y La Paz (Nuñez -Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

En la figura 1.6 puede observarse la distribución de los departamentos de la provincia en las diferentes regiones de riego.

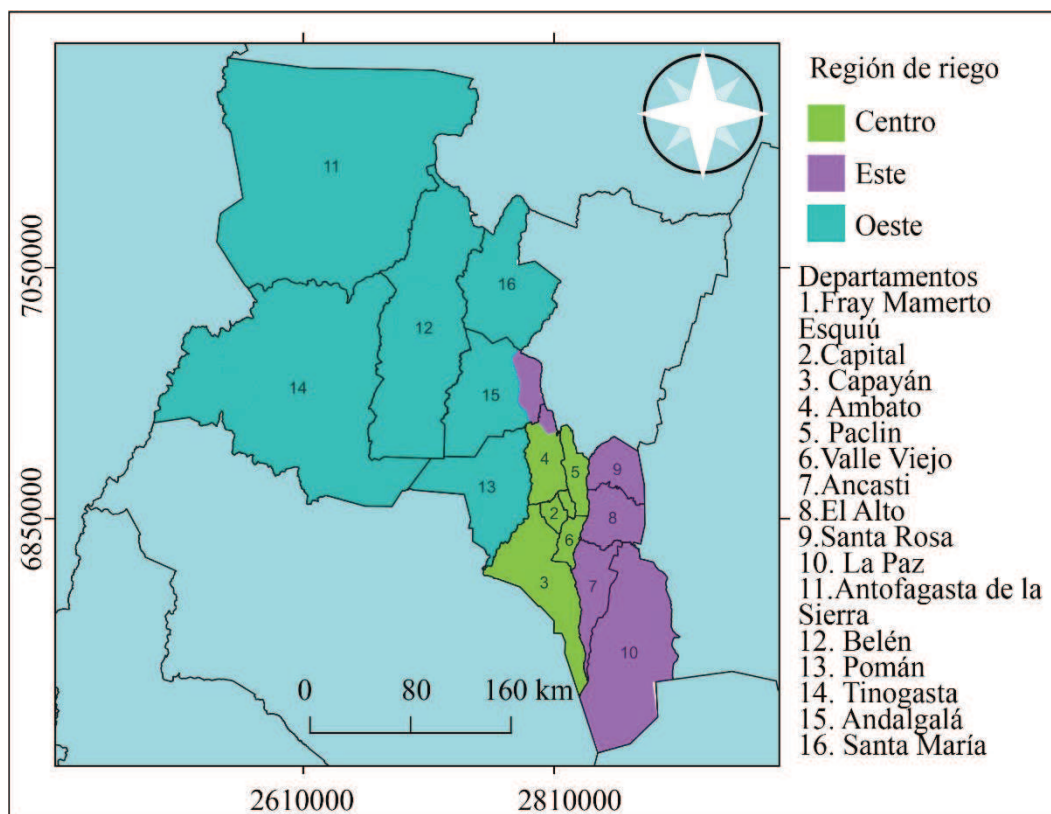


Figura 1.6: regiones naturales de riego y departamentos de Catamarca. Fuente: elaboración personal a partir de datos geográficos pertenecientes a la Infraestructura de datos espaciales de Catamarca (IDECAT) y del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

1.2.2.4. Antecedentes para el cultivo de la nuez de Pecán en Catamarca.

La provincia de Catamarca es la principal productora de nuez de nogal a nivel nacional con un total de 5900 hectáreas implantadas y un nivel de producción de 5434 toneladas para el año 2013 (Doreste, 2013). Dado que existen en el país variedades de pecán que presentan bajos requerimientos de horas frío, por ejemplo, Mahan y Succes con un requerimiento de 300 a 400 horas frío anuales (Kuden et al., 2013), esto representa una posibilidad de expansión de la producción de frutos secos a zonas en donde el nogal europeo no cumple sus requerimientos de al menos 700 horas de frío (Luedeling et al., 2009). Si bien esto es cierto, también se debe considerar que el mejoramiento genético es muy dinámico y puede modificar la situación actual de los cultivos. A modo de ejemplo, la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Catamarca obtuvo un nuevo cultivar de nogal europeo de alta calidad comercial, y cuyo requerimiento de frío está entre 500 y 600 horas de frío (Carabajal et al., 2021) . Por lo tanto, la oportunidad que representa el nogal pecán, gracias a su amplia disponibilidad de cultivares adaptables a diferentes condiciones, es la de expansión de la zona nogalera hacia aquellos sitios en donde no es

posible actualmente la producción de nuez europea con resultados económicos aceptables.

En la provincia de Catamarca se dan características climáticas propicias para la producción de pecán bajo riego, con la excepción de la región cordillerana (Gómez & Cruzate, 2007). De acuerdo a la clasificación termohídrica desarrollada por Sierra et al. (2007) la provincia de Catamarca cuenta con zonas aptas, siempre y cuando se emplee riego complementario y variedades adecuadas. En este sentido, dado que el pecán presenta una amplia diversidad de cultivares, con diferencias en cuanto al requerimiento de horas de frío anuales y en cuanto a la duración de la estación de crecimiento, se destaca la importancia de este cultivo como una alternativa de expansión de la producción nogalera hacia las zonas menos frías de la provincia, aprovechando la experiencia y la infraestructura disponible (Dante Carabajal, INTA EEA Catamarca, comunicación personal).

La humedad relativa del ambiente es baja, lo que sumado a las escasas precipitaciones constituye una condición excelente para la calidad de las nueces y el estado sanitario de las plantas, evitando el desarrollo de enfermedades sobre hojas y frutos (Sparks, 1997) y permitiendo el cultivo de variedades altamente productivas pero susceptibles a la sarna del pecán (*Cladosporium caryigenum*) sin la aplicación de pesticidas.

Desde el año 2012 existe una parcela experimental en la EEA INTA Catamarca, en la localidad de Sumalao, donde se plantaron 8 variedades de nogal pecán (Delgado & Carabajal, 2018). El propósito del ensayo es el de evaluar el comportamiento y adaptabilidad de los diferentes cultivares en la zona. Estos autores han determinado que es posible producir pecán en dicha área, utilizando riego complementario.

Considerando que haya la suficiencia de recursos hídricos para suplementar los requerimientos de agua de este cultivo algunas zonas de esta provincia pueden convertirse en las mejores productoras de nuez pecán de la Argentina (Sierra et al., 2007).

Para analizar las posibilidades de establecer producciones comerciales de pecán con buenos resultados en la provincia de Catamarca, es necesario entonces analizar los recursos naturales disponibles, las condiciones climáticas y las limitaciones territoriales que puedan llegar a presentarse, y su distribución espacial dentro del área de estudio. Con esto, y teniendo en cuenta los requerimientos del cultivo, será posible delimitar las áreas

con mayor potencial para la producción de nuez pecán, y diferenciarlas de aquellas en las cuales no es posible el establecimiento del cultivo. Este análisis puede ser llevado a cabo en forma completa a través de la metodología de evaluación de tierras, de la cual se detallan algunos conceptos a continuación.

1.3. Los SIG en la determinación de aptitud de tierras

1.3.1. Conceptos generales

Uno de los pasos principales para la planificación del uso sostenible de las tierras es la evaluación de su aptitud (Zolekar & Bhagat, 2015) y la determinación del óptimo uso de las mismas en función de su potencial. La evaluación de tierras es un proceso empleado para definir (Akıncı et al., 2013) y medir el grado de adaptabilidad para ciertos tipos de usos (El Baroudy, 2016) y agrupar las unidades de tierras de acuerdo a ello (Zolekar & Bhagat, 2015). Asimismo, el principal objetivo de este tipo de estudios es determinar el potencial para formas alternativas de uso de las tierras mediante una comparación sistemática de los requisitos de uso con los recursos disponibles (Walke et al., 2012).

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos enfoques de evaluación de tierras y cada uno tiene un procedimiento metodológico específico (Walke et al., 2012), el más difundido es el propuesto por FAO (1976) que consta de cinco clases de aptitud: muy apto, moderadamente apto, marginalmente apto, no apto temporalmente, y permanentemente no apto (FAO, 1976). Este método se basa en la comparación entre las cualidades de las unidades de tierras y los requerimientos de un uso específico y puede ser implementado a diferentes escalas para una amplia gama de usos de la tierra (Morales-Poclava et al., 2015). A través de este enfoque, el término “tierra” se define como una unidad de la superficie terrestre que se puede delinear y delimitar, abarcando todos los atributos de la biósfera inmediatamente por encima y por debajo de su superficie, incluyendo el clima, el suelo, las formas del terreno, la superficie hidrológica, las capas sedimentarias cercanas a la superficie y las reservas de aguas subterráneas asociadas, las poblaciones de flora y fauna, los resultados físicos de la actividad humana, las estructuras para reserva o drenaje de aguas, caminos, construcciones, etcétera” (FAO, 1976).

Si bien no existe una estandarización en la elección de los criterios a utilizar en este tipo de trabajos, las condiciones climáticas, la topografía y las propiedades de los suelos son ampliamente utilizadas (Akıncı et al., 2013; Walke et al., 2012). La evaluación de la

aptitud de tierras agrícolas comprende el análisis de una amplia variedad y cantidad de datos, incluyendo características climáticas (temperatura y precipitaciones), propiedades internas de los suelos (humedad, porosidad, fertilidad natural, profundidad, textura y salinidad) y características externas (relieve, inundaciones y accesibilidad) (Akıncı et al., 2013). LI et al. (2012) para la determinación de áreas aptas para la producción de té en China empleó en total 9 características agrupadas en tres factores: clima (temperatura media anual, temperatura acumulada por encima de 10°C, humedad media de octubre a abril, y frecuencia de temperaturas por debajo de -13°C), topografía (modelo digital de elevación, aspecto y relieve) y suelos (tipo de suelo y textura). También puede decirse que este tipo de análisis resulta complejo, porque para determinar el tipo de uso óptimo a largo plazo es necesario analizar criterios socio-económicos y riesgos ambientales, además de aquellas características inherentes a la tierra (Akıncı et al., 2013)

El análisis de la aptitud de las tierras basado en los SIG es una de las aplicaciones más ampliamente utilizadas para la planificación del territorio (Romano et al., 2015). La vinculación directa entre SIG y ordenamiento territorial radica en la utilización de procedimientos que permiten evaluar e integrar las múltiples alternativas y limitaciones que brinda el territorio en la definición de algún tipo de uso del suelo (Barredo & Bosque-Sendra, 1998). Los SIG, por un lado, proveen la capacidad de recopilar, almacenar, recuperar, transformar y mostrar grandes volúmenes de datos espaciales y sus atributos temáticos relacionados (Barredo & Bosque-Sendra, 1998; Caprioli & Bottero, 2021); por otro lado, brindan la posibilidad de realizar análisis espaciales y proporcionar un conocimiento integrado sobre el territorio, teniendo en cuenta la dimensión espacial del problema de toma de decisiones (Caprioli & Bottero, 2021). En este tipo de estudios los SIG y las herramientas estadísticas geoespaciales se utilizan para evaluar las unidades de tierra y presentar los resultados en forma de mapas de aptitud (Walke et al., 2012). En todos los casos se parte de la premisa que una determinada área se subdivide en un conjunto de unidades básicas de observaciones y que el problema de la idoneidad del uso del suelo implica la evaluación y la clasificación de esas unidades de área en función de su idoneidad para una actividad en particular (Malczewski, 2006).

En los SIG existen dos estructuras básicas para representar la información: el formato ráster, que divide el espacio geográfico en una matriz cuadrículada en la que cada celda (también llamada localización o pixel) contiene información correspondiente a la

característica predominante en ella; y el formato vectorial que organiza los datos geográficos en base a la perspectiva de bases de datos relacionadas y a partir de esto permite trabajar digitalmente utilizando tres tipos de entidades gráficas: punto, línea y polígono (Buzai, 2013). En un SIG las unidades de observación (expresadas como celdas o polígonos) cuentan con una serie de atributos cualitativos o nominales (ocupación del suelo, unidades edáficas, entre otros) o cuantitativos (altitud, precipitación, etc.) (Regil & Franco, 2009).

1.3.2. Evaluación multicriterio

La Evaluación Multicriterio (EMC) es uno de los procedimientos de mayor importancia cuando los SIG son utilizados para la toma de decisiones locacionales en el análisis espacial (Buzai & Baxendale, 2011). Puede ser definida como un conjunto de técnicas que apoyan el proceso de toma de decisión (Buzai & Baxendale, 2011); también como un conjunto de métodos estructurados que formalizan el proceso de toma de decisiones necesario para abordar un problema definido (Lourdes et al., 2022). A través de la integración de los SIG con la EMC se toman en cuenta diversos criterios (Mendas & Delali, 2012) que ayudan en la evaluación de las tierras, expresando la aptitud en pesos, valores o intensidades de preferencia (Walke et al., 2012), y determinando la idoneidad de un sitio para un propósito o uso dado (Lourdes et al., 2022).

La EMC comienza con la información básica compuesta por variables en formato de layers o capas, las cuales sirven como criterios para llevar adelante los procedimientos de evaluación (Buzai & Baxendale, 2011; Lanzelotti & Buzai, 2015). Un criterio puede definirse como la evidencia sobre la cual se basa la decisión (Jiang y Eastman, 2000, como se citó en Da Silva & Cardozo, 2015), por lo cual constituye el sustento indispensable para definir la aptitud de una unidad de tierra para el uso que se desea establecer (Da Silva & Cardozo, 2015). El diseño, selección y generación de los criterios que se emplearán en el análisis (Narváez, 2021) es un paso determinante, ya que el resultado final puede variar considerablemente en función de las variables elegidas. Es importante destacar que la elección de los criterios debe definirse con anterioridad al desarrollo empírico de la investigación, por lo cual es necesario tener un consistente conocimiento previo del fenómeno analizado (de Cos Guerra, 2007).

Se debe considerar que hay dos tipos de criterios (Buzai & Baxendale, 2011; Regil & Franco, 2009): los que presentan valores de aptitud continua en cada variable para asignar el uso del suelo que se intenta ubicar, llamados factores, y las capas temáticas que actúan con la finalidad de confinar los resultados en un sector delimitado del área de estudio, llamados restricciones (Buzai & Baxendale, 2011; Lanzelotti & Buzai, 2015). Los factores se miden en términos cuantitativos, es decir que aumentan o disminuyen la aptitud, y las restricciones se expresan en una variable binaria donde 1 es apto y 0 es no apto (Bosque Sendra & García, 2000).

Dado que las variables involucradas en la EMC presentan diferentes unidades de medidas, estas deben ser sometidas a un proceso de estandarización. Los factores se generan por estandarización fuzzy, lo cual permite la generación de mapas-criterio que representan las transiciones graduales del espacio (Ceballos-Silva & López-Blanco, 2003), como agrupaciones sin límites tajantes donde la transición entre la pertenencia y la no pertenencia de un elemento en el conjunto es gradual (Malcsewski, 1999). Las restricciones, en cambio, se generan por estandarización booleana, a través de la cual los valores de cada variable son transformados a números digitales en dos únicas categorías: 1 y 0, apto y no apto, respectivamente. Existe también otro tipo de procedimiento, como el puntaje omega, el cual se aplica en el análisis multivariado simple para la estandarización de variables de origen vectorial, con la finalidad de obtener a partir de ellas un valor de síntesis que se lleva al mapa y del cual se puede analizar su distribución espacial (Buzai et al., 2015).

En todos los casos, se dispone de una serie de parámetros que afectan a un determinado tipo de uso o fenómeno, y se busca evaluar la medida en que afectan y condicionan al mismo, para de este modo estudiarlo y tomar decisiones en función de los resultados obtenidos (Olaya, 2020).

Puede decirse entonces que las diferentes variables involucradas en la EMC, cada una de ellas recogida en una capa distinta, se combinan para obtener algún tipo de resultado en base a la información que representan (Olaya, 2020), y de esta manera determinar si la actividad puede o no llevarse a cabo.

La combinación lineal ponderada (WLC), es una técnica de EMC que aplica ponderaciones a los factores implicados, llevando la solución hacia un nivel de riesgo

medio en la toma de decisión locacional (Buzai & Baxendale, 2011). La materia prima para este procedimiento la constituyen los factores estandarizados por la lógica fuzzy, la cual permite obtener mapas de aptitud continua para cada factor, en donde cada localización se clasifica en cuanto al nivel que tiene entre los extremos apto-no apto (Buzai & Baxendale, 2011).

Como paso previo a la combinación por superposición de los mapas, se asignan a las capas de factores valores de ponderación, de acuerdo a la importancia relativa que cada uno tiene dentro del conjunto, debiendo ser la suma de la ponderación de todos los factores igual a 1 (Buzai & Baxendale, 2011). De este modo, se genera un sistema de compensación, en el cual influyen de forma determinante los pesos relativos de los factores: las locaciones no aptas en alguno de los factores no quedan excluidas si tienen aptitud aceptable en otros factores de elevado peso relativo (de Cos Guerra, 2007).

Existen diferentes métodos para la determinación de la importancia relativa de los factores involucrados, siempre teniendo como definición aplicativa que la importancia del tema es de un 100% y que cada factor representará un porcentaje de ese total. Pueden citarse el proceso por jerarquía analítica (AHP: Analytical Hierarchy Process) (Saaty, 1990), y el Método por Ranking Recíproco de Malczewski (1999), que obtiene similares resultados con una metodología de cálculo más sencilla (Buzai & Baxendale, 2011). Este último, consta de la asignación de un ranking a cada capa temática de acuerdo a la importancia que tiene en el estudio.

La instancia siguiente de la WLC consiste en combinar los mapas de factores multiplicados por sus pesos relativos para obtener un nuevo mapa de resultado con un continuo de aptitud para la asignación del uso (Buzai & Baxendale, 2011).

A modo de resumen, puede decirse que cuando se aplica la EMC para obtener una solución a un problema multicriterio-multiobjetivo, se parte de la selección de los criterios, luego se aplican las estandarizaciones para obtener factores (fuzzy) y restricciones (booleana), y finalmente se aplica el método de WLC. De esta forma se obtiene un mapa resultado con un continuo de aptitud para la asignación del uso, el cual puede ser reclasificado para su interpretación y posterior toma de decisiones (Buzai & Baxendale, 2011). Todos estos procedimientos pueden esquematizarse como se muestra en la figura 1.7 a continuación:

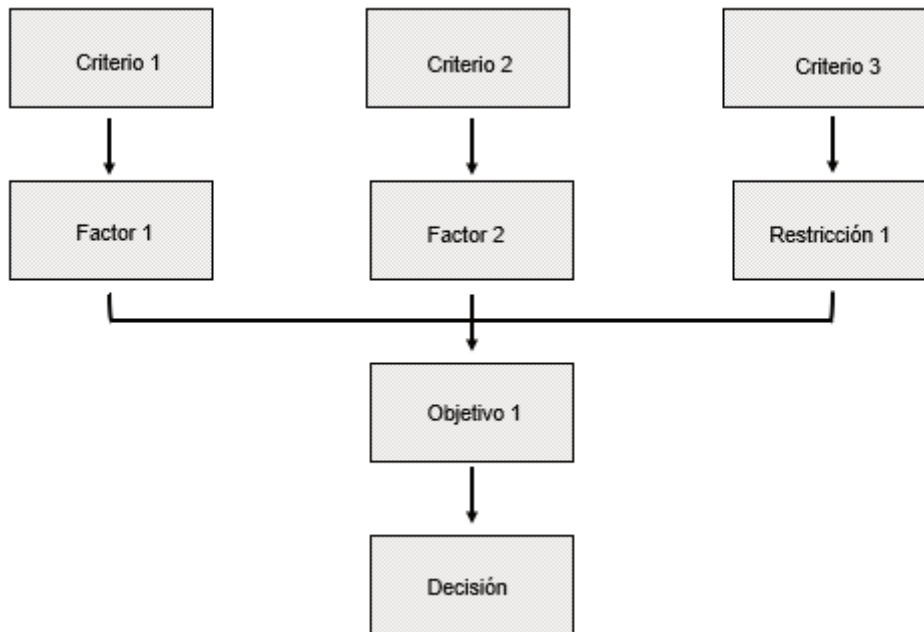


Figura 1.7: esquema de procedimiento multicriterio-uniobjetivo. Fuente: adaptado de Buzai & Baxendale (2011).

1.3.3. Antecedentes de los SIG en la evaluación de tierras

La evaluación multicriterio (EMC) y los SIG han sido utilizados por diversos autores (Walke et al., 2012) para determinar la idoneidad de las tierras para determinados usos, como por ejemplo la aptitud para cultivos agrícolas en Turquía (Akıncı et al., 2013) y en áreas rurales costeras de Italia (Romano et al., 2015), para el cultivo de trigo en Egipto (El Baroudy, 2016) y en Algeria (Mendas & Delali, 2012), para el cultivo de té en la provincia de Zhejiang en China (LI et al., 2012), para la producción de algodón en India Central (Walke et al., 2012) y cultivos cítricos en la India (Zabihi et al., 2015). De igual forma (Bunruamkaew & Murayama, 2011) han empleado esta metodología para la selección de áreas óptimas para el desarrollo de eco-turismo en Tailandia, y Lanzelotti & Buzai (2015) la han aplicado para la elaboración de modelos de aptitud para el desarrollo de la agricultura prehispánica y la agricultura actual en un sector del Valle de Santa María, en la provincia de Catamarca, Argentina.

1.4. Hipótesis y objetivos

La hipótesis de este trabajo es que la provincia de Catamarca cuenta con áreas aptas para la producción de nuez pecán y que dicha aptitud puede ser determinada tomando en cuenta criterios biológicos-productivos, legales, socio-económicos y ambientales.

Se plantea como objetivo general caracterizar la aptitud de la provincia de Catamarca para la producción de nuez pecán a través de la metodología Evaluación Multicriterio (EMC) y modelado cartográfico utilizando sistemas de información geográfica (SIG), tomando en cuenta criterios biológicos-productivos, legales, socio-económicos y ambientales.

1.5. Objetivos específicos

- Elaborar mapas de factores y de restricciones para la determinación de la aptitud del área de estudio para la producción de nogal pecan, en formato ráster.

- Aplicar ponderaciones a los mapas de factores, definidas por encuesta a profesionales del sector.

- Obtener un mapa de aptitud productiva del área de estudio en función de los requerimientos biológico-productivos de la nuez pecán y de la disponibilidad de fuentes de riego gravitacional y presurizado utilizando la metodología WLC y la ponderación por ranking recíproco de Malczewski, sumando los mapas de factores y aplicando los mapas de restricciones.

- Modelizar la distribución óptima de plantas de acondicionamiento de nuez pecán en función de la infraestructura vial, el acceso a los mercados internacionales, y la distancia a los sitios de producción delimitados en el mapa de aptitud para la producción de nogal pecán obtenido en los pasos previos.

2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este trabajo consistió en el análisis de aptitud del territorio de la provincia de Catamarca para la producción de nuez pecán, en función de los requerimientos de la especie, y de variables biológico-productivas, socioeconómicas, ambientales y legales. Para ello se aplicó la técnica de Evaluación Multicriterio y modelado cartográfico utilizando Sistemas de Información Geográfica.

La metodología se dividió en dos instancias: en la primera se aplicó la combinación lineal ponderada (WLC) para obtener el mapa de aptitud para producir pecán en la provincia de Catamarca, a partir de los requerimientos de la especie y una serie de criterios seleccionados; mientras que, en la segunda instancia, se obtuvo un mapa de localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán, empleando como insumo el mapa de zonas candidatas obtenido en la primera etapa, también aplicando WLC.

2.1. Selección de criterios

La selección de los criterios involucrados en este trabajo se realizó en base a los antecedentes bibliográficos revisados durante la formulación del proyecto, y a la consulta con profesionales referentes de la producción de nuez pecán en Argentina, tanto del ámbito público (INTA Delta del Paraná, Universidad Nacional de Luján, y Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral) como del ámbito privado (productores, asesores profesionales, y asociaciones de productores del sector). De esta manera se definió un listado de criterios que influyen en el establecimiento de una plantación de nuez pecán, ya sea porque condicionan la performance del cultivo, o porque implican restricciones territoriales para el emplazamiento de un establecimiento de producción primaria a campo. En el caso de los criterios involucrados para la determinación de la distribución óptima de plantas de procesamiento, se seleccionaron variables socio-económicas que influyen en los costos de traslado desde las zonas candidatas a las plantas de procesamiento, y desde las plantas de procesamiento hasta su punto de exportación.

A continuación, se presenta el listado de criterios que se seleccionaron para la elaboración del mapa de aptitud para producir pecán en la provincia de Catamarca:

- Variables climáticas: precipitaciones medias anuales, temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, sumatoria de horas de frío, periodo libre de heladas.

- Variables edáficas: profundidad, salinidad, riesgo de anegamiento, rocosidad, textura, drenaje.

- Altura sobre el nivel del mar.

- Disponibilidad de recursos hídricos subterráneos y superficiales.

- Restricciones territoriales: Ley de Bosques Provincial n°5311, Parques y reservas naturales, y centros urbanos.

Por otro lado, se presenta el listado de criterios que se seleccionaron para la obtención del mapa de distribución óptima de plantas de procesamiento:

- Variables socio-económicas: rutas nacionales y provinciales, y puertos argentinos.

- Zonas candidatas para producir pecán en Catamarca (resultado del mapa de aptitud obtenido en la primera instancia).

2.2. Modelado cartográfico

Los criterios seleccionados presentan una distribución espacial que se organiza en capas temáticas, en donde cada criterio corresponde a una capa temática, y en la que cada locación (pixel) presenta un valor X para cada variable. Se generaron mapas de restricciones y de factores en formato ráster, a través de modelado cartográfico y utilizando SIG (cuadro 2.1).

Para el modelado cartográfico de las variables biológico-productivas se tuvieron en cuenta los requerimientos de la especie que se detallan a continuación:

- Precipitaciones medias anuales: el requerimiento óptimo de la especie está ubicado entre 1000 a 1300 milímetros anuales (Sparks, 2005).

- Temperatura máxima media del mes más cálido y mínima media del mes más frío: los requerimientos de temperaturas del pecán se tomaron para el periodo comprendido entre inicios de la brotación y la madurez de los frutos; la temperatura mínima media del mes más frío es de 0,6 °C (Sparks, 1997) y la temperatura máxima media del mes más cálido de 41 °C (Sierra et al., 2007).

Mapa	Factores	Restricciones
Aptitud para la producción de nogal pecán	Temperatura máxima media mes más cálido	Ley de Bosques n°5311
	Temperatura mínima media mes más frío	Parques y reservas naturales
	Precipitaciones medias anuales	Centros poblados
	Sumatoria de horas de frío	
	Factores edáficos (rocosidad, anegamiento, drenaje, salinidad, textura, profundidad)	
	Altura sobre el nivel del mar	
	Recursos hídricos subterráneos y superficiales	
Distribución óptima de plantas de procesamiento	Distancia a rutas nacionales y provinciales	
	Distancia a puertos	
	Distancia a zonas candidatas	

Cuadro 2.1: factores y restricciones generados.

- Sumatoria de horas de frío: el requerimiento de horas de frío del pecán fue tomado de Kuden et al. (2013) y Sparks (1993), quienes informan valores de entre 300 y 600 horas, existiendo diferencias entre variedades.

- Periodo libre de heladas: el requerimiento de la especie es de 140 a 200 días (Sparks, 2005).

- Factores edáficos: los requerimientos fueron tomados de Herrera (1999), y se enumeran a continuación:

- Profundidad del suelo: mayor de 100 cm.
- Textura del horizonte sub-superficial: Franco.
- Salinidad: Suelos no salinos a débilmente salinos.
- Drenaje: Bien drenado y moderadamente bien drenados.
- Anegamiento: sin peligro y muy poco, de acuerdo al momento del año en que se produce y la duración del periodo de anegamiento.

- Rocosidad: menor al 20%.
- Altura sobre el nivel del mar: los valores óptimos de alturas fueron tomados de Sparks (1997) y van de 914 a 1326 metros.
- Disponibilidad de agua de riego superficial y de agua de riego subterránea: Se consideró que las áreas que pueden ser regadas tienen una aptitud máxima.

En cuanto a los mapas de restricciones se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Centros urbanos: por tratarse de zonas impermeabilizadas y urbanizadas, todas las áreas comprendidas en ejidos urbanos se consideraron no aptos.
- Parques y reservas naturales: todas las áreas clasificadas como áreas protegidas se consideraron no aptas.
- Ley de bosques provincial n°5311: se consideraron no aptas todas las áreas comprendidas dentro de las 3 categorías de la ley.

Respecto de las variables socio-económicas implicadas en la distribución óptima de las plantas de procesamiento se tuvieron en cuenta las siguientes cuestiones:

- Distancia a puertos: se consideró la distancia al puerto de Zárate, desde donde se exporta la nuez pecán, de acuerdo a los costos de traslado. La distancia máxima admitida fue de 4410 km.
- Distancia a rutas provinciales y nacionales: la distancia máxima deseable para una óptima conectividad vial es de 2 km (Babilonia Ballesteros et al., 2019).
- Distancia a zonas candidatas: la distancia hasta la cual resulta rentable el traslado de la producción se determinó en función de los costos, resultando ser de 4857 km (ver sección 2.6.6.1).

Los costos de traslado se estimaron en función de la información proporcionada por actores de la cadena del pecán en Argentina (productores y comercializadores), y de los costos de flete de referencia para 2022, publicados por la federación de transportadores de Argentina (FeTrA, 2022).

2.2.1. Fuentes de datos para el modelado cartográfico

Se utilizaron diversas fuentes de datos como insumos para el modelado cartográfico. Las mismas se detallan a continuación:

- Factores edáficos: se utilizó como fuente de datos la carta de suelos de Argentina en escala 1:500.000 de INTA (2011), de la cual se recortó el área correspondiente a la provincia de Catamarca.

- Altura sobre el nivel del mar: se utilizó el modelo digital de elevación ASTERDEM, obtenido del servidor del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

- Variables climáticas: se utilizó como fuente de datos climáticos históricos el modelo WorldClim (Fick & Hijmans, 2017) y datos de estaciones meteorológicas locales de INTA y Servicio Meteorológico Nacional.

- Disponibilidad de agua de riego superficial y de agua de riego subterránea: se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 para el mapeo de áreas de riego superficial, y se utilizaron como fuentes bibliográficas diversos estudios sobre recursos hídricos subterráneos realizados en las diferentes cuencas hídricas de la provincia (dicha información se describe con detalle en la sección 6.6 de este apartado).

- Parques y reservas naturales: se emplearon las capas vectoriales de Sitios RAMSAR y Laguna Blanca (Administración de parques nacionales de Argentina, 2018).

- Ley de bosques provincial N° 5311: se utilizó la capa vectorial Ordenamiento Territorial de Bosque Nativo de la Provincia de Catamarca 2016 (Ministerio de Agroindustria, 2016).

- Centros urbanos: se utilizó la capa vectorial Radios Censales de Catamarca, del Censo Nacional 2010 (INDEC, 2015) y se complementó con la capa Google Hybrid.

- Rutas provinciales y nacionales: se utilizaron capas vectoriales de la infraestructura de datos espaciales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (IGN, 2022).

- Puertos: se utilizó la geolocalización de los puertos argentinos disponible en el portal del Ministerio de Transporte de la Nación (Ministerio de transporte, 2022).

Dado que las fuentes de datos para cada criterio en particular difieren en cuanto a formato y a la naturaleza de cada variable, fue necesario aplicar tratamientos diferenciales para cada una de las capas, previo al paso de estandarización. Estos procedimientos se

describen con detalle en las secciones 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3, 2.6.4, 2.6.6 y 2.6.8 de este apartado.

Todas las capas fueron reproyectadas al sistema de coordenadas EPSG: 5344 - POSGAR 2007 / Argentina 2; este sistema ha sido generado por el IGN para representar el territorio de la República Argentina, y presenta coordenadas planas, medidas en unidades métricas, lo cual permite la estimación de áreas en forma precisa.

2.2.2. Estandarización

Debido a que las variables se encontraban en diferentes escalas de dimensión (°C, mm, m, o índices de aptitud numéricos, por ejemplo), fue necesario realizar un procedimiento de estandarización para llevarlas a unidades comparables, previo a la aplicación de la WLC.

2.2.2.1. Estandarización por lógica fuzzy

Para la creación de los mapas de factores se aplicó estandarización por lógica fuzzy. Este enfoque de función de membresías fuzzy permite realizar una estandarización para representar transiciones graduales del espacio (Ceballos-Silva & López-Blanco, 2010). Los conjuntos fuzzy son agrupaciones sin límites tajantes donde la transición entre la pertenencia y la no pertenencia de un elemento en el conjunto es gradual (Malcsewski, 1999), lo cual permite que los elementos pertenezcan parcialmente a múltiples conjuntos.

El procedimiento implica construir funciones de pertenencia al momento de estandarizar cada uno de los factores (Montes-Galbán, 2022). Existen varias funciones de pertenencia que oscilan entre 0 y 1, ó 0 y 255, indicando el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto; pueden ser lineales, en forma de J o sigmoidales. Asimismo, cualquiera de estas funciones puede adoptar tendencias crecientes, decrecientes o simétricas y quedan definidas a través de parámetros o puntos de control (a , b , c y d) que corresponden a los valores extremos y óptimos de las variables (Garfias-Salinas et al., 2012).

En este trabajo, se utilizó el módulo FUZZY del Software Idrisi SELVA desarrollado por Clark University, y se aplicó una estandarización en escala de byte de 0 a 255, donde 0 corresponde al menor valor de aptitud y 255 al máximo. Eastman (2012) recomienda utilizar esta escala de transformación ya que el módulo de EMC del software ha sido

optimizado utilizando este nivel; además, esto permite ocupar todo el espectro gráfico en la imagen ráster red-green-blue (RGB) (Garfias-Salinas et al., 2012) mejorando la visualización de los resultados.

Se aplicaron en distintos casos, la función sigmoidea simétrica, lineal creciente, y lineal decreciente. El tipo de función a aplicar y los puntos de control se determinaron de acuerdo al análisis de los requerimientos ambientales de la especie y la naturaleza de cada variable.

En la función sigmoidea simétrica, los puntos de inflexión se designan de forma tal que, por debajo de “a” todos los valores de X toman aptitud 0, entre “a” y “b” aumentan de 0 a 255, a partir de “b” hasta “c” toman valor 255, entre “c” y “d” disminuyen de 255 a 0, y por encima de “d” todos los X toman valor 0 (figura 2.1) (Eastman, 2012).

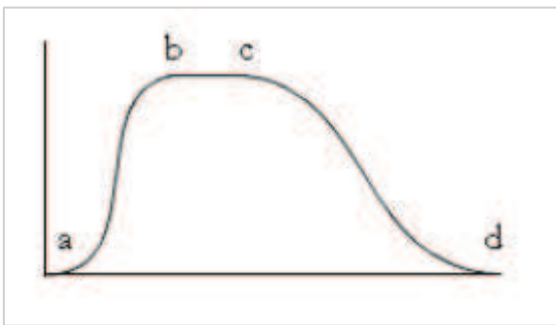


Figura 2.1: función sigmoidea simétrica. Extraído de Eastman (2012).

En el caso de la función lineal creciente (figura 2.2), el valor mínimo de pertenencia al grupo difuso se corresponde con el punto a, y el máximo con b; dado que por encima de b los valores no vuelven a disminuir, c y d tienen el mismo valor que b (Eastman, 2012).

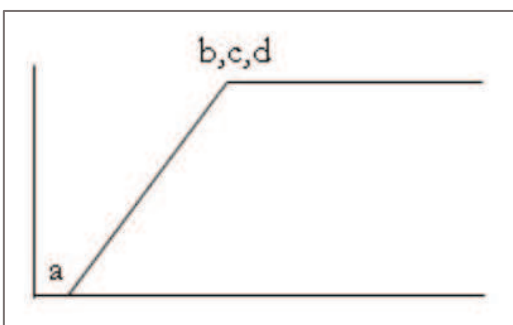


Figura 2.2: función fuzzy lineal creciente. Extraído de Eastman (2012).

En la función lineal decreciente, se comienza en 255 y luego se disminuye hasta llegar a 0; los puntos de inflexión a y b son iguales a c , que es el punto donde los valores son máximos y comienzan a disminuir hasta llegar a d (figura 2.3) (Eastman, 2012).

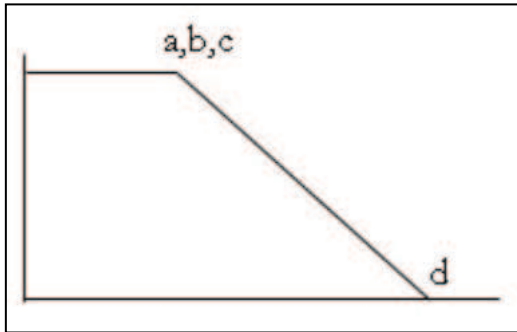


Figura 2.3: función lineal decreciente. Extraído de Eastman (2012).

El cuadro 2.2 resume las funciones aplicadas en cada uno de los casos.

Factor	Función de lógica fuzzy aplicada
Variables climáticas	Sigmoidea simétrica
Variables edáficas	Lineal creciente
Disponibilidad de recursos hídricos	Lineal creciente
Altura sobre el nivel del mar	Lineal decreciente
Variables socio-económicas	Lineal decreciente

Cuadro 2.2: funciones de estandarización fuzzy aplicadas para cada grupo de factores.

Los puntos de corte seleccionados para cada variable, se indican en las secciones 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3, 2.6.4, 2.6.6 y 2.6.8 de este apartado, en las cuales se detalla la metodología específica aplicada para el modelado de cada factor en particular.

2.2.2.2. Estandarización booleana

Para el modelado de los mapas de restricciones se estandarizaron las variables por el método booleano, de manera tal que los valores de cada variable fueron transformados a números digitales en dos únicas categorías: 1 y 0, apto y no apto, respectivamente. Para llevar a cabo este proceso se aplicó el módulo BOOLEAN del software Idrisi SELVA.

Los criterios para la asignación de las categorías se indican en la sección 2.6.5 de este apartado.

2.2.2.3. Estandarización por puntaje de clasificación espacial omega

En el caso particular de los criterios edáficos, como paso previo a la estandarización fuzzy se aplicó inicialmente una estandarización por puntaje de clasificación espacial omega. Esta técnica de análisis multivariado simple sirve para la estandarización de variables de origen vectorial (Buzai et al., 2015).

El puntaje se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$[2.1] \text{ Puntaje } \omega = \left(\frac{x_i - x_m}{x_M - x_m} \right) * 100$$

Donde x_i es el valor de la variable en cada unidad espacial, x_m y x_M son respectivamente el valor mínimo y el valor máximo de la serie de datos. Los resultados brindan valores entre 0 y 100, donde el 0 corresponde a la peor situación y el 100 a la mejor situación, tratándose de variables de beneficio como en este trabajo.

Luego se aplica la fórmula 2.2 para realizar el promedio de las variables estandarizadas:

$$[2.2] PCE = \frac{\sum \text{variables estandarizadas}}{n}$$

De este modo se genera un mapa síntesis donde la peor situación corresponde a 0, y la mejor situación es 100.

2.3. Ponderación de mapas de factores por ranking recíproco

Previo a la WLC se aplicaron ponderaciones a los factores. Estas ponderaciones se calcularon a través del método por Ranking Recíproco de Malczewski (1999), el cual consta de la asignación de un orden a cada capa temática de acuerdo a la importancia que tiene en el estudio.

La importancia de cada factor dentro del conjunto fue determinada a partir de revisión bibliográfica y de una encuesta dirigida a profesionales referentes en la temática (Montes Galbán, 2022), a los cuales se les solicitó asignarles números de orden a los factores en

función del peso que consideraban que debía tener cada uno en el mapa final, bajo la premisa de que dos o más factores pueden tener el mismo orden de importancia dentro del conjunto. En base a las respuestas obtenidas se elaboró una síntesis, donde el número de ranking de cada factor se calculó como el promedio de la totalidad de las respuestas.

Luego, se estimaron los pesos relativos de cada factor respecto del total y se aplicó la fórmula 2.3 para calcular los valores de ponderación (cuadros 2.3 y 2.4).

$$[2.3] \quad w_j = \frac{1/r_j}{\sum 1/r_j}$$

Donde w_j es el valor de ponderación otorgado a cada capa temática y r_j es el número de orden (ranking) que se le brinda a cada capa temática de acuerdo a su importancia.

Los valores de ponderación debieron cumplir con las siguientes propiedades:

$$[2.4] \quad 0 \leq p_i < 1$$

La ponderación individual de cada factor se encuentra entre 0 y 1, y:

$$[2.5] \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1$$

La suma de todas las ponderaciones da como resultado 1.

Factor	Orden	Ranking	Ponderación
		$1/r_j$	$\frac{1/r_j}{\sum 1/r_j}$
Temperatura mínima mes más frío	1	1,00	0,19
Horas frío anuales	1	1,00	0,19
Suelos	1	1,00	0,19

Cuadro 2.3: Valores de ponderación obtenidos por ranking recíproco para los factores involucrados en la obtención del mapa final de aptitud. Datos generados a partir de encuesta a profesionales referentes en la temática.

Factor	Orden	Ranking	Ponderación
		$\frac{1}{r_j}$	$\frac{1/r_j}{\sum 1/r_j}$
Disponibilidad de agua para riego	1	1,00	0,19
Precipitaciones anuales	3	0,33	0,06
Temperatura máxima mes más cálido	2	0,50	0,09
Altura sobre el nivel del mar	2	0,50	0,09
Suma		5,33	1,00

Cuadro 2.3: continuación.

Factor	Orden	Ranking	Ponderación
		$\frac{1}{r_j}$	$\frac{1/r_j}{\sum 1/r_j}$
Distancia a zonas candidatas	2	0,50	0,27
Distancia a puerto	3	0,33	0,18
Distancia a rutas	1	1,00	0,55
Suma		1,83	1,00

Cuadro 2.4: Valores de ponderación obtenidos por ranking recíproco para los factores involucrados en el mapa de distribución óptima de plantas de procesamiento. Datos generados a partir de encuesta a profesionales referentes en la temática.

2.4. Combinación lineal ponderada

Como último paso para la obtención del mapa de aptitud para la producción de nuez pecán en la provincia de Catamarca, y luego para la obtención del mapa de distribución óptima de plantas de procesamiento, se aplicó la metodología WLC para la combinación de todos los factores.

2.4.1. Mapa de aptitud para la producción de pecán

En el caso del mapa de aptitud para la producción de pecán, se aplicaron también las restricciones territoriales para delimitar las áreas aptas de las no aptas (cuadro 2.5).

Factores	Restricciones
Temperatura máxima mes más cálido	Ley de Bosques n°5311
Temperatura mínima mes más frío	Parques y reservas naturales
Precipitaciones medias anuales	Centros poblados
Sumatoria de horas de frío	
Factores edáficos	
Altura sobre el nivel del mar	
Recursos hídricos subterráneos y superficiales	

Cuadro 2.5: factores y restricciones involucradas en la determinación de aptitud para producir pecán en Catamarca.

La fórmula que se aplicó para la WLC es la siguiente:

[2.6]

$$Ii = \sum_{i=1}^n x_i p_i \Pi r_j$$

Donde Ii es el valor índice de aptitud para la localización i , \sum es la sumatoria de los resultados brindados por la totalidad de las capas temáticas, p es la ponderación de cada factor (cuadro 3), x es el valor específico de cada clase de factor y Πr_j es la sumatoria de todos los mapas de restricciones.

Como último paso se realizó una reclasificación del mapa obtenido, en 5 rangos de aptitud de acuerdo a FAO (1976): muy apto, apto, moderadamente apto, marginalmente apto y no apto. Estas categorías se relacionan con el grado de rendimiento potencial que podría

alcanzar el cultivo, de manera tal que la categoría muy apto se relaciona con un 80 a 100 por ciento de rendimiento potencial (en función de las variables involucradas en el estudio). Así, se procedió a reclasificar el mapa, cuyos valores de aptitud van de 0 a 255, lo que se considera equivalente de 0 a 100% (cuadro 6).

Clase de aptitud	Índice	Rango de valores de aptitud fuzzy
Muy Apto	4	204-255
Apto	3	153-204
Moderadamente Apto	2	102-153
Marginalmente Apto	1	51-153
No apto	0	0-51

Cuadro 2.6: clases de aptitud asignadas al mapa final de aptitud. Fuente: adaptado de Trabichet (2020).

2.4.2. Mapa de distribución óptima de plantas de procesamiento

Para la obtención de este mapa se combinaron tres mapas de factores: la distancia a los puertos, la distancia a las rutas, y la distancia a las zonas candidatas. Este último factor fue elaborado utilizando como materia prima el mapa de aptitud obtenido con anterioridad (como se describe en el apartado 6.8 de este apartado).

La fórmula que se aplicó en este caso es la siguiente:

[2.7]

$$Ii = \sum_{i=1}^n x_i p_i$$

Donde Ii es el valor índice de aptitud para la localización i , \sum es la sumatoria de los resultados brindados por la totalidad de las capas temáticas, p es la ponderación de cada factor (cuadro 2.4), y x es el valor específico de cada clase de factor.

Como paso final se realizó una reclasificación del mapa final en rangos, aplicando un criterio similar al presentado en el cuadro 2.6.

2.5. Esquemas de procedimientos

En esta sección se presentan, a modo de resumen de la metodología aplicada, los esquemas de procedimientos para la obtención del mapa de aptitud (figura 2.4) y del mapa de localización óptima de plantas de procesamiento (figura 2.5).



Figura 2.4: esquema del procedimiento utilizado para la obtención del mapa de aptitud para la producción de pecán en Catamarca.

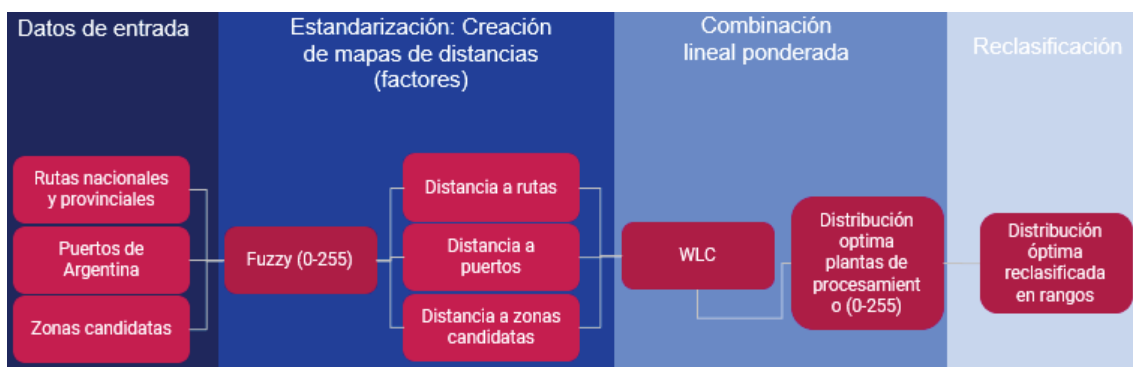


Figura 2.5: esquema del procedimiento utilizado para la obtención de mapa de localización óptima de plantas de procesamiento.

2.6. Metodología específica para el modelado cartográfico de cada variable

Como se mencionó anteriormente, puesto que las variables involucradas en este estudio presentaron fuentes de datos con diferentes formatos, resultó necesario describir la

metodología específica aplicada en cada caso previo a la etapa de estandarización fuzzy o booleana, según corresponda. A continuación, se presenta la secuencia de pasos realizados para obtener los mapas de factores o restricciones para cada una de las variables.

2.6.1. Factores climáticos

Se modelaron los mapas de los factores horas de frío anuales (HF), temperatura máxima media del mes más cálido (Tmax), temperatura mínima media del mes más frío (Tmin) y precipitaciones medias anuales (Pp).

Como se mencionó en la sección 2.2.1 de este apartado, para el modelado cartográfico de los factores de las variables climáticas, se trabajó con datos provenientes del modelo WorldClim 2.1 (www.worldclim.org) (Fick & Hijmans, 2017). Se utilizaron las variables BIO5, BIO6 y BIO12 que corresponden a la temperatura máxima media del mes más cálido, la temperatura mínima media del mes más frío y las precipitaciones medias anuales, respectivamente; también se trabajó con la capa de temperaturas mínimas medias mensuales. Todas estas capas corresponden a los promedios históricos para el periodo 1970-2000 y cuentan con una resolución espacial de 30 segundos (0,93 km x 0,93 km en el Ecuador) y un sistema de referencia WGS84: EPSG2346. Los datos de temperaturas se presentan en grados Celsius (°C) y las precipitaciones anuales en milímetros (mm).

También, para la estimación de horas frío se utilizaron las series históricas de datos climáticos obtenidos por consulta directa con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y series históricas obtenidas por consulta online del Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica de INTA (<http://siga.inta.gob.ar/#/>). Se analizaron series de datos provenientes de 12 estaciones meteorológicas distribuidas en el NOA (Catamarca, Salta y Tucumán) y se realizó una preselección de aquellas que contaron con series de datos completas y coincidentes en cuanto al periodo. Se trabajó con las estaciones Tinogasta (SMN), San Fernando del Valle de Catamarca (SMN), Sumalao (INTA) y Famaillá (INTA). El periodo en el cual las 4 estaciones coincidieron en cuanto a disponibilidad de datos completos resultó ser 2013-2018 (6 años, ver anexo Ia).

Asimismo, se utilizó el modelo digital de elevación ASTERDEM, para la mejora de resolución espacial de las capas de WorldClim empleadas en el modelado de las variables Tmax y Tmin, y para la predicción de horas frío con datos de estaciones meteorológicas.

Para el caso de la variable periodo libre de heladas, dado que no se contó con registros meteorológicos suficientes y adecuados para su estimación, no fue posible el modelado cartográfico del mapa de este factor. No obstante, se realizó una caracterización del periodo libre de heladas para el área de estudio en función de lo presentado por Fernández-Long et al. (2016), en su artículo referido a la información agroclimática de las heladas en Argentina. Dicha caracterización se presenta en el Anexo Ic.

2.6.1.1. Procesamiento de los datos

El primer paso del procesamiento de los datos fue el recorte de las capas de WorldClim al área de estudio; para ello se empleó como máscara de recorte la capa Provincia de Catamarca adaptada de la capa Provincias de la infraestructura de datos espaciales del IGN (IGN, 2018). Luego, los procedimientos llevados a cabo para el modelado de cada factor climático en particular se describen a continuación.

2.6.1.2. Modelado de las horas frío anuales

En este trabajo, el método de estimación de HF se seleccionó en base a la disponibilidad de datos climáticos históricos (WorldClim y estaciones meteorológicas). Existen diversos métodos para la cuantificación de las horas frío acumuladas en un lugar o zona determinada, algunos son directos y suman la cantidad de horas de frío por debajo de una temperatura base ($< 7,2^{\circ}\text{C}$), y otros son indirectos y estiman las horas de frío aplicando modelos matemáticos y fórmulas (Cervantes-Herrera et al., 2005). Dentro de los métodos indirectos, algunos realizan la predicción en base a las temperaturas máximas y mínimas diarias de los meses más fríos, como el método de Crossa-Reynaud (Cervantes-Herrera et al., 2005), mientras que otros basan la estimación en las temperaturas mínimas medias mensuales, como es el ejemplo del método de Damario et al. (1998).

El método propuesto por Damario et al. (1998), consta de una fórmula exponencial de segundo grado que utiliza el promedio climático de las temperaturas mínimas medias de los 5 meses más fríos (T_5), considerado como período de receso invernal, y la temperatura mínima media anual (T_{12}). Este es un método simplificado, y ha sido aplicado por Pascale et al. (2001) para estimar el frío invernal en las provincias del noroeste argentino, para el período 1961-1990.

El cálculo se realiza aplicando la fórmula 2.8, y cuando los valores obtenidos superan las 2000 horas frío anuales se aplica la fórmula 2.9.

[2.8]

$$HF(1000) = 3929.918 - 54.863 * T5 - 372.3126 * T12 + 1.8589 * (T5 * T12) + 0.2438 * (T5)^2 + 9.38 * (T12)^2$$

[2.9]

$$HF(2000) = 3954.044 - 130.7831 * T5 - 511.3522 * T12 - 21.9695 * (T5 * T12) + 5.9973 * (T5)^2 + 24.2979 * (T12)^2$$

Este método se aplicó por separado para ambas fuentes de datos con la finalidad de comparar los resultados obtenidos, y ampliar el periodo de análisis.

2.6.1.2.1. Estimación de HF con datos del Modelo WorldClim

Se tomaron las capas de temperaturas mínimas medias mensuales de WorldClim, y se aplicó la fórmula de Damario et al. (1998) utilizando la calculadora ráster del software QGIS, tomando el promedio de las capas de temperaturas mínimas para los 5 meses del periodo de receso, y las temperaturas mínimas medias de los 12 meses del año.

2.6.1.2.2. Estimación de HF con datos de estaciones meteorológicas

Se aplicó la fórmula de Damario et al. (1998) para determinar las horas de frío anuales para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Luego, con la finalidad de simular las horas de frío para otras localidades de la provincia de Catamarca, se elaboró un modelo de regresión lineal simple entre la altitud de cada estación meteorológica y las horas frío (Cervantes-Herrera et al., 2005) utilizando R Studio (ver anexo Ib). Este modelo se ingresó en la calculadora ráster de QGIS y se lo aplicó utilizando el ASTERDEM para predecir los valores de horas de frío para toda el área de estudio.

2.6.1.2.3. Promedio de HF obtenidas en ambos métodos

Como último paso se realizó en RStudio un test de comparación de muestras independientes para determinar si las HF determinadas utilizando ambas fuentes de datos

difieren estadísticamente (anexo Ib). Para ello se extrajeron los valores de HF en ambos mapas, utilizando la ubicación de las estaciones meteorológicas (anexo Ib). Paso siguiente, se realizó un promedio de las HF estimadas con ambos métodos para obtener el mapa final de HF, que resume los datos proporcionados por ambas fuentes de datos.

2.6.1.3. Mejora de la resolución espacial de las capas Tmin, Tmax y Pp

Se realizó una mejora de la escala de las variables BIO5 (Tmax), BIO6 (Tmin) y BIO12 (Pp), para llevarlas a una resolución de 30 m. En el caso de las dos primeras, se aplicó la técnica de Downscaling, con el módulo Ráster Downscaling de la caja de herramientas de SAGA, dentro del software QGIS. Se utilizó el ASTERDEM como predictor, siendo las capas de temperaturas las variables dependientes. En el caso de la variable BIO12 se utilizó la calculadora ráster para modificar el número de columnas y filas de la capa ráster.

De este modo, los rústers finales pasaron de un tamaño de pixel de 1 km² a uno de 900 m².

2.6.1.4. Estandarización fuzzy

Se realizó una estandarización por lógica fuzzy de todas las capas de las variables climáticas obtenidas en los pasos anteriores utilizando el módulo FUZZY del Software Idrisi SELVA, aplicando función sigmoidea simétrica. Los puntos de inflexión (cuadro 2.7) se definieron en función de los requerimientos de la especie indicados en la sección 2.2 de este apartado.

Punto de inflexión	Tmax	Tmin	Pp	HF
<i>a</i>	18,3	0,6	760	200
<i>b</i>	23,9	7	1000	300
<i>c</i>	27	7	1300	600
<i>d</i>	41	10	2010	1000

Cuadro 2.7 puntos de inflexión para la estandarización fuzzy de las variables climáticas.

2.6.2. Factores edáficos

Para el modelado cartográfico de los factores edáficos se trabajó con la tabla de atributos de la capa vectorial de Suelos de la Argentina 1:500.000 del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2011). Esta capa presenta geometría de polígonos, sistema de proyección EPSG: 4326-WGS84, y cuenta con las unidades cartográficas de suelos descriptas por INTA.

2.6.2.1. Procesamiento de los datos

La capa fue recortada al área de estudio utilizando como máscara de corte el polígono Provincia de Catamarca, obtenido de la IDE (Infraestructura de Datos Espaciales) del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2018). La capa contó con 587 objetos espaciales (polígonos) correspondientes a las unidades cartográficas de suelos y un total de 32 campos (columnas) correspondientes a las diferentes variables edáficas asociadas.

Del total de campos de la base de datos se seleccionaron las variables definidas previamente como requerimientos edáficos para la producción de pecán en la sección 1 de este apartado, así como también los campos que describen las limitaciones principales, secundarias y terciarias, y la posición en el paisaje; estos últimos parámetros fueron utilizados posteriormente como información auxiliar para definir la aptitud de cada variable para cada unidad cartográfica.

Como último paso se generaron 6 capas vectoriales (polígono), correspondientes a cada uno de los criterios edáficos seleccionados para este estudio. Cada capa contó con los siguientes campos: ID (número de identificación de la unidad), unidad cartográfica, limitaciones primarias, limitaciones secundarias, limitaciones terciarias, posición en el paisaje, y criterios. De esta forma quedaron conformadas las 6 capas temáticas vectoriales (polígono): Salinidad, Textura, Drenaje, Anegamiento, Profundidad, Rocosidad.

2.6.2.2. Asignación de índices de aptitud a las unidades cartográficas

Se evaluaron y clasificaron las unidades espaciales de acuerdo a los grados de limitaciones que presentan en función de los requerimientos del nogal pecán descriptos en la sección 2.2 de este apartado. Los grados de limitaciones se correspondieron con

reducciones en los rendimientos potenciales de acuerdo a la metodología FAO (1976) (cuadro 2.8).

Índice de aptitud	Categoría de Aptitud	Rendimiento esperado (%)
4	Muy apto	80-100
3	Apto	60-80
2	Moderadamente apto	40-60
1	Marginalmente apto	20-40
0	No apto	0-20

Cuadro 2.8: Categorías de aptitud para el nogal pecán de acuerdo al esquema FAO (1976).

Fuente: adaptado de Salvatore et al. (2019).

Para la asignación de los índices de aptitud, en las tablas de atributos de las capas correspondientes a cada una de las variables, se generó un campo que se completó con la categoría asignada, de acuerdo a los criterios que se describen a continuación para cada variable.

2.6.2.2.1. Criterio Profundidad

La variable profundidad presentó en la tabla de atributos valores comprendidos entre 0 y 120 cm. Se clasificaron las unidades cartográficas de acuerdo al cuadro 2.9.

Índice de aptitud	Categoría de Aptitud	Profundidad (cm)
4	Muy apto	≥ 100
3	Apto	80-100
2	Moderadamente apto	60-80
1	Marginalmente apto	$> 0-60$
0	No apto	0

Cuadro 2.9: asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio profundidad.

2.6.2.2.2. Criterio Textura

Los criterios empleados para la clasificación de las distintas unidades se definieron teniendo en cuenta los valores de Índice de Productividad (IP) estimados por Morales-Poclava et al. (2015) para distintas clases texturales de suelos del Noroeste Argentino (cuadro 2.10).

Índice de aptitud	Categoría de Aptitud	Textura
4	Muy apto	franca
3	Apto	Franco-arenosa, franco arcillosa y franco arcillo limosa
2	Moderadamente apto	arcillosa
1	Marginalmente apto	Arenoso-franca, arenosa
0	No apto	areno-gravillosa, areno-gravosa, areno-gravillosa, arenoso gruesa, no determinada

Cuadro 2.10: asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio textura.

La textura sub-superficial es un parámetro que considera a la composición granulométrica del horizonte sub-superficial y tiene influencia en la capacidad de retención de humedad del suelo y el crecimiento radicular. En relación a esto, la única clase textural que se consideró como Muy apta fue la clase franca. Luego, considerando que las clases franco arcillo-limosa, franco-arenosa y franco-arcillosa por sus porcentajes de arcilla y limo podrían presentar problemas para la exploración radicular (Madero et al., 2016), se las clasificó como Aptas. La clase arcillosa se clasificó como moderadamente apta debido a su textura fina, que podría presentar problemas para la exploración radicular. Por otro lado, dado que las clases arenosa y arenoso-franca presentan buena textura para exploración radicular pero baja retención hídrica, esto podría generar problemas por drenaje excesivo (Madero et al., 2016), motivo por el cual se las clasificó como Marginalmente aptas. Finalmente, se clasificaron como No aptas las clases areno-gravillosa, areno-gravosa, areno-gravillosa, arenoso gruesa, debido a su muy baja retención hídrica.

2.6.2.2.3. Criterio Drenaje

Para la asignación de valores de aptitud, en este caso, se tuvieron en cuenta además como datos auxiliares las limitantes primarias, secundarias y terciarias de cada unidad cartográfica (cuadro 2.11).

Índice de aptitud	Categoría de Aptitud	Drenaje
4	Muy apto	Bien drenadas sin limitaciones
3	Apto	Bien drenado asociado a drenaje deficiente asociado a limitante terciaria, drenaje moderado.
2	Moderadamente apto	Drenaje algo excesivo asociado a baja retención de humedad como limitante secundaria
1	Marginalmente apto	Drenaje imperfecto, drenaje excesivo, drenaje algo excesivo asociado a baja retención de humedad como limitante primaria
0	No apto	Drenaje deficiente como limitante primaria, afloramientos rocosos, drenaje excesivo, lagunas, salinas

Cuadro 2.11: asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio drenaje.

Este criterio se clasificó asignando los rangos más bajos de aptitud a las unidades con drenaje excesivo y baja retención de humedad. La clasificación de las áreas no aptas y marginalmente aptas principalmente se relacionó con la existencia de pendientes pronunciadas que se dan en las laderas empinadas con drenaje excesivo por alta velocidad de escurrimiento. También se dio, en el caso de las áreas marginalmente aptas, que los suelos presentaron drenaje excesivo y baja retención de humedad por la textura gruesa.

Las áreas muy aptas fueron aquellas que presentaron drenaje bueno y ningún tipo de limitación y correspondieron a unidades con pendientes bajas a moderadas, planicies y conos de deyección con bajo riesgo de erosión hídrica (Panigatti, 2010).

La categoría No apto incluyó suelos con drenaje deficiente y escasa permeabilidad, y a aquellas unidades que corresponden a afloramientos rocosos, salinas y lagunas.

2.6.2.2.4. Criterio Rocosisdad

Se tuvieron en cuenta las descripciones de las unidades cartográficas del Atlas de Suelos de la República Argentina (Panigatti, 2010; SAGyP-INTA, 1990) y las limitaciones primarias, secundarias y terciarias de la capa Suelos de Catamarca. Se analizó la presencia de rocas en los perfiles de suelos que componen cada unidad (una unidad cartográfica en general está compuesta por complejos de suelos, ver anexos IIa y IIb) tomando como referencia también las descripciones de los epipedones y horizontes diagnósticos de la Clave para Taxonomía de Suelos de USDA (USDA, 2014). Se propuso entonces la clasificación presentada en el cuadro 2.12 (en anexo IIc se amplían los criterios aplicados para la clasificación).

Índice de aptitud	Categoría de Aptitud	Rocosisdad
4	Muy apto	Unidades sin limitantes de rocosidad, ni clasificación “interfiere en labranza”, sin pedregosidad en las descripciones de suelos
3	Apto	Unidades con menos de 35% de rocosidad en el perfil según descripción de suelos
2	Moderadamente apto	Unidades que por las características de sus suelos presentan baja pedregosidad pero están clasificados como “interfiere labranza”

Cuadro 2.12: asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para la variable rocosidad.

Índice de aptitud	Categoría de Aptitud	Rocosidad
1	Marginalmente apto	Unidades que según la descripción de suelos presentan abundante pedregosidad y que se clasifican como “interfiere labranza”
0	No apto	Unidades con “interfiere labranza” o que presentan rocosidad como limitantes, afloramientos rocosos, lagunas, salinas

Cuadro 2.12: continuación.

2.6.2.2.5. Criterio Salinidad

La variable salinidad se clasificó teniendo en cuenta los datos presentados en la columna alcalinidad, y los presentados como limitantes primarias, secundarias y terciarias. Teniendo en cuenta que según Herrera (1999) el pecán tiene un requerimiento de suelos no salinos a débilmente salinos se clasificaron las unidades cartográficas como se muestra en el cuadro 2.13:

Índice de aptitud	Categoría de Aptitud	Salinidad
4	Muy apto	No sódico. Sin limitantes.
3	Apto	Ninguna unidad cartográfica entro en esta clase
2	Moderadamente apto	Ninguna unidad cartográfica entro en esta clase
1	Marginalmente apto	Alcalinidad débil sin limitantes

Cuadro 2.13: asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio salinidad

Índice de aptitud	Categoría de Aptitud	Salinidad
0	No apto	Alcalinidad débil, salinidad y/o alcalinidad en primeros 50 cm como limitantes. Alcalinidad fuerte. Alcalinidad moderada, salinidad y/o alcalinidad en primeros 50 cm como limitantes. Alcalinidad muy fuerte, salinidad y/o alcalinidad en primeros 50 cm como limitantes. No sódico y salinidad y/o alcalinidad en primeros 50 cm como limitantes. Poca alcalinidad, salinidad y/o alcalinidad en primeros 50 cm como limitantes.

Cuadro 2.13: continuación.

2.6.2.2.6. Criterio Anegamiento

La columna anegamiento de la capa Suelos de Catamarca no contó con datos referidos a esta variable, por lo cual se realizó una clasificación de las unidades cartográficas teniendo en cuenta la posición en el paisaje de cada una, a considerar: sector medio, apical, o superior de cono; llanuras y llanuras extendidas, planicies arenosas, explanadas, lomas, laderas escarpadas, laderas empinadas y pendientes escarpadas; planicies, vías de escurrimiento, bajos, planos inundables, planicies inundables, y planos aluviales. En el cuadro 2.14 se presenta la asignación de aptitud para la variable anegamiento:

Índice de aptitud	Categoría de Aptitud	Anegamiento
4	Muy apto	sector medio, apical, o superior de cono, llanuras y llanuras extendidas, planicies arenosas, explanadas, lomas, laderas escarpadas, laderas empinadas y pendientes escarpadas
3	Apto	planicies
2	Moderadamente apto	vías de escurrimientos
1	Marginalmente apto	bajos, planos inundables y planicies inundables
0	No apto	planos aluviales, afloramientos rocosos, lagunas y salinas

Cuadro 2.14: asignación de aptitud para los suelos de la provincia de Catamarca para el cultivo de nuez pecán para el criterio anegamiento.

2.6.2.3. Estandarización por Puntaje Omega y cálculo de PCE

Con la finalidad de sintetizar las 6 variables seleccionadas del recurso suelo y obtener un único mapa de factores edáficos, se procedió a realizar una estandarización por Puntaje de Clasificación Espacial Omega aplicando las fórmulas [2.1] y [2.2] del apartado 2.2.2.3. Esto se realizó utilizando el módulo IMAGE CALCULATOR de Idrisi SELVA.

De este modo se generó un mapa síntesis que representa las 6 variables edáficas, donde la peor situación corresponde a 0, y la mejor situación es 100.

2.6.2.4. Rasterizado

La capa síntesis obtenida en el paso anterior fue transformada del formato vectorial al ráster, utilizando el algoritmo RASTERVECTOR del software Idrisi SELVA, asignándole las características espaciales de 30 metros de tamaño de pixel, 21.601 filas y 21.601 columnas.

2.6.2.5. Estandarización fuzzy

El último paso del modelo cartográfico del mapa de factores edáficos consistió en realizar una estandarización fuzzy de la capa aplicando función lineal creciente, descrita en la sección 2.2.2.1 de este apartado. Los puntos de inflexión que se aplicaron fueron: $a=0$, y b , c , y $d=100$; es decir que las locaciones que presentaron $PCE=0$ se les asignó el valor 0 de aptitud, y a las que presentaron $PCE=100$, se les asignó valor de aptitud 255. De esta manera la capa quedó estandarizada en valores que van de 0 a 255 (de menor a mayor aptitud locacional).

2.6.3. Factor altura

Para el modelado cartográfico de este factor, se utilizó como fuente de datos el modelo digital de elevación ASTERDEM. Este modelo, es una capa ráster con resolución espacial de 30 metros, y presenta los valores de altura sobre el nivel del mar medidos en metros.

2.6.3.1. Procesamiento de datos

El primer paso del procesamiento de los datos fue la confección de un mosaico con un total de 12 rásters descargados para cubrir el territorio provincial, utilizando el software Idrisi SELVA. Paso siguiente se recortó el mosaico generado según los límites provinciales para obtener el DEM del área de estudio.

2.6.3.2. Estandarización fuzzy

Para obtener el mapa del factor altura, se realizó una estandarización fuzzy del modelo digital de elevación, aplicando función lineal decreciente. Los puntos de inflexión se determinaron de acuerdo a los valores óptimos máximos indicados en la descripción de los requerimientos de la especie, y fueron: 914 m para a , b y c ; 1326 m para d .

2.6.4. Factor disponibilidad de recursos hídricos

En esta sección se describen los pasos para el modelado cartográfico de las capas de los recursos hídricos subterráneos y superficiales disponibles en la provincia de Catamarca.

Para delimitar las áreas de riego de la provincia de Catamarca se tuvo en cuenta la información descrita en el anexo IIIa, en donde se presentan los detalles de la

disponibilidad de recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, y las principales áreas productivas bajo riego de la provincia, para cada una de las cuencas hidrográficas de la provincia.

Como mapa guía se utilizó la capa Cuencas Hidrográficas obtenida de la infraestructura de datos espaciales de Catamarca (IDECAT, 2021) en formato WFS (servicio de vector en web). Se realizó una digitalización en formato vectorial (polígono) de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos sectorizando por cuenca hidrográfica. La metodología utilizada para realizar la digitalización fue diferente según se trató de recursos superficiales o subterráneos, y se describen a continuación.

Las cuencas hidrográficas Puna, Pre Puna, y Sistema de Laguna Verde no se tuvieron en cuenta para el modelado, ya que no cuentan con recursos hídricos disponibles (Paoli, 2003).

2.6.4.1. Recursos hídricos superficiales (ríos y cursos de agua)

Para el modelado de la capa recursos hídricos superficiales se realizó una interpretación visual de un mosaico de imágenes satelitales con composición falso color compuesto. Se utilizó como complemento, a modo de control de terreno, la capa Google Hybrid la cual ofrece una resolución espacial mayor para la identificación de las distintas cubiertas.

Las imágenes satelitales se obtuvieron de la misión Landsat 8, sensor OLI (Operation Land Imager), colección 2 Nivel 2 Science Product (L2SP) T1; estos productos cuentan con corrección geométrica, radiométrica y atmosférica (tope de atmósfera) y resolución espacial de 30 m.

El rango temporal de búsqueda fue del 23 de enero al 19 de febrero de 2019, período en el cual se encontró la mayor disponibilidad de imágenes con cobertura de nubes inferior a 10%. Se seleccionaron para descarga únicamente las bandas 4 (Rojo, ancho de banda 0,63-0,68 μm), 5 (Infrarrojo cercano, ancho de banda 0,845-0,885 μm) y 6 (Infrarrojo medio de onda corta, ancho de banda 0,1560-0,1660 μm) (cuadro 2.15), las cuales permiten la detección y distinción de cubiertas vegetales respecto de otro tipo de cubiertas.

	Columna	Fila	Fecha
Imágenes	230	079	19/02/2019
descargadas.	230	080	19/02/2019
Bandas 4, 5 y 6.	230	081	19/02/2019
	231	078	25/01/2019
	231	079	25/01/2019
	231	080	25/01/2019
	232	077	17/02/2019
	232	078	17/02/2019
	232	079	17/02/2019
	232	080	17/02/2019
	233	077	23/01/2019
	233	078	23/01/2019
	233	079	23/01/2019

Cuadro 2.15: productos Landsat 8 OLI descargados para la elaboración de un mosaico con composición falso color compuesto de la provincia de Catamarca.

2.6.4.1.1. Procesamiento de las imágenes

Utilizando el software ArcGis 10.3 se confeccionó un mosaico que cubre por completo el territorio de la provincia de Catamarca. Paso siguiente se procedió a hacer un realce de contrastes y una composición de bandas en falso color compuesto RGB: 564, donde a la banda 4 (rojo) se le aplicó un filtro color azul, a la banda 5 (infrarrojo cercano) un filtro color rojo y a la banda 6 (infrarrojo medio de onda corta) se le asignó un filtro color verde. Esta composición de color es útil para distinguir cubiertas correspondientes a la producción de cultivos tanto intensivos como extensivos y diferenciar entre ellos.

Luego se recortó el mosaico utilizando como máscara la capa vectorial Provincia de Catamarca (polígono) adaptada de la capa Provincias obtenida de IGN (2018).

2.6.4.1.2. Digitalización de la capa recursos hídricos superficiales

Utilizando la imagen de Google Hybrid como control de terreno se realizó una interpretación visual del mosaico provincial con composición color para identificar y digitalizar las áreas donde existen establecimientos productivos que utilizan riego superficial. También se tuvieron en cuenta las descripciones de los distritos de riego

realizadas en el anexo IIIa para definir la distribución espacial de las principales zonas con riego en base a recursos hídricos superficiales para cada una de las cuencas de la provincia, utilizando como mapa de referencia la capa Cuencas Hidrográficas (IDECAT, 2021) y la capa Ríos de Catamarca (IDECAT, 2021).

Visualización	Criterio
	<p>Asociación: las áreas con desarrollos productivos se asocian a la presencia de cursos de agua superficiales, por lo cual se los puede encontrar acompañando los trayectos de los principales ríos de cada cuenca hidrográfica.</p>
	<p>Forma: las zonas de producción presentan en general formas regulares, pero en caso de encontrarse delimitadas por algún curso de agua o por la presencia de pedregosidad pueden presentar formas irregulares. En el caso particular de los sistemas de riego por pivot central se observan formas circulares.</p>
	<p>Color: las áreas con actividades productivas con cultivos presentan colores rojos, amarillos, naranjas, y verdes-cyan (cuando la cobertura del suelo es baja).</p>
	<p>Textura y sombras: permiten diferenciar las zonas montañosas de las áreas de los valles y llanos, ya que estas últimas presentan textura lisa; por el contrario, las zonas montañosas presentan textura rugosa.</p>
	<p>Diseño: las áreas con lotes productivos presentan en general diseños en parcelas rectangulares de distintos tamaños. Existen algunos casos particulares, como el de Colonia Nueva Coneta, en la cual los lotes tienen un diseño geométrico en parcelas muy marcado debido a la canalización para la conducción del agua para riego.</p>

Cuadro 2.16: descripción de los criterios de interpretación visual empleados para la digitalización de los recursos hídricos superficiales.

En base a la interpretación visual se determinó la presencia de áreas productivas en las cercanías de los principales recursos hídricos superficiales de cada cuenca, y se digitalizaron polígonos delimitando las áreas donde existe presencia de actividades productivas, utilizando el software QGIS. Los criterios de interpretación visual empleados para identificar dichas áreas se detallan en el cuadro 2.16.

2.6.4.1.3. Clasificación de los polígonos digitalizados

Se realizó una clasificación cualitativa de los polígonos digitalizados de acuerdo a las características de los recursos hídricos disponibles en cada cuenca (anexo IIIa). De esta forma se clasificaron en recursos permanentes, recursos no permanentes (ríos de régimen estacionario muy marcado y que no se acumulan en diques para su aprovechamiento y distribución), recursos con obras de riego deterioradas, recursos hídricos de carácter salino/sódico, y finalmente recursos no disponibles. Cada clase fue identificada por un índice numérico (cuadro 2.17).

Clase	Índice numérico
Recursos Permanentes	10
Recursos no permanentes	9
Recursos salinos y/o sódicos	8
Recursos con obras de riego deterioradas	7
Recursos no disponibles	6

Cuadro 2.17: asignación de índices a las clases de recursos hídricos superficiales digitalizadas.

2.6.4.2. Recursos hídricos subterráneos

La digitalización de los recursos subterráneos disponibles para riego se realizó en base a la información recopilada y descrita en el anexo IIIa. Se definió la distribución espacial de las zonas con disponibilidad de recursos hídricos subterráneos para cada una de las cuencas por separado:

- Cuenca del río Abaucán: se tuvo en cuenta la descripción y el mapa de los recursos hídricos subterráneos de Torres et al. (2013), quienes realizaron un inventario de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca para su caracterización

hidrogeológica e identificación preliminar de las áreas más favorecidas en cantidad y calidad.

- Cuenca Salar de Pipanaco: se tomó en cuenta el modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca elaborado por Tálamo et al. (2016), la información acerca de la calidad del agua subterránea determinada por Fernández-Turiel et al. (2008), y el mapa de áreas de mayor desarrollo del relleno cuaternario presentado en el informe del estudio hidrogeológico de la cuenca del Salar de Pipanaco (Bucich et al., 2011).
- Cuenca Santa María: se emplearon como base los mapas de los recursos hídricos subterráneos modelados por Ruiz & Tineo (2014).
- Cuenca Valle Central: se tuvo en cuenta la descripción de los recursos hídricos subterráneos realizada por Vigo (2010) y por Bucich et al. (2008); también se utilizó como base el mapa geológico de la provincia de Catamarca obtenido de la infraestructura de datos espaciales de Catamarca (IDECAT, 2023), y el mapa de límites del basamento cristalino presentado en Denim (2013).
- Cuenca Santa Rosa: se empleó el mapa de isopiezas y la descripción de los recursos hídricos subterráneos publicado en Battistella et al. (2016); también se tuvo en cuenta el mapa de aptitud para la explotación de los recursos presentado en Torres et al. (2015), y la descripción de los recursos hídricos realizada por Segura et al. (2019).
- Cuenca Falda Oriental del Ancasti: se utilizaron como base los mapas isopáquico del relleno cuaternario, isoconductividad del agua subterránea y áreas potenciales para la explotación de agua subterránea, elaborados por Bucich et al. (2011). También se tuvieron en cuenta las descripciones presentadas en Segura et al. (2019).

Los mapas disponibles en la bibliografía fueron extraídos e ingresados en QGIS para ser georreferenciados previo al paso de digitalización de polígonos.

2.6.4.2.1. Digitalización de polígonos

Se creó la capa recursos hídricos subterráneos a través de la digitalización de polígonos, delimitando los acuíferos disponibles en cada cuenca de acuerdo a la bibliografía consultada, cuyos extractos se presentan en el anexo IIIa.

2.6.4.2.2. Clasificación de los polígonos digitalizados

A las zonas delimitadas por los polígonos con recursos subterráneos disponibles se les asignó un índice con valor 2, mientras que a las zonas por fuera de estos se le asignó un valor de 1.

2.6.4.3. Rasterización de las capas

Se rasterizaron las capas recursos hídricos subterráneos y recursos hídricos superficiales utilizando el algoritmo RASTERVECTOR del software Idrisi SELVA, asignándole las características espaciales de 30 metros de tamaño de pixel, 21601 filas y 21601 columnas.

2.6.4.4. Obtención de capa recursos hídricos totales

Para la obtención de una única capa ráster de recursos hídricos se realizó una superposición de las capas ráster recursos hídricos subterráneos y recursos hídricos superficiales obtenidas anteriormente. Para ello se aplicó el algoritmo OVERLAY (multiplicación) del software Idrisi SELVA. De este modo se generó una capa ráster síntesis en la cual el resultado numérico para las locaciones correspondió al producto entre ambas capas.

Recursos subterráneos	Recursos superficiales	Resultado numérico	Índice	Clase de aptitud
Disponibles	Permanente	20	4	Muy Apto
	No permanente	18	4	Muy Apto
	Salino/sódico	16	2	Moderadamente apto
	Obras deterioradas	14	3	Apto
	No	12	2	Moderadamente apto

Cuadro 2.18: reclasificación de los resultados numéricos de la capa recursos hídricos totales y asignación de clases de aptitud de los recursos hídricos totales.

Recursos subterráneos	Recursos superficiales	Resultado numérico	Índice	Clase de aptitud
No disponibles	Permanente	10	3	Apto
	No permanente	9	1	Marginalmente apto
	Salino/sódico	8	0	No apto
	Obras deterioradas	7	2	Moderadamente apto
	No	6	0	No apto

Cuadro 2.18: continuación.

2.6.4.5. Estandarización fuzzy

Se aplicó estandarización por lógica difusa mediante función lineal creciente, utilizando como puntos de inflexión $a=0$, y b, c y $d=4$; a las locaciones que presentaron índice 0, se les asignó el valor 0 de aptitud, y a las que presentaron índice 4 se les asignó valor de aptitud 255.

2.6.5. Restricciones territoriales

Se modelaron tres capas de restricciones territoriales: centros poblados, ley de bosques y áreas protegidas. Las fuentes de datos utilizadas en cada caso se detallan en la sección 2 de este apartado.

2.6.5.1. Procesamiento de los datos

Para la generación de la capa de Centros poblados se trabajó con la capa vectorial radios censales (INDEC, 2015). Utilizando el software QGIS y empleando como capa control la imagen satelital de Google Earth Hybrid se cotejó la correspondencia espacial de los polígonos de los radios censales con los centros poblados en la imagen satelital. En aquellos casos en que los polígonos estuvieron desplazados se los corrigió geoméricamente, y en aquellos casos de polígonos faltantes estos se digitalizaron.

Posteriormente se realizó una clasificación de los polígonos de la capa de acuerdo a la densidad poblacional diferenciando zonas rurales de zonas urbanizadas, considerando que

los radios censales determinados por INDEC corresponden a áreas que incluyen 300 viviendas. Por ello, los polígonos correspondientes a los ejidos urbanos presentan áreas más pequeñas que los polígonos de zonas rurales, debido a la disminución de la densidad poblacional. Esto fue de utilidad en una primera instancia para identificar y diferenciar centros urbanos de zonas rurales.

Para la obtención de la capa Áreas protegidas, se llevó a cabo la unión de las capas Sitios RAMSAR y Reserva de Biosfera Laguna Blanca utilizando QGIS.

La capa Ley de Bosques se recortó al área de estudio utilizando como máscara de corte la capa vectorial Provincia de Catamarca, adaptada de la capa Provincias obtenida de la IDE del IGN (2018).

2.6.5.2. Rasterización y estandarización booleana.

Las tres capas vectoriales (Centros poblados, Áreas protegidas y Ley de Bosques) fueron transformadas a formato ráster utilizando el algoritmo RASTERVECTOR del software Idrisi SELVA, asignándole las características espaciales de 30 metros de tamaño de pixel, 21601 filas y 21601 columnas.

Como paso final para obtener los mapas de restricciones territoriales, se aplicó estandarización booleana a las tres capas utilizando el algoritmo BOOLEAN del software Idrisi SELVA.

Para la capa Centros poblados, se establecieron como aptas solamente las unidades espaciales clasificadas como áreas rurales; el resto de las áreas urbanizadas se consideraron no aptas.

Para la estandarización de la capa Ley de bosques se consideró que las tres categorías de ordenamiento territorial de la ley 5311 (2010) quedarán excluidas de las áreas aptas para plantar nogal pecán.

Por último, todas las zonas consideradas áreas protegidas dentro de la provincia de Catamarca se clasificaron como no aptas para la producción de pecán; el resto del territorio provincial se consideró apto de acuerdo a estas restricciones.

2.6.5.3. Obtención de mapa de restricciones global

Para la síntesis de un único mapa de restricciones globales para aplicar en la combinación lineal ponderada (WLC), se realizó una superposición de los tres mapas de restricciones, utilizando el algoritmo OVERLAY de Idrisi SELVA.

2.6.6. Factores socio-económicos

En este apartado se describen los pasos que se siguieron para el modelado de los mapas de los factores distancia a zonas candidatas para la producción de pecán, distancia a rutas y distancia a puertos, utilizados para identificar los sitios de localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán.

2.6.6.1. Procesamiento de los datos

Como se detalló en la sección 2.2.1 de este apartado, para el modelado cartográfico de los factores distancia a zonas candidatas para la producción de pecán y distancia a puertos se utilizaron como fuentes de datos el mapa de aptitud de pecán obtenido por WLC (zonas candidatas) y la geolocalización del puerto de Zárate disponible en la página web del Ministerio de Transporte de la Nación (Ministerio de transporte, 2022). En el caso del factor distancia a rutas se utilizaron como fuentes las capas de rutas provinciales y nacionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2022).

La capa de zonas candidatas para la producción de pecán se generó a partir del mapa de aptitud obtenido por WLC, considerando como zonas posibles para producir pecán a todas aquellas que presentaron las tres categorías más altas de aptitud: moderadamente apto, apto y muy apto. Se reclasificaron las categorías del mapa de aptitud asignando valor 1 a las zonas aptas y muy aptas, y 0 a las demás; de esta forma se generó una capa ráster donde las zonas candidatas presentaron valor 1.

Con respecto a las capas de rutas nacionales y provinciales, se realizó una unión de las dos con la finalidad de obtener una única capa de rutas. Posteriormente, esta capa se corrigió geoméricamente, utilizando como capa de control terreno la capa de Google Hybrid en el software QGIS.

Paso siguiente las capas vectoriales de rutas y de puertos fueron rasterizadas utilizando el algoritmo RASTERVECTOR de Idrisi SELVA asignándoles las características espaciales de la capa zonas candidatas.

2.6.6.2. Generación de mapas de distancias

Aplicando el módulo DISTANCE de Idrisi SELVA se generaron tres mapas de distancias euclidianas: distancia a rutas, distancia a zonas candidatas, y distancia a puerto de Zárate. En estos, los valores de distancias se expresaron en kilómetros.

2.6.6.3. Estandarización fuzzy

Para la estandarización fuzzy de los mapas de distancias se aplicó función lineal decreciente.

En el caso de la distancia a rutas, la distancia máxima desde la planta procesadora hasta las vías de comunicación se estableció en un máximo de 2 km, de acuerdo a lo establecido en Babilonia-Ballesteros et al. (2019).

Por otro lado, para el caso de los mapas de distancia a zonas candidatas y distancia a puertos, la distancia máxima a la cual se puede trasladar la producción resultó ser de 4857 km y 4410 km, respectivamente. Estos valores se estimaron aplicando el modelo de Von Thünen (1966), el cual establece una relación entre la renta de ubicación por unidad de superficie de acuerdo a la siguiente fórmula (Engler et al., 2005):

$$[2.10] \quad U = r(p - c) - (r * t * d)$$

Donde la renta (U) es igual al rendimiento (r) multiplicado por el precio (p) menos el costo de producción (c), menos el producto entre el rendimiento, la tarifa de transporte (t) y la distancia (d).

La renta y los costos de producción por unidad de superficie de una plantación de pecán se obtuvieron de Grassi (2021), para una plantación de 19 años de edad, con marco de plantación de 10 x 10 m y un rendimiento de 2000 kg ha⁻¹(nuez con cáscara). Los costos de traslado por unidad de distancia se estimaron utilizando como referencia la tarifa espiga del mes de noviembre de 2022, publicado por la federación de transportadores argentinos (FeTrA, 2022).

En base a esta información se calculó la distancia máxima a la cual se puede trasladar la producción sin que los costos de traslado superen el 22% de los costos totales (valor de referencia extraído de los márgenes agropecuarios para la región NOA para la campaña 2021/2022 (Ministerio de Agricultura, 2021).

Los puntos de inflexión de la función fuzzy lineal decreciente quedaron establecidos de la siguiente forma, para cada una de las capas (cuadro 2.19).

Punto de inflexión	Distancia a rutas	Distancia a puertos	Distancia a zonas candidatas
<i>a,b,c</i>	0 km	0 km	0 km
<i>d</i>	2 km	4410 km	4857 km

Cuadro 2.19: puntos de inflexión aplicados en la función fuzzy para cada factor socioeconómico utilizado para la identificación de sitios de localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán en la provincia de Catamarca.

3. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos organizados en cuatro secciones. En la primera, se muestran los mapas de factores y restricciones modelados y utilizados para la determinación de la aptitud para producir nogal pecán en la provincia de Catamarca. En una segunda sección se presenta el mapa final de aptitud obtenido aplicando la técnica de combinación lineal ponderada (WLC). En la tercera, se presentan los mapas de factores modelados y empleados para obtener el mapa de localización óptima de plantas de procesamiento. Finalmente, en la cuarta sección, se encuentra el mapa de localización óptima de plantas de procesamiento obtenido por WLC.

3.1. Mapas de factores y restricciones involucrados en la obtención del mapa de aptitud para producir nogal pecán en la provincia de Catamarca

En esta sección se presentan los mapas de los factores y restricciones obtenidos por modelado cartográfico, aplicando la metodología detallada en las secciones 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3, 2.6.4, 2.6.5 y 2.6.6 del apartado 2 (Metodología).

3.1.1. Mapas de los factores climáticos

A continuación, se presentan los factores climáticos horas frío anuales (HF), temperatura máxima media del mes más cálido (Tmax), temperatura mínima media del mes más frío (Tmin) y precipitaciones medias anuales (Pp). Se muestran los mapas de cada variable expresados en las unidades de medida originales (°C, mm, HF, según corresponda), y los mapas de factores en escala de 0 a 255.

3.1.1.1. Horas frío anuales

En la figura 3.1a se observa la distribución espacial de las horas frío estimadas. La paleta de colores aplicada permite identificar las zonas con mayor acumulación de frío invernal con colores oscuros, y diferenciarlas de aquellos con menor acumulación, las cuales presentan colores más claros. La figura 3.1b, representa el mapa del factor HF, estandarizado por lógica fuzzy.

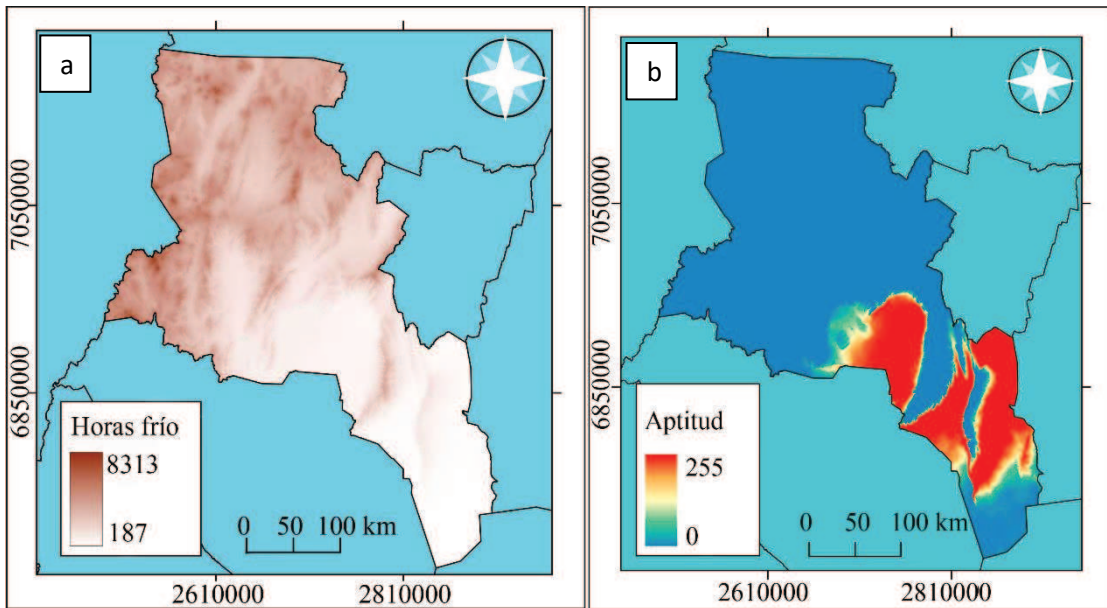


Figura 3.1: horas frío anuales estimadas por método Damario (1998), a partir de datos de estaciones meteorológicas y de WorldClim (a). Factor horas frío anuales (HF) estandarizado por lógica fuzzy (b).

Los mayores valores de aptitud para este factor se distribuyeron en la cuenca Salar de Pipanaco, en el Valle Central, y en el sector centro y norte de la región Este. En estos sectores los valores se mantuvieron entre las 200 y 1000 horas de frío anuales; por encima de 1000 y por debajo de 200 todas las locaciones resultaron con los valores más bajos de aptitud y se visualizan en color azul (figura 3.1b), distribuyéndose en las cuencas Abaucán, Puna, PrePuna, Santa María, en el sur de la cuenca Falda Oriental de Ancasti, y en los sectores de mayor altitud de la cuenca río Del Valle.

3.1.1.2. Temperatura máxima del mes más cálido

A continuación, se muestra la distribución espacial de la variable temperatura máxima del mes más cálido (°C) (figura 3.2a), y el mapa del factor Tmax (figura 3.2b) en escala de bytes (0 a 255).

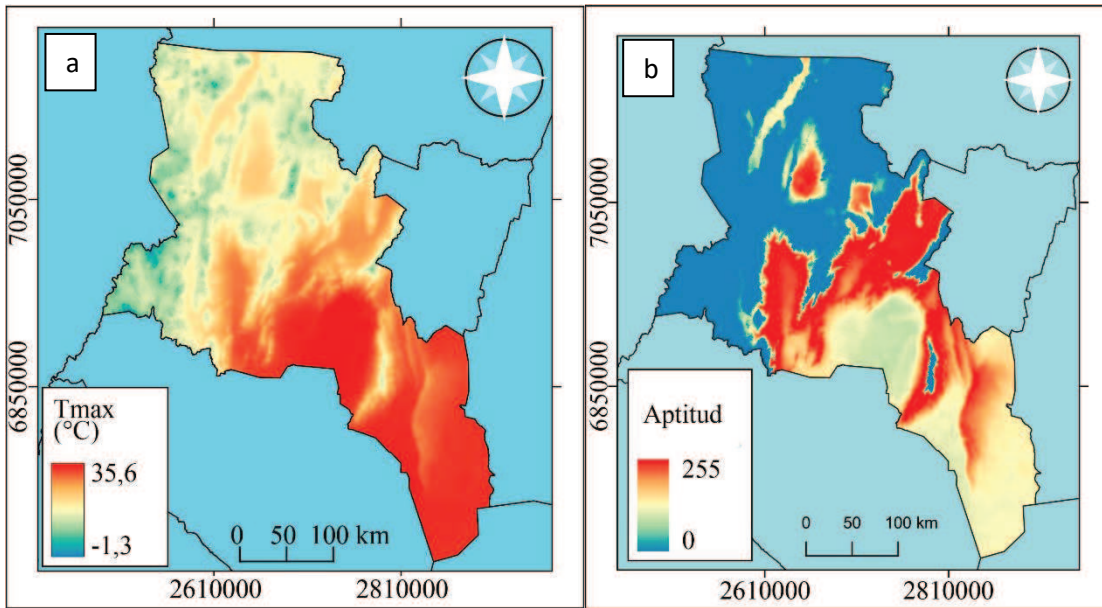


Figura 3.2: distribución espacial de las temperaturas máximas (T_{max}) del mes más cálido para la provincia de Catamarca (medias para el periodo 1970-2000, obtenidas de WorldClim) en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (a). Factor T_{max} estandarizado por lógica fuzzy (b).

Las mayores aptitudes para este factor se distribuyeron sobre el centro y sudeste de la provincia de Catamarca (figura 3.2b). En estas zonas las temperaturas máximas se encontraron entre 23,9 y 27 $^{\circ}\text{C}$ (figura 3.2a). Los menores valores de aptitud, que se visualizan en color azul, se distribuyeron en las cuencas Puna, PrePuna y Sistema de Laguna Verde, y sobre las áreas más altas de la sierra de Ambato donde las temperaturas máximas se encontraron por debajo de los 18,3 $^{\circ}\text{C}$. Las zonas con aptitudes medias, se distribuyeron principalmente sobre la cuenca Salar de Pipanaco, sobre el Valle Central en la región Centro, y sobre la región Este; allí, las temperaturas se encontraron por encima de los valores óptimos, pero por debajo del máximo de 41 $^{\circ}\text{C}$.

3.1.1.3. Temperatura mínima del mes más frío

A continuación, se presenta el mapa de distribución de las temperaturas mínimas del mes más frío (figura 3.3a) y el mapa del factor T_{min} , estandarizado por lógica fuzzy (figura 3.3b).

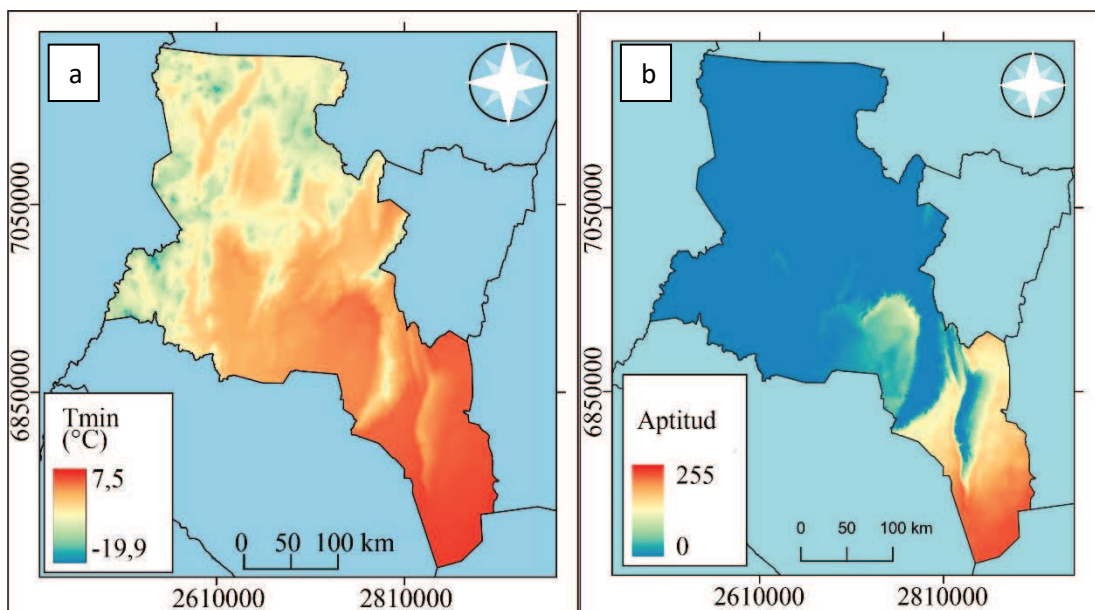


Figura 3.3: distribución espacial de las temperaturas mínimas del mes más frío (T_{min}) para la provincia de Catamarca (medias para el periodo 1970-2000, obtenidas de WorldClim) en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (a). Factor T_{min} estandarizado por lógica fuzzy (b).

Los valores de aptitud más altos en el mapa del factor T_{min} (figura 3.3b) se distribuyeron principalmente en el Valle Central y en la región Este, donde las temperaturas se encontraron alrededor de los $7,2^{\circ}\text{C}$. Todas las locaciones con temperaturas por debajo de $0,6^{\circ}\text{C}$ presentaron valores de aptitud 0 y se visualizan en color azul (figura 3.3b) y se distribuyeron sobre la región Oeste y sobre los sectores más altos de la región Centro. Sobre algunos sectores de la cuenca Salar de Pipanaco se dieron valores de aptitud moderados, los cuales se visualizan en color amarillo (figura 3.3b).

3.1.1.4. Precipitaciones anuales

A continuación, se presenta la distribución espacial de las precipitaciones medias anuales (mm) para la provincia de Catamarca para el periodo 1970-2000 (figura 3.4a), y el mapa del factor Pp estandarizado por lógica fuzzy (figura 3.4b).

Las zonas con mayores precipitaciones se distribuyeron sobre el norte de la región Este, en el departamento de Santa Rosa, disminuyendo hacia el sur y hacia el oeste provincial (figura 3.4a), resultando el mapa del factor Pp no apto en la totalidad del área de estudio (3.4b).

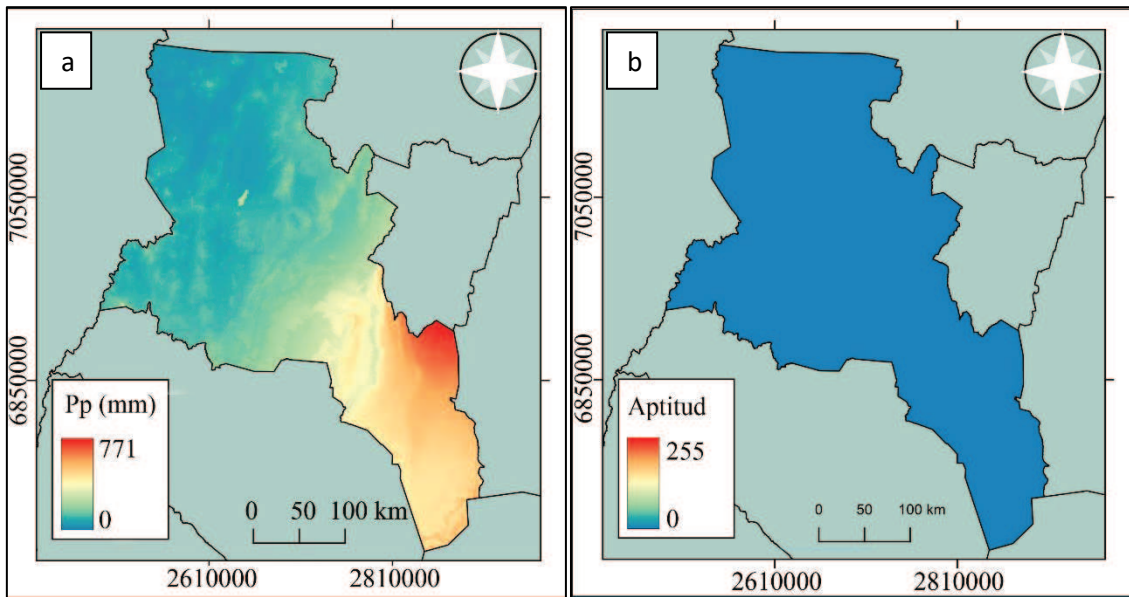


Figura 3.4: distribución de las precipitaciones medias anuales (P_p , mm) en el área de estudio para el periodo 1970-2000 (datos obtenidos de WorldClim)(a). Mapa del factor P_p estandarizado por lógica fuzzy (b).

3.1.2. Mapas de los factores edáficos

En este apartado se presentan los mapas de las variables edáficas anegamiento (figura 3.5a), drenaje (figura 3.5b), profundidad (figura 3.5c), rocosidad (figura 3.5d), riesgo de salinidad (figura 3.6a), y textura (figura 3.6b). Las unidades cartográficas fueron clasificadas de acuerdo a un índice de aptitud como se detalla en la sección 2.6.2.2 (apartado 2: metodología).

La distribución espacial para el criterio anegamiento presentó predominancia de áreas muy aptas y no aptas (figura 3.5a). La categoría muy apto se distribuyó en la mayor parte de la región Oeste, en el Valle Central, en la cuenca Santa Rosa y el norte de la región de Ancasti. En el caso de la categoría no apto, esta se distribuyó principalmente en las unidades clasificadas como afloramientos rocosos, lagunas, y salinas.

Con respecto al criterio drenaje, las categorías que se destacaron fueron muy apto, marginalmente apto y no apto (figura 3.5b). La categoría no apta, se distribuyó en suelos con limitaciones por pendientes muy pronunciadas, y suelos con drenaje deficiente. También esta categoría se distribuyó sobre unidades clasificadas como afloramientos rocosos, lagunas y salinas. La categoría marginalmente apta, se distribuyó en unidades con drenaje excesivo o drenaje imperfecto, principalmente en piedemontes, conos de deyección y planicies en la Puna Catamarqueña. La categoría muy apto se distribuyó en

algunos sectores de las regiones Este, Centro y Oeste (principalmente sobre la cuenca Salar de Pipanaco).

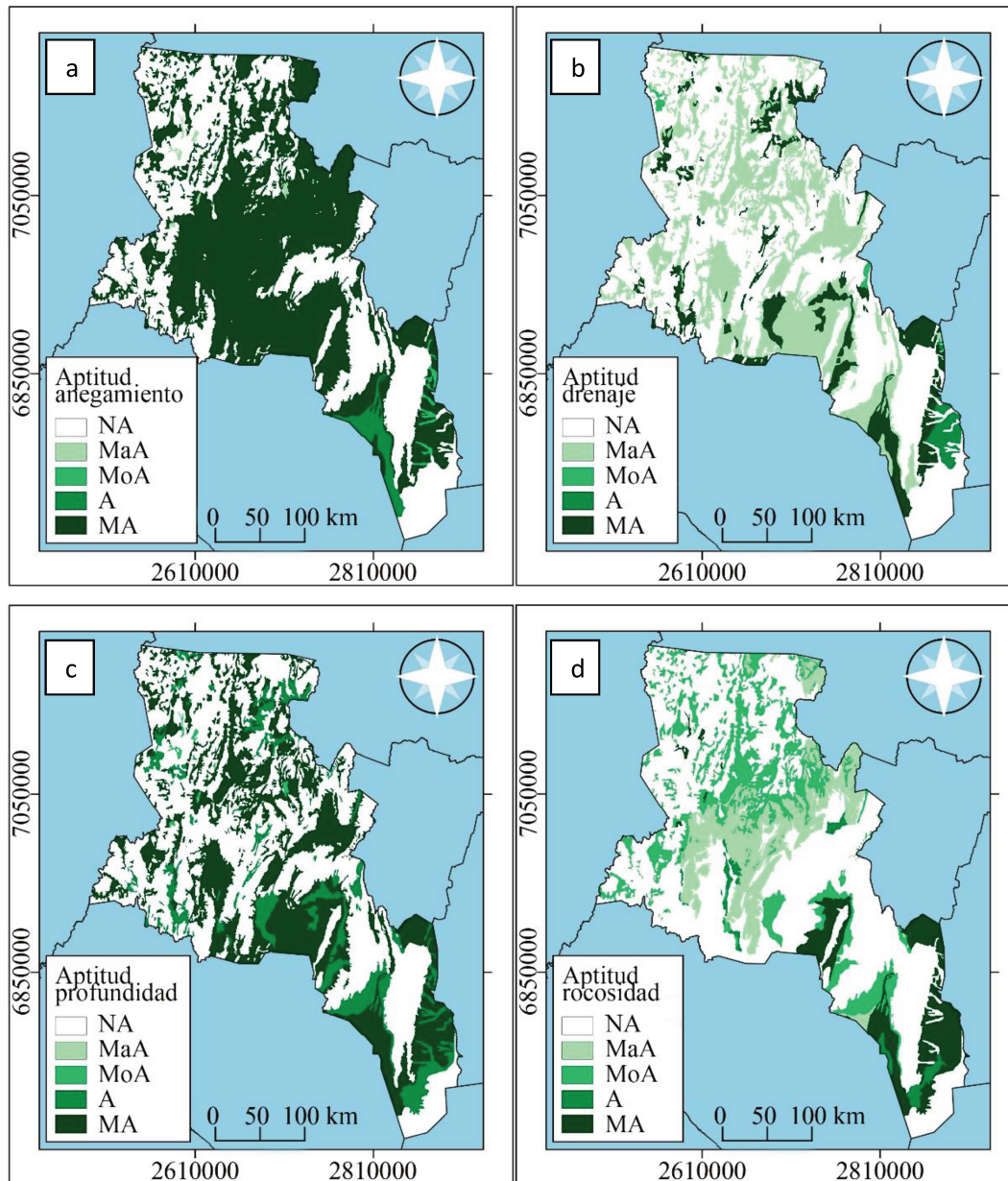


Figura 3.5: distribución espacial de la aptitud para producir nogal pecán en Catamarca de acuerdo a las variables anegamiento (a), drenaje (b), profundidad (c) y rocosidad (d). Categorías de aptitud: NA= no apto, MaA= marginalmente apto, MoA= moderadamente apto, A= apto, MA= muy apto.

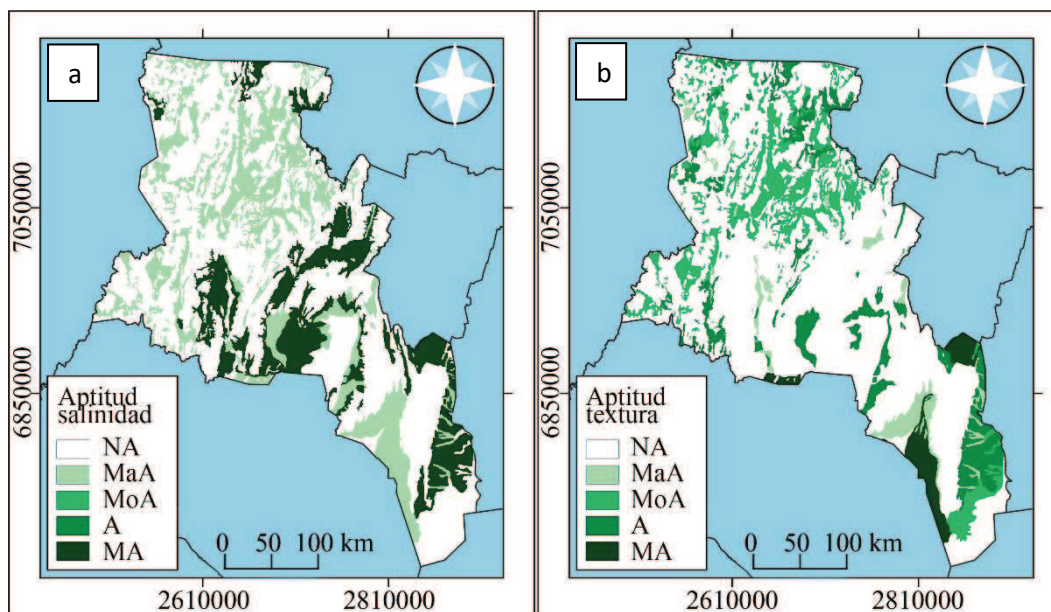


Figura 3.6: distribución espacial de la aptitud para producir nogal pecán en Catamarca de acuerdo a las variables salinidad (a) y textura (b). Categorías de aptitud: NA= no apto, MaA= marginalmente apto, MoA= moderadamente apto, A= apto, MA= muy apto.

Para la variable profundidad, las categorías muy apto y apto se distribuyeron en áreas correspondientes a planicies, planos aluviales y sectores medios, apicales e inferiores de cono (figura 3.5c) y se distribuyeron principalmente sobre el Valle Central de Catamarca, en el centro-norte de la región Este, y sobre sectores de las cuencas Salar de Pipanaco, Abaucán, Santa María, Puna y PrePuna.

Respecto de la variable salinidad, las áreas muy aptas se distribuyeron principalmente en la sección oeste de la cuenca Salar de Pipanaco, en la cuenca Santa Rosa y norte de la cuenca Falda Oriental de Ancasti y sectores de la región Oeste (figura 3.6a). Los suelos del Valle Central quedaron clasificados como marginalmente aptos.

Para el criterio rocosidad (figura 3.5d), las unidades clasificadas como muy aptas y aptas, se distribuyeron en las regiones Este y Centro, y en el sector este de la cuenca Salar de Pipanaco. Las áreas no aptas, se distribuyeron sobre las sierras de Ambato y Ancasti, sobre el sector oeste de la cuenca Salar de Pipanaco y sobre afloramientos rocosos de las cuencas Puna, PrePuna, Santa María y Sistema de Laguna Verde.

Las clases más altas de aptitud para el criterio textura se distribuyeron en la región Centro en el Valle Central, en la cuenca Santa Rosa, en el sector norte de la cuenca Falda Oriental de Ancasti, y algunos sectores de la región Oeste (figura 3.6b). Las unidades

moderadamente aptas se encontraron en dos sectores: en la región Oeste sobre las cuencas Puna y PrePuna, y sobre el sector sureste de la cuenca Falda Oriental de Ancasti. Por último, las áreas no aptas se distribuyeron en las unidades clasificadas como afloramientos rocosos, lagunas, salinas, y en unidades con texturas gruesas con baja capacidad de retención hídrica.

A continuación, se presenta el mapa que muestra la distribución espacial del puntaje omega (figura 3.7a), el cual es una síntesis de las seis variables mencionadas anteriormente, y el mapa del factor suelos estandarizado por lógica fuzzy (figura 3.7b).

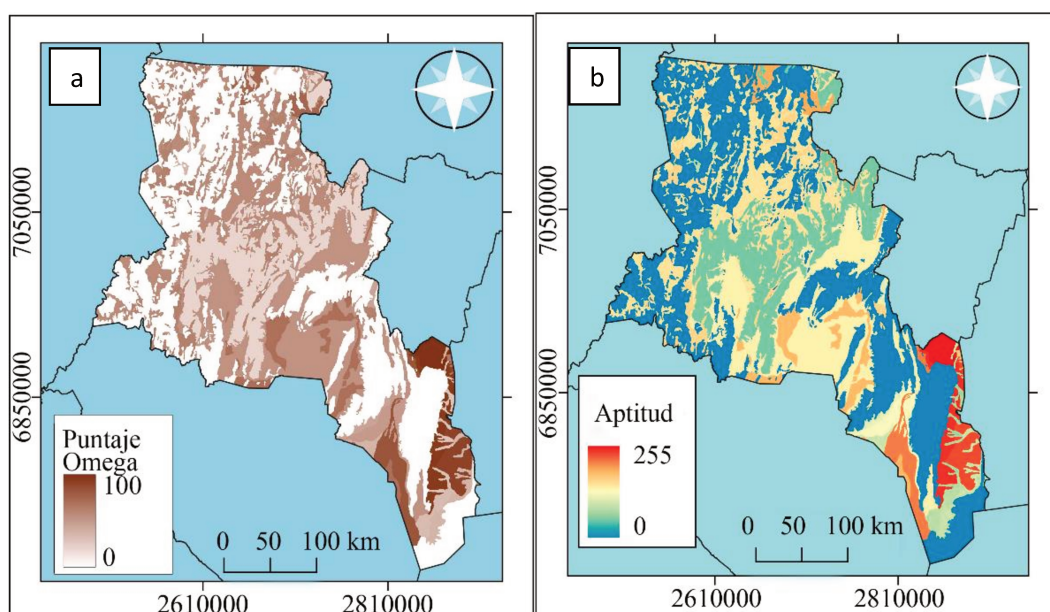


Figura 3.7: puntaje de clasificación omega para las variables edáficas (las unidades con valor 100 presentan el máximo de aptitud y se observan en colores oscuros) (a). Mapa del factor suelos obtenido por estandarización fuzzy (b).

En el mapa del puntaje omega (figura 3.7a) puede observarse que los mejores suelos se localizaron en el Valle Central de Catamarca, y en parte de la región Este, en las cuencas Santa Rosa y Falda Oriental de Ancasti; esto coincidió con la distribución de las mejores clases de aptitud halladas para la mayoría de las variables individuales, a excepción de la variable salinidad, que en el Valle Central presentó categoría de aptitud marginal (figura 3.6a).

Las situaciones intermedias para el puntaje omega (figura 3.7a), se presentaron en varios sectores de la provincia, incluyendo gran parte de la cuenca Salar de Pipanaco, la cuenca del río Abaucán, parte de la región Centro (que no incluye el Valle Central), y el valle del

río Santa María. Allí las mayores limitaciones se dieron por las variables drenaje, textura y salinidad.

3.1.3. Mapa del factor altura

En esta sección se presenta el mapa del modelo digital de elevación ASTERDEM para el área de estudio, en el cual las alturas están medidas en metros sobre el nivel del mar (figura 3.8a), y el mapa del factor altura obtenido por estandarización fuzzy (figura 3.8b).

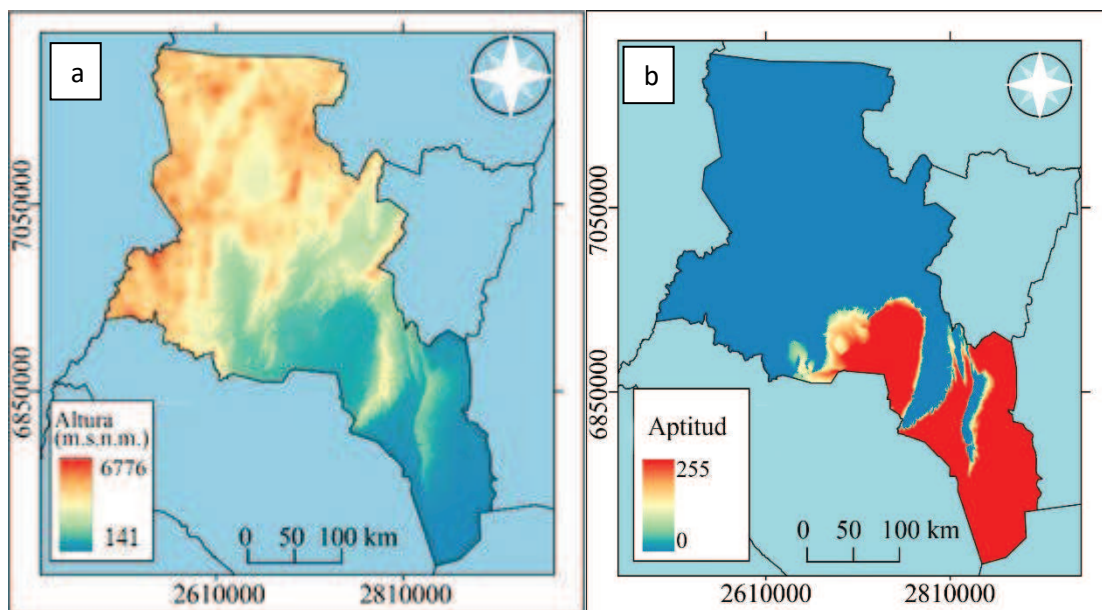


Figura 3.8: modelo digital de elevación ASTERDEM, las alturas se presentan en metros sobre el nivel del mar (a). Mapa del factor altura obtenido por estandarización fuzzy (b).

Las áreas más aptas para este factor se distribuyeron en las zonas de valles, y zonas con alturas intermedias (figura 3.8b). Esto se dio particularmente en el Valle Central de Catamarca, la región de la Falda Oriental de Ancasti y parte de la cuenca del Salar de Pipanaco. Toda la región de Puna y Prepuna, la cuenca del río Abaucán, la cuenca de Santa María, los cordones montañosos de Ancasti y Ambato quedaron clasificadas como zonas no aptas para la producción de pecán, y se visualizan en color azul.

3.1.4. Mapa del factor disponibilidad de recursos hídricos

En esta sección se presenta el mapa de la aptitud para riego que presentan los recursos hídricos totales de la provincia de Catamarca (figura 3.9a), resultado de la metodología descrita en el punto 2.6.4.4; esta capa síntesis representa la aptitud de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos.

También se presenta el mapa de la aptitud para riego de los recursos hídricos estandarizada por lógica fuzzy (figura 3.9b).

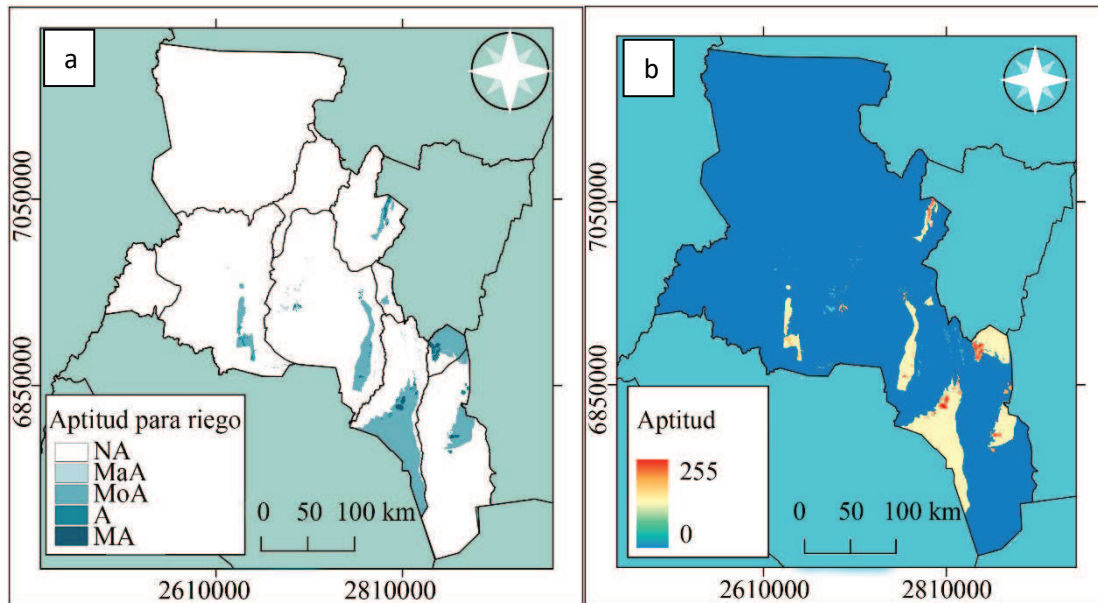


Figura 3.9: aptitud de los recursos hídricos en la provincia de Catamarca para la producción de nogal pecán (a). Categorías de aptitud: NA= no apto, MaA= marginalmente apto, MoA= moderadamente apto, A= apto, MA= muy apto. Mapa del factor recursos hídricos para riego estandarizada (b).

Las zonas más aptas para riego en la provincia de Catamarca se redujeron a pequeñas áreas dentro de las cuencas Valle Central, Falda Oriental de Ancasti, Santa María, y Santa Rosa (figuras 3.9a y 3.9b). En el anexo IIIb se presentan los mapas con la distribución espacial de los recursos hídricos discriminados por cuenca hidrográfica, donde se pueden distinguir las categorías asignadas a los dos tipos de recursos hídricos por separado.

Las áreas aptas, también representaron una pequeña proporción dentro del territorio provincial, y se distribuyeron en sectores de las cuencas Abaucán, Salar de Pipanaco, Falda Oriental de Ancasti y Valle Central (figura 3.9b).

Las moderadamente aptas, representaron la mayor proporción de tierras con disponibilidad de recursos hídricos, y se distribuyeron principalmente en el Valle Central, en el Valle de Fiambalá (cuenca Abaucán), en la cuenca Salar de Pipanaco, en el departamento de Santa Rosa, el sector norte de la cuenca Falda Oriental de Ancasti y el valle central del río Santa María. Se observó también una pequeña proporción de áreas marginales (figura 3.9b) en el este de la cuenca Salar de Pipanaco y norte de la cuenca Valle Central.

3.1.5. Mapas de las restricciones territoriales

Se presentan los mapas de las restricciones territoriales áreas protegidas (3.10a), centros poblados (3.10b), ley de bosques (3.10c), y restricciones globales (3.10d); este último mapa es una síntesis que representa el producto de las tres restricciones territoriales involucradas en este estudio. También, se presenta un reporte de las áreas que presentan restricciones territoriales para la producción de nogal pecán, estimadas para cada una de las capas por separado y para el mapa global (cuadro 3.1).

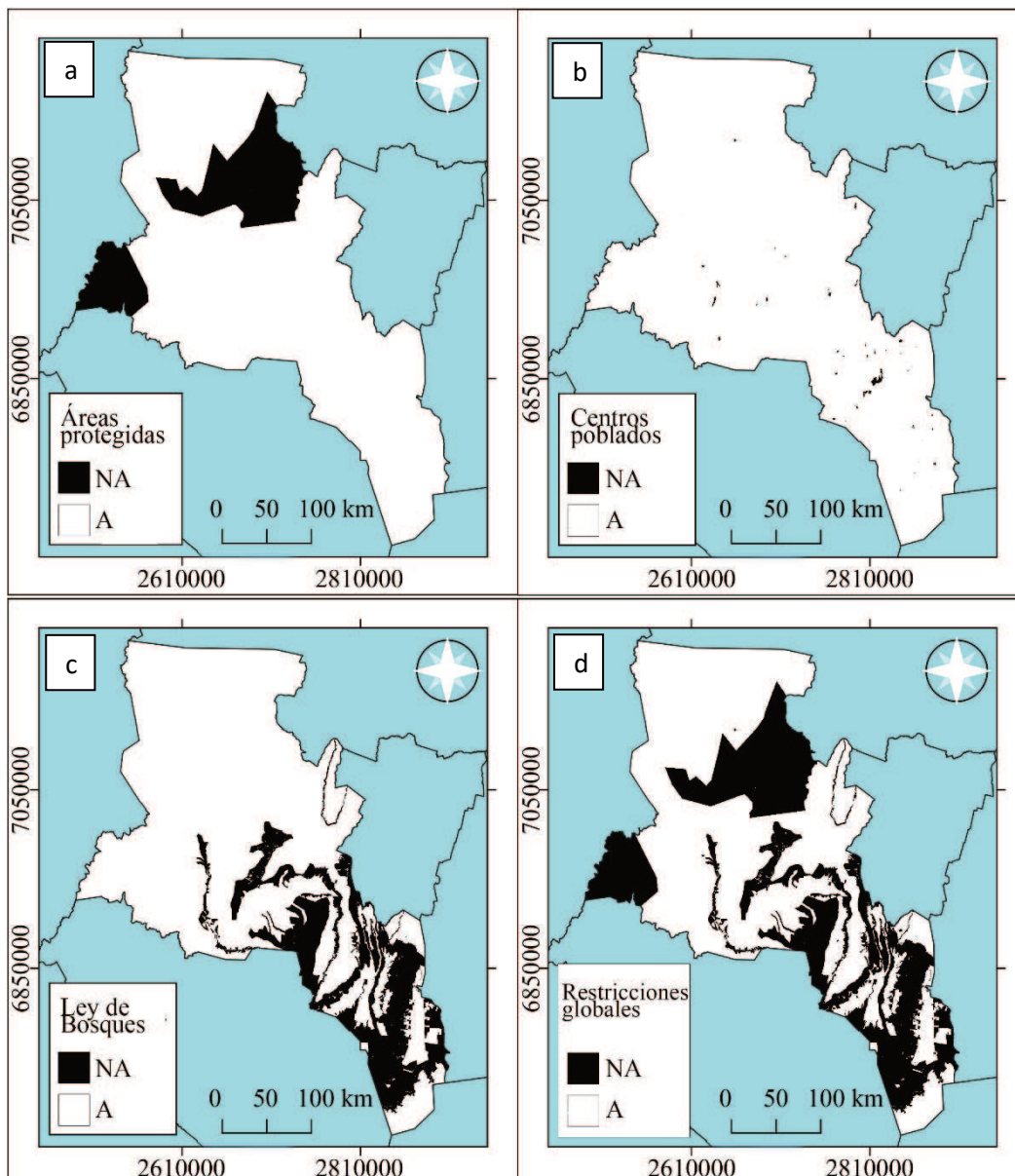


Figura 3.10: restricciones territoriales para la producción de nogal pecán en Catamarca, estandarizadas por lógica booleana. Áreas protegidas (a), centros poblados (b), Ley de bosques (c), y restricciones globales (d).

Categoría	Parques nacionales (km²)	Ley de Bosques (km²)	Centros poblados (km²)	Mapa global (km²)
No apto	15.129,78	19.539,98	116,77	35.055,76
Apto	86.356,89	81.946,69	101.369,90	66.430,91
Total				101.486,67

Cuadro 3.1: reporte de áreas (km²) aptas y no aptas de acuerdo a las restricciones territoriales involucradas en la determinación de la aptitud para producir nogal pecán en Catamarca. Las áreas estimadas en el mapa global (última columna) resultan de la superposición por multiplicación de las capas de restricciones individuales.

De las tres capas de restricciones aplicadas, la que presentó menor proporción de tierras no aptas resultó ser la capa centro poblados (figura 3.10b; cuadro 3.1), con solo 116,77 km² (cuadro 3.1). Las áreas no aptas para el mapa de restricciones globales (figura 3.10d), resultaron en un total de 35.055,76 km² y coincidieron mayormente con la distribución espacial de las áreas no aptas de las restricciones áreas protegidas y ley de bosques (figuras 3.5a y 3.5c, respectivamente). De acuerdo a esto, el 65,45 por ciento del territorio provincial resulta apto y sin restricciones territoriales para la producción de nogal pecán.

3.2. Mapa de aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca.

A continuación, se presenta el mapa de aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca, obtenido por WLC, de acuerdo a la metodología planteada en la sección 2.4.1. Por un lado, los resultados se presentan en escala de byte con valores de aptitud que van de 0 a 255 (figura 3.11).

Por el otro lado (figura 3.12) se presentan los valores de aptitud reclasificados de acuerdo a la metodología FAO (1976) (cuadro 2.6, sección 2.4.1) y divididos por cuencas. Además, se presenta un reporte de las áreas obtenidas para cada categoría de aptitud presente en el mapa final reclasificado (cuadro 3.2).

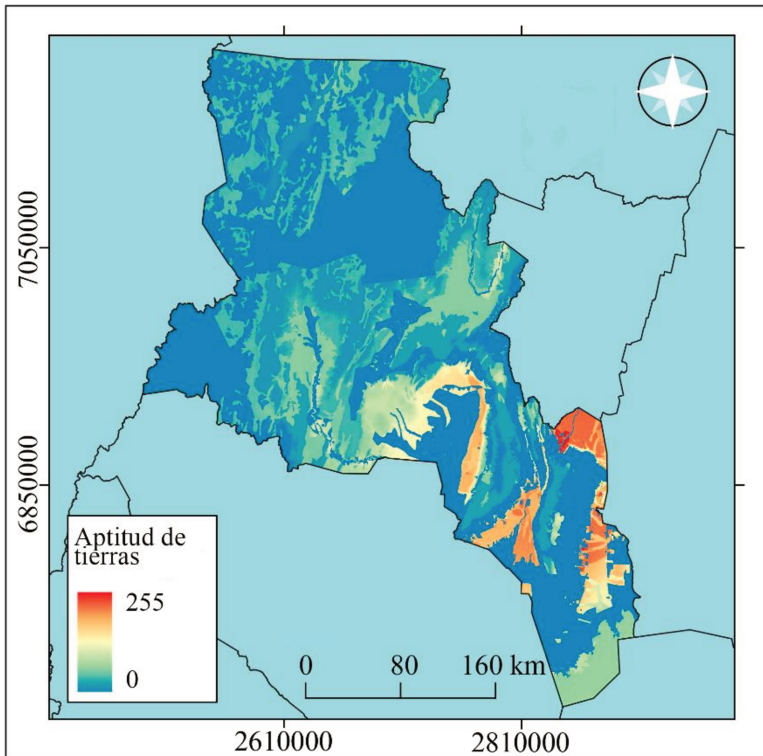


Figura 3.11: mapa de aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca obtenido por WLC. Los valores de aptitud se encuentran en escala byte de 0 a 255, donde 0 corresponde al menor valor y 255 al máximo de aptitud.

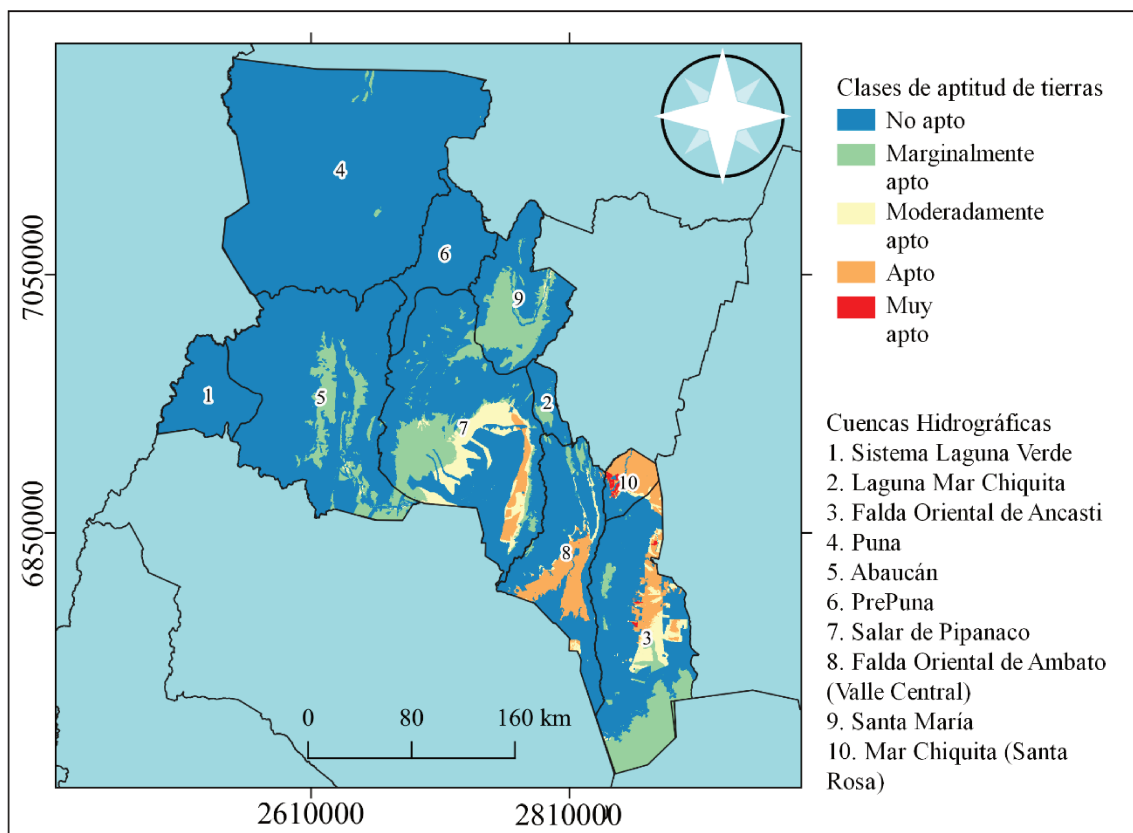


Figura 3.12: aptitud de las tierras de la provincia de Catamarca para la producción de nogal pecán clasificada en rangos de acuerdo a FAO (1976), dividida por cuencas.

Categoría de aptitud	Áreas (km ²)	Porcentaje
No apto	83273,00	82,05
Marginalmente apto	10537,71	10,38
Moderadamente apto	3449,46	3,40
Apto	4096,42	4,04
Muy apto	130,08	0,13
Total	101486,67	100

Cuadro 3.2: reporte de áreas (en km² y en porcentaje sobre el total) para cada una de las categorías de aptitud que se presentan en el mapa final de aptitud (figura 3.12).

La categoría muy apto representó solo un 0,13 por ciento del territorio provincial (cuadro 3.2). Esta clase de aptitud se distribuyó principalmente en la cuenca Mar Chiquita (departamento de Santa Rosa), ocupando un 3,61 por ciento del área de la cuenca (figura 3.12). Luego, se presentó también en el Valle Central y en la Falda Oriental de Ancasti, abarcando 0,1 y 0,22 por ciento del área de la cuenca, respectivamente (figura 3.13). La única limitación que se presentó estas áreas fue la generada por el factor precipitaciones.

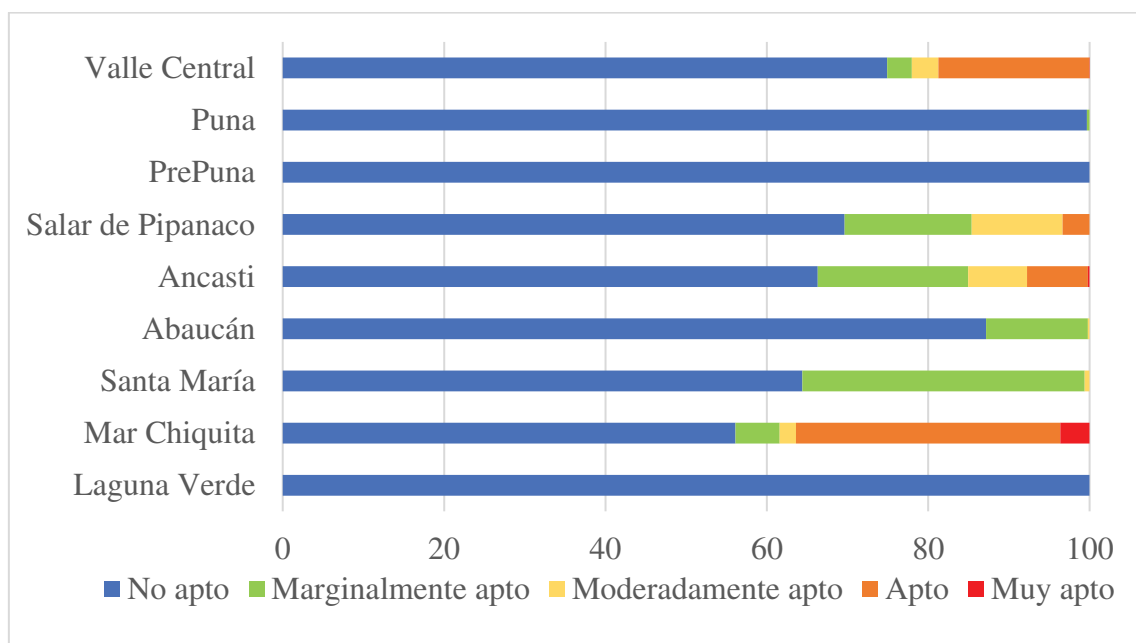


Figura 3.13: composición porcentual de las clases de aptitud para cada una de las cuencas hidrográficas de la provincia de Catamarca.

La clase apto, que representó un 4,04 por ciento del territorio provincial, se distribuyó en las cuencas Valle Central, Mar Chiquita (en el departamento de Santa Rosa), Falda Oriental de Ancasti, y Salar de Pipanaco (figura 3.12). Los porcentajes de superficie abarcada por esta categoría fueron: 18,74 % para el Valle Central, 32,80 % para la cuenca

Mar Chiquita (y un 56,48 % del departamento de Santa Rosa), 7,53 % para la Falda Oriental de Ancasti, y 3,35 % para Salar de Pipanaco (figura 3.13). En el Salar de Pipanaco, se expresaron mayormente los factores T_{min}, T_{max}, suelos y disponibilidad de recursos hídricos. En el Valle Central se expresaron principalmente el factor suelos, por las limitaciones edáficas en cuanto a salinidad y drenaje, mientras que en la Falda Oriental de Ancasti y Santa Rosa se expresó el factor disponibilidad de recursos hídricos.

Por otro lado, la clase moderadamente apto, que representó un 3,4 por ciento de la superficie provincial (cuadro 3.2), se distribuyó en el centro oeste y este de la cuenca Salar de Pipanaco, y en sectores de las cuencas Santa María, Mar Chiquita, Valle Central y Falda Oriental de Ancasti. Si se lo analiza por cuencas, esta categoría se presentó en pequeñas proporciones en cada una de ellas: 1,99 % en Mar Chiquita (cuenca Santa Rosa), 0,62 % en cuenca Santa María, 7,28 % en Falda Oriental de Ancasti, 11,27 % en Salar de Pipanaco, y 3,29 % en el Valle Central (figura 3.13).

Estos resultados reflejaron principalmente el efecto de los factores disponibilidad de recursos hídricos, T_{max} y T_{min}, suelos (afectado principalmente por la variable salinidad), y en el caso particular de la cuenca Falda Oriental de Ancasti, el factor HF.

En relación a la categoría marginalmente apto, la cual representa alrededor de un 10 % de la superficie provincial, puede observarse que se distribuyó en sectores de la región Oeste, y hacia el sur de la región Este, principalmente (figura 3.12). En la región Oeste, en la cuenca Salar de Pipanaco las mayores limitaciones las representan los factores T_{min} (figura 3.3b), HF (figura 3.1b), y la disponibilidad de recursos hídricos (figura 3.9b), los cuales presentaron valores de aptitud de moderados a marginales. En el caso de la cuenca del río Abaucán, los factores que condicionaron la aptitud fueron T_{max} (figura 3.2b), HF, T_{min}, disponibilidad de recursos hídricos y en menor medida el factor altura (figura 3.8b); también las variables drenaje, profundidad, rocosidad, y textura (figuras 3.5b, 3.5c, 3.5d, 3.6b, respectivamente) presentaron en esta cuenca categorías de aptitud marginales y moderadas. En la cuenca del río Santa María se dio una situación similar, sumándose el efecto del factor disponibilidad de recursos hídricos (3.9b) y el factor suelos (figura 3.7b), los cuales presentaron valores de aptitud bajos en casi toda la superficie de la cuenca a excepción del valle del río Santa María; las limitaciones edáficas se dieron principalmente por las variables drenaje, rocosidad y textura (figuras 3.5b, 3.5d, y 3.6b, respectivamente). En la región Este, la categoría marginalmente apto se presentó en el sur oeste de la cuenca

de Ancasti (figura 3.12), donde los factores HF (figura 3.1b), disponibilidad de recursos hídricos (3.9b) y suelos (figura 3.7b) resultaron no aptos.

Las áreas no aptas representaron alrededor de un 82 % del total provincial (cuadro 3.2), y se atribuyeron por un lado a la aplicación de la capa de restricciones globales (figura 3.10d), y por otro lado al efecto que presentaron los factores en cada una de las regiones. Donde no existieron restricciones territoriales, las zonas no aptas se localizaron en donde los factores involucrados en la WLC presentaron esta categoría. Por ejemplo, en la región Oeste, los factores HF (figura 3.1b), Tmax (figura 3.2b), Tmin (figura 3.3b), disponibilidad de recursos hídricos (3.9b), y en menor medida los factores altura y Pp (figuras 3.8b y 3.4b, respectivamente), determinaron la localización de las zonas no aptas sobre la mayor proporción de la superficie abarcada por las cuencas Puna, PrePuna, Sistema de Laguna Verde, Santa María y cuenca del río Abaucán (figuras 3.12 y 3.14). En el caso de las regiones Centro y Este, las áreas no aptas se distribuyeron principalmente sobre el sistema de sierras de Ambato y de Ancasti, y hacia el sur de la cuenca de Ancasti, por el efecto de los factores Tmin (figura 3.3b), HF (figura 3.1b), disponibilidad de recursos hídricos (3.9b) y suelos (figura 3.7b).

En resumen, las clases no apto y marginalmente apto abarcaron casi por completo el territorio delimitado por las cuencas Puna, PrePuna, Sistema de Laguna Verde, Abaucán, y Santa María. En estas áreas, la mayor parte de los factores, con excepción del factor Tmax, presentaron valores bajos de aptitud, evidenciándose la influencia de las restricciones globales aplicadas.

3.3. Mapas de los factores socioeconómicos utilizados para modelar la localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán

En esta sección se presentan los mapas de distancias a rutas, distancias a zonas candidatas, y distancia al puerto de Zárate. También se presentan los mapas de los factores socioeconómicos estandarizados por lógica fuzzy.

3.3.1. Mapas de distancias de las variables socioeconómicas

Se presentan los mapas de distancias medidas en km. La distancia se midió tomando como punto de partida los objetos espaciales que presentan cada una de las capas. En el caso de

la distancia al puerto (figura 3.14), la distancia cero se encuentra sobre la ubicación del puerto de Zárate y aumenta a medida que las locaciones se alejan del mismo.

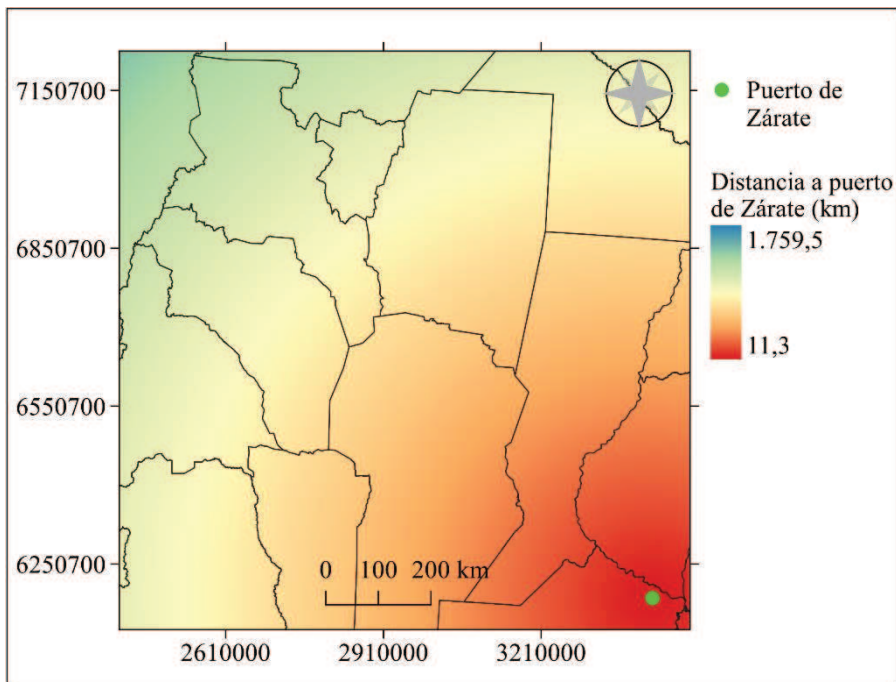


Figura 3.14: distancia al puerto de Zárate (km). Se considera distancia cero a la ubicación del puerto en el mapa.

En el caso de la distancia a las rutas, el cero se encuentra sobre las líneas que representan las vías de comunicación, aumentando las distancias a medida que las locaciones se alejan de estas (figura 3.15).

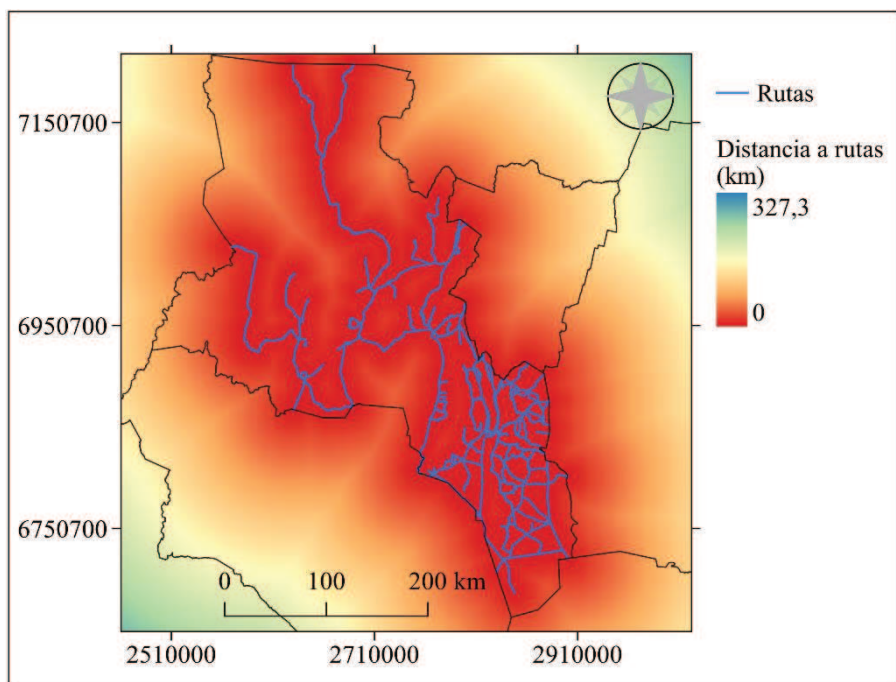


Figura 3.15: distancia a rutas (km). El cero de distancia se sitúa sobre las vías de comunicación (líneas en azul).

Por último, en el caso de las distancias a las zonas candidatas (figura 3.16), la distancia cero se ubica sobre los polígonos y aumenta a medida que las locaciones se alejan de ellos.

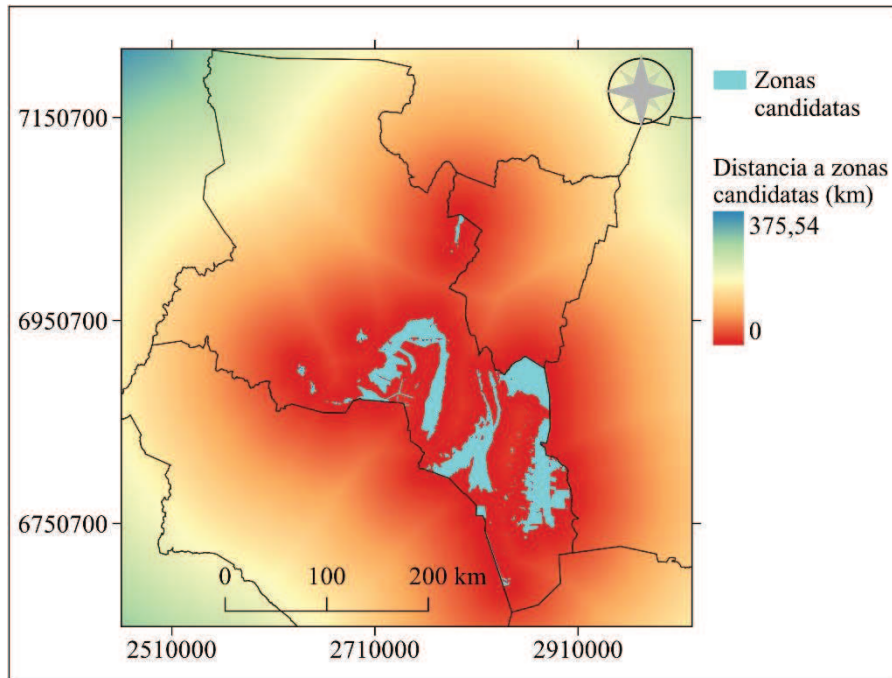


Figura 3.16: distancia a zonas candidatas (km). La distancia cero se encuentra dentro de los polígonos y aumenta a medida que las locaciones se alejan de estos.

3.3.2. Mapas de los factores socioeconómicos

En esta sección se presentan los mapas de distancias estandarizados por lógica fuzzy, denominándose así mapas de los factores socioeconómicos: factor distancia a puerto de Zárate (figura 3.17), factor distancia a rutas (figura 3.18), y factor distancia a zonas candidatas (figura 3.19). En estos, los valores de distancias se estandarizaron en una escala que va de un mínimo de 0 a un máximo de 255, ubicándose las mejores localizaciones en las áreas que presentan los valores máximos.

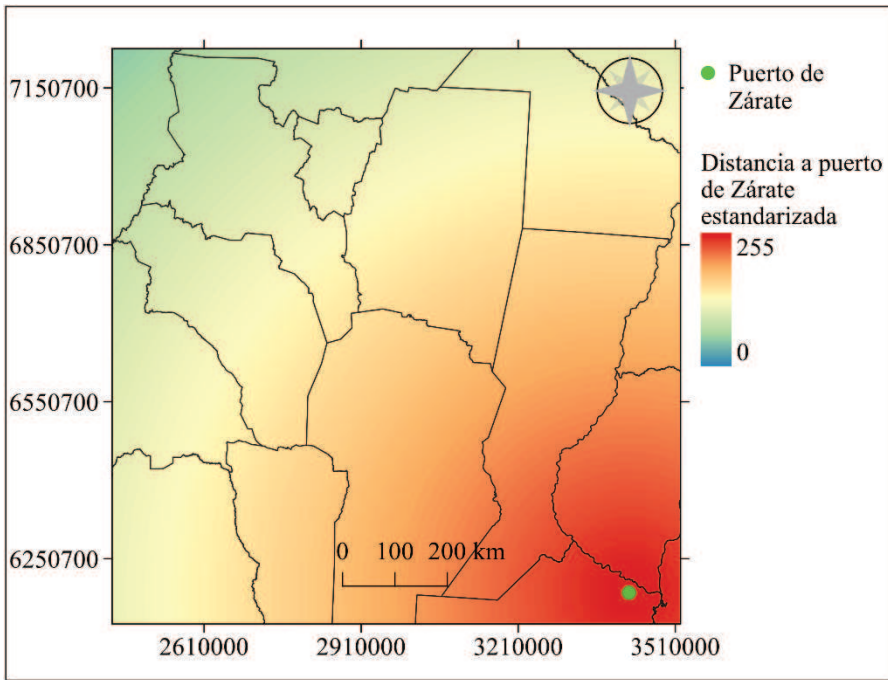


Figura 3.17: mapa del factor distancia a puerto de Zárate.

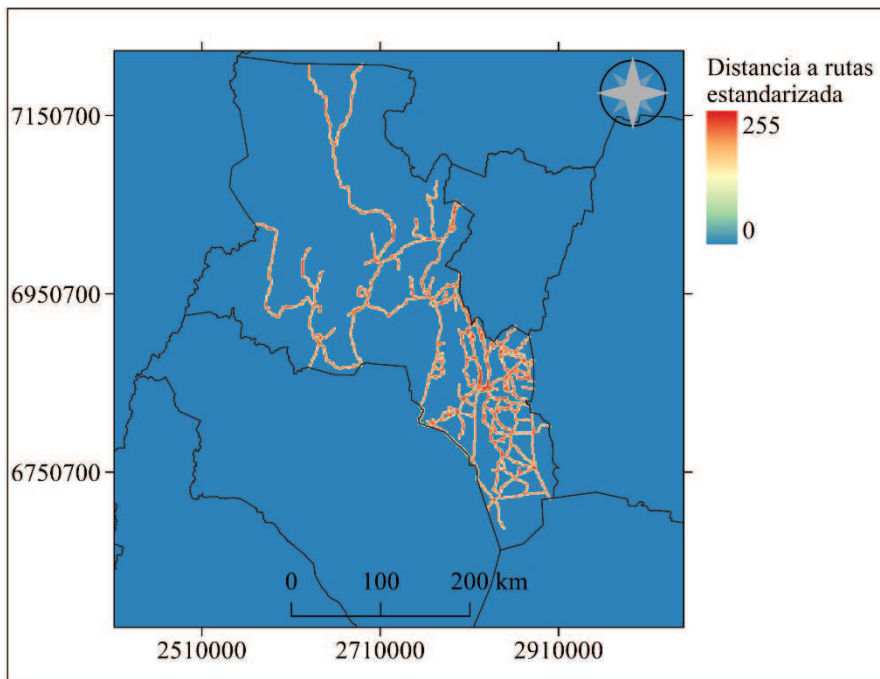


Figura 3.18: mapa del factor distancia a rutas.

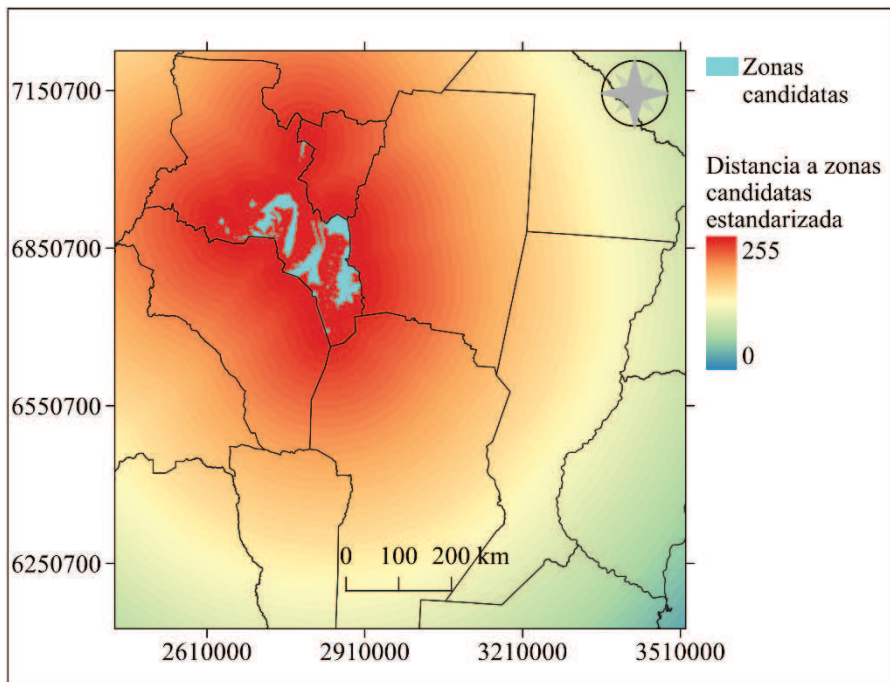


Figura 3.19: mapa del factor distancia a zonas candidatas.

3.4. Mapa de localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán

En esta sección se muestra el mapa de localización óptima para las plantas de procesamiento para la nuez pecán (figura 3.20), obtenido por WLC (sección 2.4.2) teniendo en cuenta los tres factores socioeconómicos presentados anteriormente.

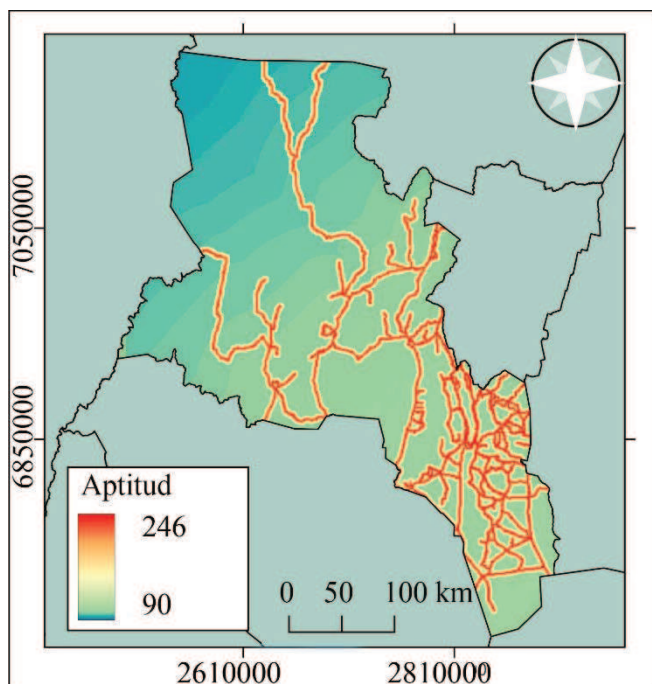


Figura 3.20: localización óptima de plantas de procesamiento para nogal pecan obtenido por WLC.

Por otro lado, también se presenta el mapa reclasificado (figura 3.21) de acuerdo a la metodología FAO (1976) (cuadro 2.2, sección 2.4.1), y un reporte de áreas para cada categoría de aptitud (cuadro 3.3).

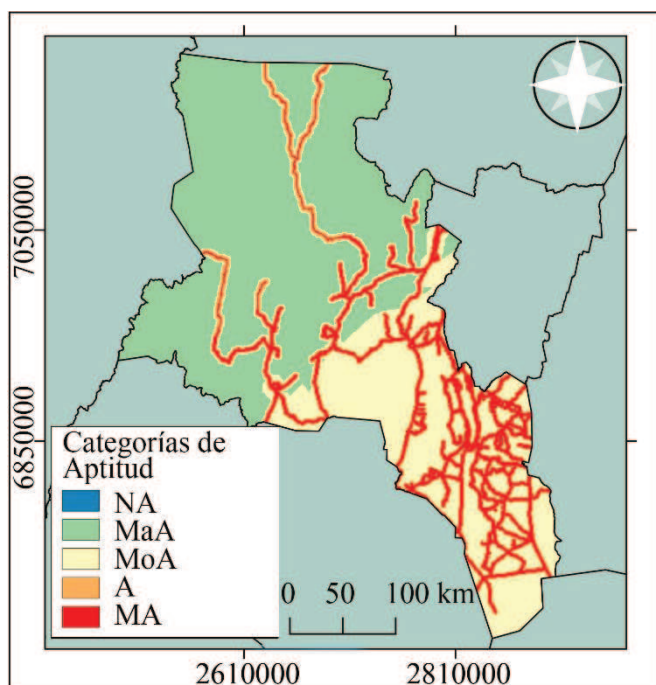


Figura 3.21: localización óptima de plantas de procesamiento para nogal pecan obtenido por WLC, reclasificada en cinco rangos de aptitud.

Categoría de aptitud	Áreas (km ²)	Porcentaje
No apto	0	0,00
Marginalmente apto	44389,33	43,74
Moderadamente apto	35732,71	35,21
Apto	11835,58	11,66
Muy apto	9529,05	9,39
Total	101486,67	100

Cuadro 3.3: reporte de áreas (en km² y en porcentaje sobre el total) para cada una de las categorías de aptitud que se presentan en el mapa de localización óptima de plantas de procesamiento para nogal pecán (figura 3.21).

Las áreas clasificadas como muy aptas y aptas para la localización de las plantas de procesamiento representaron alrededor del 20 por ciento del territorio provincial (cuadro 3.3) y se distribuyeron principalmente en zonas cercanas a las vías de comunicación (figura 3.21). Esta distribución espacial se dio principalmente por efecto del factor

distancia a rutas (figura 3.18), en el cual los menores grados de aptitud se encontraron a una distancia máxima de 2 km desde las líneas correspondientes a las rutas.

La categoría moderadamente apto (figura 3.21) se distribuyó principalmente donde se localizaron las mayores aptitudes para el factor zonas candidatas (figuras 3.19), y las aptitudes medias para el factor distancia a rutas.

Con respecto a las categorías de aptitud más bajas, no se observaron áreas no aptas dentro del territorio de la provincia de Catamarca (cuadro 3.3, figura 3.21). En relación a la categoría marginalmente apto, su distribución espacial coincidió con las menores aptitudes para los tres factores involucrados: distancia al puerto de Zárate, distancia a rutas, y distancia a zonas candidatas (figuras 3.17, 3.18 y 3.19, respectivamente).

4. DISCUSIÓN

4.1. Factores y restricciones involucrados en la obtención del mapa de aptitud para producir nogal pecán en la provincia de Catamarca

Los criterios seleccionados en este estudio influyen en la posibilidad del establecimiento de una plantación de nogal pecán, ya sea porque condicionan la performance del cultivo a campo, o porque presentan restricciones territoriales para su establecimiento. En función de la calidad de los recursos y condiciones que se presentan en el territorio de la provincia de Catamarca pueden darse situaciones favorables o desfavorables para el establecimiento de la especie. En los casos donde no se cumplen los requerimientos biológico-productivos, considerando que pueden existir diferentes grados de cumplimiento de estos requerimientos, el rendimiento del cultivo puede verse limitado en distintos niveles. Por ejemplo, de no cumplirse el requerimiento de precipitaciones, puede verse afectado el normal desarrollo del cultivo, dependiendo de la etapa en que ese déficit se presente (Madero et al., 2016). Cuando este déficit se presenta en las etapas correspondientes a la floración, cuajado y desarrollo del fruto puede verse gravemente afectado el rendimiento, por una menor cantidad y menor tamaño de los frutos (Sparks, 1996; Madero et al., 2016; Ibraimo et al., 2016). De aquí surge la importancia de contar con disponibilidad de agua para riego, sobre todo en zonas áridas o semi áridas (Mokari et al., 2021). Asimismo, de no cumplirse el requerimiento de horas frío, pueden verse afectadas tanto la brotación y la floración (Kuden et al., 2013), con efectos negativos sobre el rendimiento del cultivo por una menor producción de frutos.

En algunos casos, pueden darse disminuciones de los rendimientos dentro de límites aceptables, mientras que en otros estas disminuciones pueden resultar significativas. Para evaluar el grado de cumplimiento de los requerimientos del nogal pecán, fue necesario entonces evaluar la adaptabilidad o aptitud en base a una serie de criterios que condicionen el éxito del cultivo. Este grado de adaptabilidad se analizó comparando los requisitos de uso con los recursos disponibles, de acuerdo los principios de la metodología de evaluación de tierras (FAO, 1976).

4.1.1. Factores climáticos

En esta sección se presenta la discusión de los resultados obtenidos en el modelado cartográfico de los factores climáticos, y de los métodos y criterios aplicados para ello.

4.1.1.1. Horas frío

El mapa de distribución de horas frío anuales (HF) estimadas por el método Damario et al. (1998) presentó valores mínimos de 187 y máximos de 8313 para el territorio de la provincia de Catamarca. Estos valores son el resultado del promedio de las HF estimadas con dos fuentes de datos distintas y para periodos de tiempo distinto.

La tendencia en la distribución espacial de las HF estimadas utilizando ambas fuentes de datos resultó similar: en las áreas de mayor altitud, correspondientes a las cuencas Puna, Pre Puna, Abaucán, Santa María y Laguna Verde, y también a los cordones montañosos de las sierras de Ambato y Ancasti, las HF tomaron valores extremos por encima del requerimiento del nogal pecán, de 1000 HF máximo (Clark, 2015; Smith et al., 1992) (figuras 4.1a y 4.1b). En el resto del territorio provincial, las HF estimadas presentaron una tendencia similar para ambas fuentes, localizándose los menores rangos sobre las regiones Centro y Este en las zonas de menor altitud. Al analizar los rangos en ambos mapas, se observa que, si bien la tendencia es similar, las HF estimadas utilizando datos de estaciones meteorológicas para el periodo 2013-2018 presentaron mayor diferenciación de clases y menores valores para el área correspondiente al Valle Central y a la región Este, respecto de las estimadas a partir de datos provenientes WorldClim para el periodo 1970-2000.

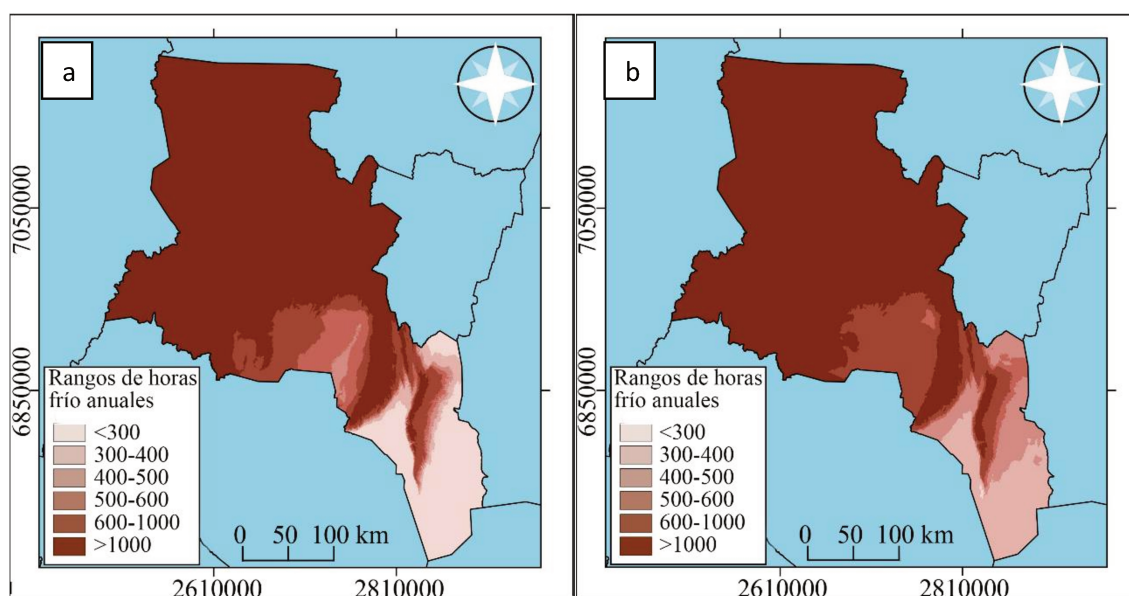


Figura 4.1: horas frío anuales estimadas por método Damario et al. (1998) utilizando datos de estaciones meteorológicas para el periodo 2013-2018 (a) y utilizando datos provenientes de WorldClim para el periodo 1970-2000 (b).

En el caso de la estimación de HF utilizando datos de estaciones meteorológicas, se emplearon los valores de temperaturas mínimas medias mensuales, calculados a partir de registros diarios de temperaturas mínimas en abrigo a 1,50 m, tomados con estaciones manuales y automáticas. El periodo en el cual las estaciones coincidieron en la cantidad y la calidad de los datos fue de 6 años, lo cual resulta en un lapso de tiempo insuficiente para la predicción precisa de información climática. Fernández-Long et al. (2016) señalan que, para caracterizar las condiciones medias o climatológicas de una región, estas deben estar basadas en registros históricos de 20 a 30 años para entender las condiciones preponderantes.

También, se considera importante destacar que la cantidad de estaciones meteorológicas dentro del área de estudio resultó insuficiente para el modelado cartográfico de la distribución espacial de las HF por interpolación aplicando la metodología de kriging. Este método, consiste en una técnica de interpolación estocástica, exacta, aplicable tanto de forma global como local (Olaya, 2020), y constituye uno de los métodos de interpolación probabilístico más utilizado (Buzai & Montes-Galbán, 2021). Para su correcta aplicación, se requiere un número suficiente de muestras, con un mínimo de 50 puntos (Olaya, 2020). La escasa disponibilidad de datos climáticos para el modelado de las cartas de HF para la región Noroeste de la Argentina también fue reportada por Pascale et al. (2001).

Al no existir la posibilidad de modelar la distribución de la variable HF aplicando el método de Damario et al. (1998) y kriging, se ensayó la predicción para el periodo 2013-2018 a partir de un modelo de regresión lineal empleando como variable predictora la altura sobre el nivel del mar (Cervantes-Herrera et al., 2005). Este método de interpolación se basó en el principio del gradiente altotérmico, el cual explica la relación entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar, expresada como una función lineal (Cervantes Herrera et al., 2005). De la misma forma, el gradiente altotérmico puede explicar la relación entre las HF y la altitud (Cervantes-Herrera et al., 2005). El modelo de regresión presentó un ajuste significativo (anexo Ib) y permitió el modelado de un mapa de horas frío con resolución espacial de 30 metros (figura 4.1a).

Con el objetivo de ampliar el periodo de estudio, se trabajó con la variable temperaturas mínimas medias mensuales del modelo WorldClim; esta serie de datos representa los valores promedios para el periodo 1970-2000, resultando esto en un periodo suficiente

para la predicción de las condiciones climáticas de una región (Fernández-Long et al., 2016). El modelo WorldClim (Fick & Hijmans, 2017) es una fuente de datos en formato ráster confiable y fácilmente disponible (Varela et al., 2015). Fue creado a partir de promedios mensuales de mediciones de temperatura y precipitaciones de estaciones meteorológicas a nivel global, los cuales fueron interpolados utilizando como covariables la elevación (Poggio et al., 2018), la distancia a la costa, y tres productos teledetectados obtenidos con la plataforma satelital MODIS: temperatura máxima y mínima de la superficie terrestre, y cobertura de nubes (Fick & Hijmans, 2017). Una de las aplicaciones más importantes de este repositorio global es el modelado bioclimático, para investigar cambios inducidos por el cambio climático en la distribución de especies (Poggio et al., 2018). Asimismo, estos datos climáticos se utilizan ampliamente para examinar y predecir las áreas potencialmente ocupadas por especies en múltiples escalas espaciales y temporales. La aplicación del método de Damario et al. (1998) utilizando la variable temperaturas mínimas medias mensuales del modelo WorldClim, permitió la obtención de un mapa de horas frío con resolución espacial de 1km² (figura 4.1b) para el periodo 1970-2000.

Al analizar las diferencias estadísticas entre los resultados obtenidos con ambas fuentes de datos, se determinó que no existen pruebas suficientes para afirmar que los datos obtenidos utilizando series de estaciones meteorológicas y los datos de WorldClim son diferentes, para el área de influencia de las estaciones meteorológicas (ver Anexo Ib). Por este motivo, se decidió realizar un promedio de los mapas modelados (figuras 4.1a y 4.1b) para obtener un mapa que represente las horas frío para ambos periodos de cálculo.

Si bien no existen diferencias significativas, en las figuras 4.1a y 4.1b se observa una tendencia a la disminución de las HF para el periodo 2013-2018 respecto al periodo 1970-2000. Esto puede deberse a dos factores. Por un lado, pueden darse diferencias por el origen distinto de los datos: en el caso del modelo WorldClim los datos se construyeron con información de estaciones meteorológicas y se interpolaron utilizando al menos cinco covariables para crear una capa ráster con cobertura global, mientras que los datos de las estaciones meteorológicas se tomaron de las series locales y se interpolaron utilizando una función de regresión lineal relacionando las HF con la altitud.

Por el otro lado, la disminución en las HF estimadas puede estar relacionada con el cambio climático (Fernández et al., 2023). En este contexto, varios autores han realizado

predicciones del efecto del cambio climático en el frío invernal, a partir de diferentes modelos de estimación, dejando en evidencia que, inclusive para el frío invernal observado históricamente, las estimaciones con diferentes modelos pueden no resultar proporcionales (Luedeling, 2012). Debido a las diferentes estructuras y rangos de temperaturas efectivas utilizadas en cada modelo, la medida en que tales conversiones son posibles es limitada (Luedeling, 2012).

Sin embargo, el efecto del cambio climático en la acumulación de frío invernal ha sido estudiado y demostrado. Existen evidencias de que el inicio de la floración ha avanzado en respuesta al aumento de las temperaturas, y se presume que los requisitos de frío de los árboles caducifolios podrían convertirse en un factor limitante en futuros escenarios en muchas regiones (Fernández et al., 2023). Los análisis de series de tiempo y las proyecciones han mostrado pérdidas dramáticas en el número de horas de enfriamiento para California, Australia, Sudáfrica y la mayoría de las regiones cálidas de cultivo (Luedeling, 2012). Sunley et al. (2006) evaluaron los cambios en el frío invernal en varios lugares del Reino Unido, utilizando diferentes modelos; estos autores compararon el frío invernal de la década 1969–1979 con el frío de 1987–1997, encontrando cambios entre $-5,7$ y $-12,2\%$ para el modelo de $<7,2$ °C, entre $+2,3$ y $-10,9\%$ para el modelo de horas de frío y entre $-1,6$ y $-4,8\%$ para el Modelo Lantin. Asimismo, Midgley y Lötze (2011) analizaron las tendencias de las unidades de frío invernales en la región del Cabo Occidental de Sudáfrica utilizando el modelo de Utah (Linsley-Noakes y Allan, 1994), basado en registros de temperatura diarios de 12 estaciones meteorológicas tomadas entre 1967 y 2007, y encontraron pérdidas correspondientes a un 26% en promedio, en relación con las medias de 40 años.

Además de los efectos mencionados anteriormente en las diferencias entre las HF estimadas con ambas fuentes de datos, los resultados finales de la distribución de las HF que se muestran en la figura 3.1b, se encuentran condicionados por el método de estimación aplicado y por los puntos de inflexión utilizados en la estandarización fuzzy para la obtención del mapa del factor HF. Si se utilizara otro método de estimación, o diferentes puntos de inflexión, los resultados podrían variar significativamente (Luedeling, 2012).

Algunos métodos utilizados para la estimación de horas frío suman la cantidad de horas de frío por debajo de una temperatura base ($< 7,2^{\circ}\text{C}$), empleando para ello datos diarios

y horarios de temperaturas, tomados en estaciones meteorológicas (Cervantes-Herrera et al., 2005). En los casos en que no existe esta disponibilidad de datos, es posible la estimación de las horas frío a partir de la aplicación de métodos indirectos, basados en modelos matemáticos y fórmulas (Cervantes-Herrera et al., 2005). Un ejemplo de estos últimos, es el método Crossa-Reynaud que realiza la predicción de las horas frío en base a las temperaturas máximas y mínimas diarias de los meses más fríos (Cervantes-Herrera et al., 2005). El método de Damario et al. (1998), utilizado en este estudio, es otro ejemplo de métodos indirectos, y se basa en una fórmula exponencial en la cual se utilizan como datos las temperaturas mínimas medias mensuales, por lo cual se lo considera adecuado para la estimación de horas frío para el área de estudio, dadas las características y disponibilidad de datos climáticos con que se cuenta (temperaturas mínimas medias mensuales).

El método de Damario et al. (1998), fue aplicado por Pascale et al. (2001) para el trazado de las cartas de HF y HF efectivas para el noroeste argentino para el periodo 1961 a 1990, encontrando para dicha región valores de entre 100 y más de 2500 HF anuales totales, y recomendando la aplicación del método para desarrollar la cartografía agroclimática del enfriamiento invernal de regiones montañosas o serranas. Los resultados hallados por Pascale et al. (2001), indican rangos de entre 200 y 400 HF para el este de la provincia de Catamarca, de 400 a 600 HF en la zona correspondiente a las cuencas Salar de Pipanaco y Abaucán, y más de 600 HF en zonas con altitudes superiores a 1000 metros sobre el nivel del mar. Estos resultados, siguen la misma tendencia que los hallados en este trabajo, con la diferencia que al tratarse de una escala de trabajo regional para el caso de Pascale et al. (2001), el nivel de detalle resulta menor.

4.1.1.2. Temperatura máxima del mes más cálido

La variable temperatura máxima del mes más cálido (T_{max}) presentó valores máximos de 35,6°C, por debajo del máximo establecido por Sierra et al. (2007) para el cultivo, de 41°C (figura 3.2a). Este valor de temperatura máxima, fue asignado como punto *d* para la estandarización, por encima del cual las locaciones se consideran no aptas (Eastman, 2012). Los valores óptimos se establecieron entre 23,9 y 27°C (puntos *b* y *c*, respectivamente), por ser estos los valores medios históricos de temperaturas para los meses de verano en la zona originaria del nogal pecán (Conti et al., 2018; Ceballos-Silva & López-Blanco, 2010; Peterson, 1990). Por esta razón, las zonas más óptimas se

distribuyeron sobre el centro y sudeste del área de estudio, donde se dan estos rangos de temperaturas durante el verano (figura 3.2b). Al contrario, las zonas no aptas, se distribuyeron donde las temperaturas máximas se encuentran por debajo de los 18,3°C, en las cuencas Puna, PrePuna y Sistema de Laguna Verde, y sobre las áreas más altas de la sierra de Ambato (figura 3.2b). Las zonas con aptitudes medias, se distribuyeron principalmente sobre la cuenca Salar de Pipanaco, sobre el Valle Central en la región Centro, y sobre la región Este; en estas áreas, las temperaturas se encontraron por encima de los valores óptimos (23,9 y 27°C), pero por debajo del máximo de 41°C.

El punto de inflexión a de la función sigmoidea simétrica aplicada a los datos climáticos (Garfias-Salinas et al., 2012), representa el mínimo por debajo del cual todas las locaciones presentan aptitud 0 (Eastman, 2012). Para este punto se asignó un valor de 18,3°C, que coincide con la temperatura media base para el cálculo de suma de horas de calor (Sparks, 1993; Sparks, 1997), y es considerada como una temperatura adecuada para el crecimiento y el desarrollo del nogal pecán (Sparks, 1997; Sparks, 2005). Si bien este valor no se refiere a un valor de temperatura máxima, sino a un promedio entre temperaturas máximas y mínimas diarias, en este trabajo se lo seleccionó como punto de inflexión a , dado que no se contó con datos de referencia que señalen valores de temperaturas máximas estivales por debajo de las cuales se resienta el normal desarrollo del cultivo. En relación a esto, Mokari et al. (2021) utilizaron 15,6°C como temperatura media diaria a la cual inicia la temporada del cultivo del pecán; si se considerara este mismo criterio, las áreas aptas en el mapa del factor Tmax se incrementarían. No obstante, esta expansión de áreas aptas para este factor se daría sobre la región Oeste de la provincia (figuras 4.2a y 4.2b), donde el resto de los factores involucrados en este estudio presentaron valores marginales de aptitud, por lo tanto, para la provincia de Catamarca seguiría tratándose de áreas marginales para el cultivo de nogal pecán.

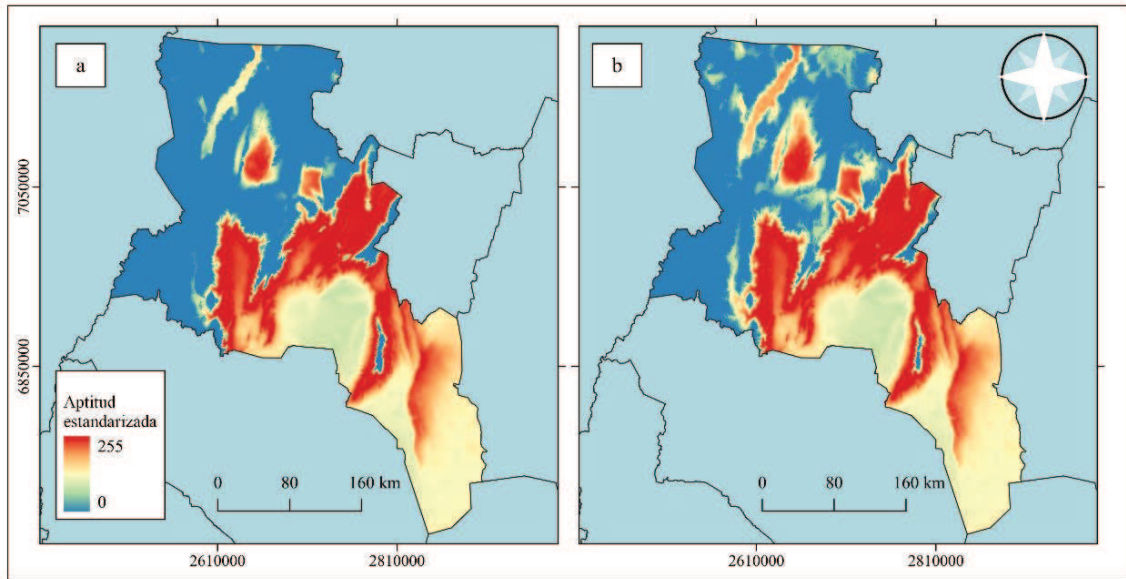


Figura 4.2: factor Tmax obtenido utilizando 18,3°C como punto de inflexión *a* en la estandarización fuzzy (a). Factor Tmax obtenido utilizando 15,6°C como punto de inflexión *a* en la estandarización fuzzy (b).

La tendencia observada en la distribución espacial de la aptitud del factor Tmax (figura 3.2b) corresponde al periodo 1970-2000, abarcado por los datos provenientes del modelo WorldClim (Fick & Hijmans, 2017). De la misma forma que sucede con la acumulación de horas de frío anuales, podría darse un efecto del cambio climático en las temperaturas máximas en el periodo estival, lo cual generaría cambios en la distribución de las áreas óptimas para producir nogal pecán en la provincia de Catamarca. Es importante destacar que el cambio climático está teniendo una profunda influencia en la expansión y contracción de las áreas de distribución de las especies a nivel mundial (Lompo et al., 2021). Al respecto, Mokari et al. (2021) han informado una tendencia creciente en la duración del periodo de desarrollo del nogal pecán para el estado de Nuevo México (Estados Unidos), provocado por un aumento de las temperaturas, tanto mínimas como máximas, para el período 1950-2019 respecto del período comprendido entre los años 1901 y 1950. Esta misma situación podría darse también en la República Argentina, y específicamente en la provincia de Catamarca, ya que en el período 1901-2012 la temperatura media aumentó alrededor de 0,5°C en la mayor parte del país (Barros et al., 2015). Respecto de las proyecciones futuras, se evidencia una aceleración en la tasa de calentamiento regional, estando el noroeste argentino en el rango de 2,0-2,5°C y 3,5°C, según diferentes escenarios, para el periodo 2016-2035 (Barros et al., 2015).

Por lo tanto, se considera necesario destacar que los resultados hallados en cuanto a la distribución de las zonas más aptas para el nogal pecán, afectadas por la distribución de

las temperaturas máximas del mes más cálido, podrían verse modificadas al utilizar como fuente datos climáticos correspondientes a periodos más recientes. De la misma forma, en el contexto de cambio climático, si se realizara una predicción en base a proyecciones futuras las zonas más aptas podrían resultar diferentes a los resultados hallados en este trabajo para el periodo 1970-2000.

4.1.1.3. Temperatura mínima del mes más frío

Las temperaturas mínimas del mes más frío tuvieron valores mínimos de $-19,9^{\circ}\text{C}$ y máximos de $7,5^{\circ}\text{C}$, distribuyéndose los menores valores del rango en las zonas más altas del área de estudio (PrePuna y Puna), y los mayores valores hacia el centro y sudeste de la provincia (figura 3.3a). Al analizar las zonas con valores de aptitud más altos en el mapa del factor Tmin (figura 3.3b) puede observarse que estos se distribuyen principalmente en el Valle Central y en la región Este, donde las temperaturas se encuentran alrededor de un óptimo de $7,2^{\circ}\text{C}$ (Sparks, 1993). Todas las locaciones con temperaturas por debajo de $0,6^{\circ}\text{C}$ presentaron valores de aptitud 0, dado que por debajo de este umbral se produce daño por frío en el nogal pecán (Sparks, 1997).

Los puntos de inflexión aplicados y el tipo de función utilizados en la estandarización fuzzy se relacionan con los requerimientos del cultivo y con la naturaleza de la variable. En general para la estandarización de variables climáticas se aplica una función sigmoidea simétrica (Garfias-Salinas et al., 2012), la cual consta de cuatro puntos de inflexión (Eastman, 2012). Dada la necesidad de establecer estos cuatro puntos para la obtención del mapa del factor Tmin (figura 3.3b), se tuvieron en cuenta valores de temperaturas que afectan los procesos fisiológicos que se dan en las especies caducifolias durante el descanso invernal. En este sentido, para evitar daños por heladas, se conoce que los árboles caducifolios solo reanudan su crecimiento cuando termina la estación fría, y para determinar este momento, han desarrollado como mecanismo de detección el requerimiento de horas de frío (Luedeling, 2012). Para el cálculo del requerimiento de frío invernal, se utiliza como temperatura base $7,2^{\circ}\text{C}$, es decir se suman las horas con temperaturas por debajo de $7,2^{\circ}\text{C}$ (Luedeling et al., 2009). También, se considera que las temperaturas por debajo de 0°C no aportan a la acumulación de frío y se las excluye para el cálculo, es decir, se suman las horas entre 0°C y $7,2^{\circ}\text{C}$ (Luedeling, et al., 2009).

Por otro lado, Sparks (1997), señala 0,6°C como la temperatura por debajo de la cual se produce daño por frío para el nogal pecán, y Peterson (1990) señala 10°C como la temperatura máxima que se alcanza en la zona nativa del nogal pecán en época invernal.

De esta forma 0,6 °C fue asignado como punto de inflexión *a*, por debajo del cual la aptitud es 0, y 7,2°C como puntos de inflexión *b* y *c*. Entonces, entre 0,6°C y 7,2°C todas las locaciones tomaron valores crecientes de aptitud entre 0 y 255, y por encima de 7,2°C y hasta 10°C tomaron valores decrecientes hasta hacerse 0. Dado que las temperaturas mínimas del mes más frío para la provincia de Catamarca estuvieron por debajo de 7,5°C (figura 3.3a) y no se alcanzaron valores de 10°C, todas las locaciones que resultaron no aptas correspondieron únicamente a aquellas con temperaturas por debajo del punto de inflexión *a* (0,6 °C), ya que no existieron locaciones con temperaturas por encima del punto *d* (10°C).

Las consideraciones acerca del impacto del cambio climático en las temperaturas máximas del mes más cálido (factor Tmax), son válidas también para el factor Tmin. Al igual que el factor Tmax, Tmin se modeló utilizando el modelo WorldClim para el periodo 1970-2000. Por lo tanto, teniendo en cuenta las proyecciones acerca de los efectos del cambio climático sobre las temperaturas a nivel regional (Barros et al., 2015), podría decirse que si se evaluara la aptitud de las temperaturas mínimas del mes más frío teniendo en cuenta estas proyecciones la distribución de las áreas aptas se verían modificadas, por el aumento de las temperaturas proyectadas para el periodo 2016-2035 por Barros et al. (2015).

Este aumento en las temperaturas máximas y mínimas producto del cambio climático, ha sido asociado con el aumento de la duración del periodo de desarrollo del cultivo en el estado de Nuevo México (Estados Unidos) durante los años 1950 y 2019 (Mokari et al., 2021). Se considera que esta situación podría impactar negativamente sobre la producción de nogal pecán en zonas áridas y semiáridas donde la disponibilidad de recursos hídricos sea limitante (Mokari et al., 2021).

4.1.1.4. Precipitaciones anuales

Para la estandarización fuzzy de la variable precipitaciones medias anuales, se aplicó una función sigmoidea simétrica, la cual como se señaló anteriormente, presenta cuatro

puntos de inflexión (Eastman, 2012); los puntos se asignaron de acuerdo a los requerimientos establecidos para el nogal pecán. De acuerdo a Sparks (2005) el requerimiento de precipitaciones es de 1000 a 1300 mm anuales, y según Peterson (1990) en la zona originaria de la especie se dan entre 760 a 2010 mm anuales. Por estos motivos, en la estandarización se asignaron los siguientes puntos de inflexión: $a= 760$ mm; $b= 1000$ mm; $c= 1300$ mm; $d= 2010$ mm. De esta manera todas las locaciones que presentaron precipitaciones por debajo de 760 mm, y por encima de 2010 mm se consideraron no aptas.

Dado que las precipitaciones anuales para la provincia de Catamarca estuvieron por debajo de los 771 mm anuales, la totalidad del área de estudio resultó no apta para este factor (figura 3.4b), con excepción de algunos píxeles que por la resolución espacial resultan insignificantes. Es decir, todas las locaciones estuvieron por debajo del requerimiento del nogal pecán establecido en un mínimo de 760 mm (Peterson, 1990). por lo que el área de estudio se encuentra con un déficit marcado para la producción de nogal pecán en secano.

Un aspecto importante a tener en cuenta respecto a las precipitaciones es su estacionalidad. La provincia de Catamarca presenta, de oeste a este, un clima que va de árido a semiárido (Vigo, 2010), y las precipitaciones se distribuyen mayormente durante los meses estivales (Palmieri et al., 2005; Vigo, 2010), entre diciembre y marzo (Vigo, 2010). Esto coincide parcialmente con el periodo de desarrollo del cultivo, que normalmente en el Valle Central de Catamarca inicia con la brotación en el mes de septiembre y termina hacia fines de mayo con el inicio del amarillamiento de hojas (Delgado & Carabajal, 2018). Si bien todas las etapas fenológicas del cultivo tienen la misma importancia respecto de las necesidades de agua, los déficits hídricos que se den durante las etapas de floración, cuajado y expansión del fruto, y desarrollo y llenado de la almendra, pueden tener efectos significativos en términos productivos (Madero et al., 2016). Normalmente todas estas etapas se dan entre noviembre y mediados de marzo en el Delta del Paraná (Madero et al., 2016), mientras que Delgado & Carabajal (2018) informaron que las etapas fenológicas se dan 30 días antes en la zona del Valle Central de Catamarca. Por esta razón podría inferirse que el periodo de mayor demanda de precipitaciones en el área de estudio se da a partir del mes de octubre.

El suministro adecuado de agua es crucial para una producción óptima, por lo cual la gran mayoría de los huertos de nogal pecán en climas áridos y semiáridos dependen del riego complementario (Ibraimo et al., 2016). A pesar de existir en el área de estudio un periodo de coincidencia entre la oferta de precipitaciones y el requerimiento del cultivo, las precipitaciones resultan insuficientes y por lo tanto es necesario complementar con riego, coincidiendo esto con lo informado por Gómez & Cruzate (2007) y Delgado & Carabajal (2018). Los aspectos relacionados a la disponibilidad de fuentes de agua para riego se discuten más adelante, en la sección 4.1.4.

Otro aspecto a tener en cuenta con respecto a las precipitaciones anuales, es la variación interanual y la variación prevista en el contexto del cambio climático. Si bien en el noroeste de Argentina y para el período abarcado entre los años 1961 y 2020, las precipitaciones anuales se redujeron en un orden de -10 y -25 mm (SMN, 2023), las proyecciones realizadas en el contexto del cambio climático no muestran cambios significativos en las precipitaciones anuales para esta región, para los periodos 2016-2035 y 2081-2100, aunque existe una tendencia a la reducción (Barros et al., 2015; Camilloni, 2018). Por estos motivos, se considera que la distribución de la aptitud del factor Pp (figura 3.4b) modelado a partir de datos de WorldClim para el periodo 1970-2000 no debería verse modificada significativamente, si se tuvieran en cuenta las tendencias observadas por el Servicio Meteorológico Nacional para el periodo 1961-2020 (SMN, 2023), y con las proyecciones previstas para los periodos 2016-2035 y 2081-2100 (Barros et al., 2015).

4.1.2. Factor suelos

En este apartado se discuten los resultados obtenidos para el modelado cartográfico de las variables edáficas y del factor suelos obtenido por puntaje de clasificación omega (PCE) y estandarización fuzzy.

La clasificación de las variables edáficas se realizó en base a una adaptación de la metodología FAO (1976) propuesta por Salvatore et al. (2019), asignando índices de aptitud de manera cualitativa en función de la capacidad de producir los rendimientos alcanzables para el nogal pecán (cuadro 2.8). Esto se determinó en función de los requerimientos de la especie.

Posteriormente a la clasificación de todas las variables, se sintetizaron los valores de aptitud asignados en una única capa de factores edáficos, denominada factor suelos, a través de la aplicación de PCE. La finalidad de este paso fue unificar un índice de aptitud para cada unidad espacial, que exprese las aptitudes conjuntas de todas las variables, donde 0 resultó la peor situación, y 100 la mejor (Buzai, 2015).

4.1.2.1. Anegamiento

Dado que la capa vectorial de suelos de Catamarca no contó con datos descriptivos para la variable anegamiento, las unidades cartográficas se clasificaron en base a la posición en el paisaje que presentaba cada una. De esta manera, los sectores considerados sin riesgo de anegamiento a los cuales se les asignó las mejores categorías de aptitud fueron: sectores medio, apical, o superior de cono, llanuras y llanuras extendidas, planicies arenosas, explanadas, lomas, laderas escarpadas, laderas empinadas y pendientes escarpadas.

Gómez & Cruzate (2007) definieron dos niveles de riesgo para determinar la aptitud de los suelos de Argentina para la producción de nogal pecán: sin peligro a muy poco anegable, y otros (1 y 0, respectivamente). La clasificación propuesta en este trabajo, permitió clasificar el riesgo de anegamiento en cinco clases de aptitud (cuadro 2.12), logrando un mayor nivel de detalle en la diferenciación de los grados de riesgo existentes a nivel provincial. Dadas las características del relieve predominante en la provincia de Catamarca, compuesto en un 78% por áreas montañosas (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004), estas se corresponden con las zonas clasificadas como muy aptas; en este tipo de unidades no existe riesgo de anegamiento. En el resto del territorio provincial, compuesto por valles y bolsones, el riesgo de anegamiento se relaciona con la pendiente del terreno y su posición en el paisaje, por lo cual en áreas planas la aptitud se consideró menor que en aquellas áreas donde existen pendientes pronunciadas. El dato del grado de las pendientes se consultó en la tabla de atributos de la capa suelos de Catamarca (INTA, 2011), en las columnas correspondientes a las limitaciones primarias, secundarias y terciarias (ver anexo IIa).

4.1.2.2.Drenaje

Dado que en la provincia de Catamarca predominan condiciones de aridez (Nuñez-Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004), este criterio se clasificó asignando los rangos más bajos de aptitud a las unidades con drenaje excesivo y baja retención de humedad. La clasificación de las áreas no aptas y marginalmente aptas principalmente se relacionó con la existencia de pendientes pronunciadas que se dan en las laderas empinadas. Esto genera condiciones de drenaje excesivo por velocidad de escurrimiento acelerada (Puchulu & Fernández, 2017). Por otro lado, los suelos con drenaje deficiente y escasa permeabilidad, también considerados no aptos, coincidieron con aquellos del orden Natracualf (Panigatti, 2010) presentes en la cuenca Salar de Pipanaco (Puchulu & Fernández, 2017). También se dio, en el caso de las áreas marginalmente aptas, que los suelos presentaron drenaje excesivo y baja retención de humedad por la textura gruesa que presentaron (INTA, 2011). De la misma manera que la clasificación para el criterio anegamiento, los afloramientos rocosos, salinas y lagunas también se clasificaron como no aptos para drenaje, puesto que no son considerados suelos (Puchulu & Fernández, 2017).

Por otro lado, las áreas muy aptas fueron aquellas que presentaron drenaje bueno y ningún tipo de limitación (INTA, 2011), y correspondieron a unidades con pendientes bajas a moderadas, planicies y conos de deyección con bajo riesgo de erosión hídrica (Panigatti, 2010).

A diferencia de lo realizado por Gómez & Cruzate (2007), quienes definieron dos categorías para clasificar el drenaje, en este trabajo se logró una mayor diferenciación de categorías, apropiado para la escala de trabajo provincial. No obstante, los resultados hallados en cuanto a la clasificación de la categoría muy apto coinciden con la distribución espacial de los suelos bien drenados obtenida por dichos autores.

4.1.2.3.Profundidad

En la capa suelos de Catamarca, la variable profundidad presentó valores que se encontraron entre 0 y 120 cm (anexo IIa) (INTA, 2011). De acuerdo a la clasificación aplicada (cuadro 2.9), y al igual que las variables anegamiento y drenaje, las unidades cartográficas correspondientes a afloramientos rocosos, lagunas y salinas se clasificaron como no aptas. Las planicies, planos aluviales y sectores medios, apicales e inferiores de

cono, donde las profundidades fueron superiores a 80 cm fueron las únicas consideradas aptas y muy aptas. Estas áreas, representaron alrededor de un 45% de la superficie provincial (Trabichet, 2020). Esto se justifica teniendo en cuenta que dado que el nogal pecán es un árbol frutal que puede llegar a medir alrededor de 12 metros de altura en plantaciones comerciales (Sammis et al., 2004), no se recomienda su plantación en suelos poco profundos, con un requerimiento mínimo de 100 cm de profundidad (Herrera, 1999).

Al comparar los resultados hallados para la clasificación de la aptitud de esta variable con la realizada por Gómez & Cruzate (2007), quienes definieron tres clases de aptitud, se da una coincidencia en la distribución de los suelos profundos y la distribución de la categoría muy apto.

4.1.2.4.Rocosidad

Para la variable rocosidad algunas unidades cartográficas presentaron como descripción la expresión “interfiere en la labranza”, mientras que otras unidades no presentaron ningún dato (INTA, 2011). Para realizar una clasificación y asignación de aptitud, entonces se tuvieron en cuenta las descripciones de las unidades cartográficas del Atlas de Suelos de la República Argentina (Panigatti, 2010; SAGyP-INTA, 1990) y las limitaciones primarias, secundarias y terciarias de la capa Suelos de Catamarca (INTA, 2011). Se analizó la presencia de rocas en los perfiles de suelos que componen cada unidad, tomando como referencia también las descripciones de los epipedones y horizontes diagnósticos de la Clave para Taxonomía de Suelos de USDA (USDA, 2014).

Las unidades clasificadas como muy aptas y aptas, resultaron ser aquellas correspondientes a explanadas y planicies, sin limitantes por pedregosidad (anexo IIc). De la misma manera, Morales-Poclava et al. (2015) clasificaron con los mayores índices de aptitud a los suelos de Salta y Jujuy que presentaron pedregosidad menor al 15%, considerando como criterio la no interferencia en la labranza. En base a estos criterios, la distribución espacial de estas clases de aptitud representó alrededor de un 11% de la superficie provincial (Trabichet, 2020). Por otro lado, las áreas no aptas, que representaron más del 45% de la superficie provincial (Trabichet, 2020), se distribuyeron en las unidades cartográficas correspondientes a salinas, lagunas y afloramientos rocosos, y en las unidades cuya descripción indicó presencia de más de 35% de rocas en el perfil,

o interferencia en las labranzas dentro de la tabla de atributos de la capa suelos de Catamarca (INTA, 2011).

4.1.2.5.Salinidad

Esta variable representó las limitaciones existentes por salinidad y/o alcalinidad y se clasificó teniendo en cuenta las descripciones referidas a estos parámetros, y a las limitantes primarias, secundarias y terciarias. Si bien se propuso definir cinco clases de aptitud (cuadro 2.8), solo se pudieron definir tres categorías: muy apto, marginalmente apto y no apto (cuadro 2.13). En la tabla de atributos de la capa suelos de Catamarca la alcalinidad se encontró clasificada de la siguiente forma: sin datos, no sódico, débil, fuerte, moderada, muy fuerte, poca (INTA, 2011). Las limitaciones primarias, secundarias y terciarias presentaron la información acerca de la existencia o no de problemas por salinidad. La clasificación se realizó teniendo en cuenta que según Herrera (1999) el pecán tiene un requerimiento de suelos no salinos a débilmente salinos, y considerando como no aptos a todas las unidades que presentaron diferentes grados de alcalinidad.

A diferencia de lo realizado en este estudio, Gómez & Cruzate (2007), analizaron la salinidad y la alcalinidad de las unidades cartográficas por separado, clasificando como no aptos a los suelos moderadamente salinos a fuertemente salinos, y a los que presentaron porcentaje de sodio intercambiable mayor a 15%. Sin embargo, los resultados en la distribución de zonas aptas coinciden parcialmente con los hallados en este trabajo.

4.1.2.6.Textura

Gómez & Cruzate (2007), clasificaron la textura de los suelos de Argentina en tres clases de aptitud para la producción de nogal pecán. En primer lugar y con la aptitud mayor seleccionaron a los suelos con texturas francas, coincidiendo con el criterio aplicado en este trabajo. En segundo orden de importancia seleccionaron los suelos con texturas franco-arcillosa, franco-arenosa, y franco-arcillo limoso. Por último, clasificaron con la aptitud más baja a los suelos arcillosos, arenoso-franco, arenoso. Esta clasificación coincide en parte con lo hallado en este trabajo, donde se presentó una mayor diferenciación de clases de aptitud: los extremos entre muy apto y no apto resultan

similares para ambas clasificaciones. Es decir, las texturas francas fueron las consideradas más aptas, y las texturas más gruesas, que pueden implicar problemas por baja retención hídrica (Morales-Poclava et al., 2015) fueron consideradas no aptas (Gómez & Cruzate, 2007).

4.1.2.7. Puntaje Omega y factor suelos

La aplicación del PCE Omega cumplió con el objetivo de generar una capa síntesis que representó los valores de aptitud obtenidos para cada unidad cartográfica, en función de la clasificación aplicada a cada variable por separado. A través de este procedimiento, los puntajes de las variables se promediaron y se compensaron. De esta forma la capa síntesis, denominada puntaje omega, presentó valores de aptitud en una escala de 0 a 100, en donde 0 y 100 representan la peor y la mejor situación, respectivamente (Buzai, 2015).

Los mejores suelos se localizaron donde se distribuyeron las mejores clases de aptitud para la mayoría de las variables edáficas. De esta manera, la mejor situación respecto de todas las variables, y por lo tanto para el puntaje omega, se dio en el departamento de Santa Rosa, donde las variables fueron clasificadas como muy aptas y el puntaje omega llegó a 100. Esto coincide en parte con lo hallado por Gómez & Cruzate (2007), quienes clasificaron los suelos en esta zona como aptos. La diferencia puede explicarse teniendo en cuenta que estos autores también consideraron los regímenes de humedad y de temperaturas de los suelos para realizar la clasificación; por lo tanto, y dado que el régimen de humedad para los suelos de la provincia de Catamarca es arídico, estos no alcanzan la mayor categoría de aptitud (Gómez & Cruzate, 2007).

En las áreas correspondientes a la Puna y PrePuna, el puntaje omega tomó valores de intermedios a bajos, y las mayores limitaciones se presentaron para las variables rocosidad, salinidad, profundidad y textura. Gómez & Cruzate (2007) clasificaron estas zonas como no aptas para la producción de pecán, y el resto del territorio provincial como marginal, a excepción del área correspondiente al departamento de Santa Rosa y un sector de la cuenca Salar de Pipanaco sobre la localidad de Pomán.

El factor suelos se obtuvo estandarizando el puntaje omega aplicando función lineal creciente. Esta función también ha sido aplicada para estandarizar variables edáficas, por

ejemplo, para estandarizar el índice de productividad de los suelos de INTA para la cuenca media del río Luján (Montes-Galbán, 2022). Los puntos de inflexión que se aplicaron fueron $a=0$, y $b=100$; es decir que a las locaciones que presentaron puntaje omega 0 se les asignó el valor 0 de aptitud, y a las que presentaron puntaje 100, se les asignó valor de aptitud 255. De esta manera la capa quedó estandarizada en valores que van de 0 a 255 (de menor a mayor aptitud locacional), y se pudo utilizar como insumo para la combinación lineal ponderada, para la obtención del mapa de aptitud para producir pecán en la provincia de Catamarca.

4.1.3. Altura sobre el nivel del mar

La variable elevación, ha sido empleada en la determinación de la aptitud para distintos tipos de usos agropecuarios o productivos (Pilevar et al., 2020; Tercan & Dereli, 2020). En general, se trata de una variable que suele analizarse en conjunto con otros factores topográficos, como el aspecto y la pendiente (Mokarram & Mirsoleimani, 2018; Pilevar et al., 2020; Xue et al., 2023). Por ejemplo, Mokarram & Mirsoleimani (2018) determinaron que la elevación máxima deseable para la producción de Citrus en Fars (Irán) es de 700 m.s.n.m, asociado a pendientes máxima de 26%. Asimismo, Xue et al. (2023) determinaron la aptitud para la producción de arroz en la provincia de Hubei (China), en función de varios factores, incluyendo los factores topográficos elevación y pendiente. Estos autores, relacionaron los factores topográficos con la distribución de los tipos de suelos y con la variación de las condiciones climáticas. No obstante, los incluyen como factores individuales en el procedimiento de la evaluación multicriterio, asignándoles una ponderación individual independiente de otros factores (Mokarram & Mirsoleimani, 2018; Pilevar et al., 2020; Tercan & Dereli, 2020; Xue et al., 2023).

En este trabajo, la variable altura ha sido incluida como un factor individual en la determinación de la aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca. No obstante, se le asignó un valor de ponderación bajo en la combinación lineal ponderada (cuadro 2.3), debido a que se consideró que su análisis individual no brinda un aporte significativo. Es decir que la altura sobre el nivel del mar como un factor individual no condiciona directamente el éxito del cultivo, sino que lo hace indirectamente a través de su influencia sobre los factores climáticos, los cuales se analizaron independientemente.

Por otro lado, es importante destacar que la altura máxima seleccionada para la estandarización fuzzy por encima de la cual las locaciones resultaron no aptas, excluye de las áreas aptas a algunas zonas en las que actualmente se produce nogal europeo. En Catamarca, los principales productores a nivel provincial son los departamentos de Belén, Ambato y Pomán, que se encuentran entre los 898 y 1236 m.s.n.m., pero también existen productores nogaleros en áreas por encima de los 1326 m.s.n.m.: por ejemplo, en Tinogasta y Santa María, con elevaciones de 1500 y 1900 m.s.n.m., respectivamente (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004). Estas elevaciones también podrían resultar propicias para el cultivo de nogal pecán, con cultivares adaptados a periodos de crecimientos más cortos que escapen al riesgo de heladas tardías (Sparks, 1997).

Asimismo, se debe tener en cuenta que los valores de referencia utilizados para estandarizar la variable altura sobre el nivel del mar, provienen de New México, un área localizada a una mayor latitud que la provincia de Catamarca (34° latitud Norte, versus 28° de latitud Sur, respectivamente). Teniendo en cuenta que la temperatura de la superficie de la tierra, es una variable fuertemente influenciada por varios factores, entre los cuales se encuentran la latitud y la elevación (Almonacid et al; 2022), es de esperar que, para misma altitud, Catamarca presente temperaturas mayores, en comparación con New México. Esto implicaría la posibilidad de extender las áreas productivas a mayores altitudes que 1326 m.s.n.m., dentro del territorio de la provincia de Catamarca.

Por todo lo anteriormente expresado, para próximos estudios resultaría interesante modificar los puntos de inflexión aplicados en la estandarización fuzzy, en pos de incluir las zonas nogaleras como zonas candidatas para la producción de pecán; no obstante, el interés de introducir el cultivo de nogal pecán en la provincia de Catamarca, se basa en su menor requerimiento de frío respecto del nogal europeo, lo cual brindaría la posibilidad de expandir las zonas nogaleras hacia zonas más cálidas (Delgado & Carabajal, 2018).

Por otro lado, se considera interesante también incorporar la variable pendiente para analizar la aptitud de las tierras en función de este parámetro, considerando que el grado de pendiente afecta la posibilidad de laboreo del suelo y el riesgo de erosión (Xue et al., 2023).

4.1.4. Disponibilidad de recursos hídricos para riego

El análisis de las áreas con disponibilidad de recursos hídricos superficiales para riego, se realizó bajo el supuesto de que, en todas las zonas donde existen o existieron cultivos en áreas aledañas a los cursos de agua, es posible regar en base al aprovechamiento de estos. Las áreas con disponibilidad de recursos hídricos superficiales incluyeron parcelas con cultivos actuales, así como también parcelas desocupadas, parcelas desmontadas abandonadas, o cultivos abandonados (Ahumada, 2018). Estas fueron identificadas a partir de la interpretación visual del mosaico Landsat OLI RGB:564, aplicando los criterios descritos en el cuadro 2.16 de la sección 6.1.4.2 (Chuvienco, 2010), y empleando como capa de control de terreno la imagen de Google Hybrid, la cual presentó una mayor resolución espacial y permitió un análisis con mayor nivel de detalle (figura 4.3). De esta manera, las áreas cultivadas aledañas a los cursos de agua se identificaron con colores rojizos en patrones de diseño geométricos de lotes pequeños en la imagen Landsat. La fenología también resultó importante para identificar cultivos, por lo cual se seleccionó para este trabajo descargar imágenes en un periodo de tiempo que correspondió al verano, entre enero y febrero, en donde la mayoría de los cultivos agrícolas de verano y frutícolas se encuentran en periodos fenológicos de plena actividad y alcanzan un porcentaje alto de cobertura del suelo. Los polígonos digitalizados fueron clasificados en función de las características de los cursos de agua que los riegan, de acuerdo a la información presentada en el anexo IIIa.

Con respecto a la digitalización de los recursos hídricos subterráneos, esta se realizó tomando como capas bases los mapas presentados en el anexo IIIa, obtenidos de los antecedentes bibliográficos que allí se citan. La información hallada no resultó similar para todas las cuencas hidrográficas, dado que a la actualidad los estudios sobre la calidad y disponibilidad de acuíferos no presentan el mismo nivel de detalle para todo el territorio provincial (ver anexo IIIa). No obstante, la información hallada permitió modelar los mapas de distribución de los recursos de agua subterráneos, y caracterizarlos en función de su disponibilidad y calidad físico-química.

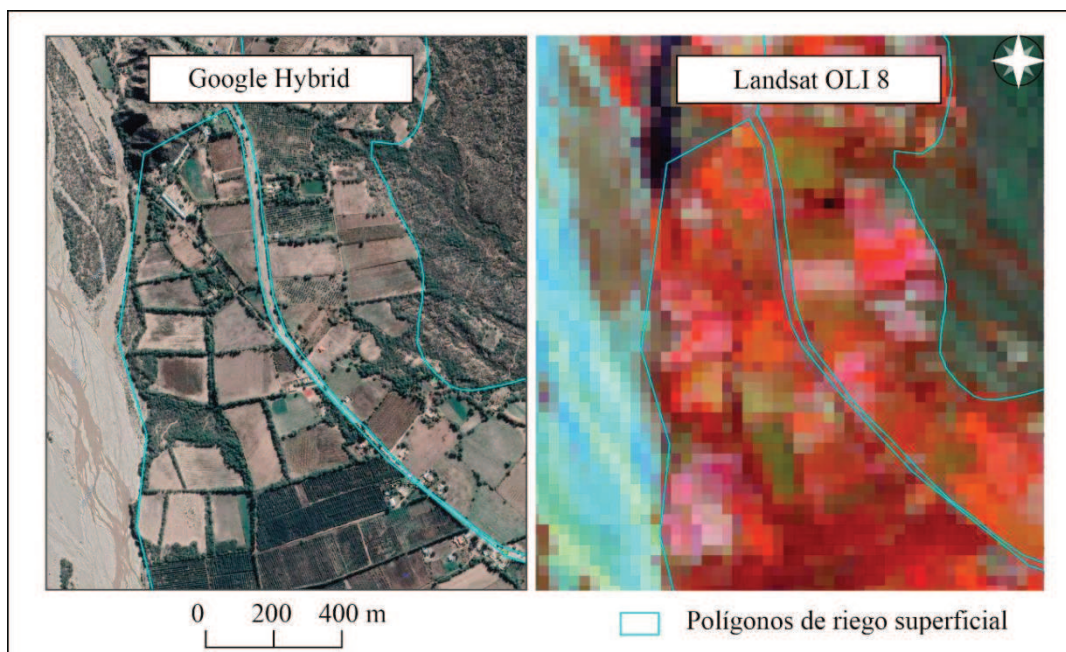


Figura 4.3: polígonos de riego digitalizados y detalle de visualización de pantalla con diferentes resoluciones espaciales (Google Hybrid versus Landsat OLI 8).

Un detalle importante a tener en cuenta, es que pueden existir diferencias en los volúmenes de agua que se pueden extraer, de forma de realizar un manejo sustentable del recurso hídrico para riego en cada una de las cuencas (Bucich et al., 2011). De hecho, en los casos en que se conocen los caudales que se pueden extraer, se recomienda realizar ensayos de bombeo para determinar las características hidráulicas del acuífero explotado y controlar, al menos cada dos años, la calidad del agua extraída por las perforaciones (Torres et al., 2015). Debido al clima árido a semiárido que se presenta en la provincia de Catamarca, y a que la recarga se da por las precipitaciones en las áreas serranas (Batistella et al., 2016; Bucich et al., 2011; Torres et al., 2013, 2015), esta recarga generalmente puede resultar muy baja, por lo cual el riesgo de sobreexplotación podría resultar elevado (Fernández-Turiel et al., 2008). Por lo tanto, se debe destacar la importancia de realizar un manejo sustentable del recurso hídrico (Bucich et al., 2011; Fernández-Turiel et al., 2008; Torres et al., 2015). Respecto a esto, se recomienda la evaluación del comportamiento hidrológico de los reservorios subterráneos en cada una de las cuencas, para asegurar la sustentabilidad actual de la extracción de agua subterránea y evaluar las disponibilidades de los recursos para satisfacer requerimientos de futuros emprendimientos agrícolas (Torres et al., 2015).

De todos modos, la información disponible permitió determinar que existe agua disponible para riego en el área de estudio (Bucich et al., 2008; Bucich et al., 2011; Torres

et al., 2013, 2015). En tal sentido, estas áreas potenciales de riego en la provincia de Catamarca ocupan una superficie de 429.576,06 ha, lo cual representa el 56% de la superficie de las áreas más aptas delimitadas en el mapa final de aptitud (correspondientes a las categorías muy apto, apto y moderadamente apto). A su vez, una proporción de estas tierras (147.896,28 ha) se encuentran ocupadas por otros cultivos, dejando libres para la expansión del cultivo de nogal pecán (u otros usos agrícolas) un total de 280.551,31 ha.

Con respecto a la calidad físico-química del agua para riego, algunos de los recursos disponibles presentan riesgos de salinización o sodificación. En este sentido, el nogal pecán es considerado como un cultivo sensible a la salinidad del agua de riego y del suelo (Grageda-Grageda et al., 2011); no obstante, ello no impide su cultivo en zonas áridas y semiáridas, donde las condiciones de salinidad del suelo se generan por las bajas precipitaciones y el ascenso de sales por capilaridad (Grageda-Grageda et al., 2011). Por estos motivos, los recursos hídricos que presentan algún grado de riesgo de salinidad podrían ser aprovechados para el riego, siempre y cuando se realicen las obras de drenaje adecuadas (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

4.1.4.1. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Abaucán

En esta cuenca fue posible delimitar únicamente áreas aptas y moderadamente aptas, debido a la presencia de recursos subsuperficiales con buena calidad de agua, coincidiendo con la presencia de cursos de agua salinos/sódicos (Paoli, 2003), y con cursos de agua cuyas obras de riego requieren de obras de mantenimiento (Nuñez-Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004). Estos recursos actualmente se explotan principalmente para abastecimiento de las poblaciones y para riego de cultivo de vid (Torres et al., 2013) y podrían ser considerados para el riego del cultivo de nogal pecán, teniendo la precaución de realizar obras de drenaje adecuados para evitar riesgos de salinización del perfil (Grageda-Grageda et al., 2011).

4.1.4.2. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca Salar de Pipanaco

En las subcuencas Belén y Andalgalá, se delimitaron áreas aptas y marginalmente aptas, debido a que solo se contó con disponibilidad de ríos con cursos permanentes y temporarios. En la subcuenca Belén, por ejemplo, los cultivos se riegan únicamente con

recursos hídricos superficiales (Paoli, 2003) y se carece de datos de profundidad y consecuentemente de cotas del agua subterránea para toda la extensa zona medanosa occidental surcada por los ríos Belén y Londres (Bucich et al., 2011). Tampoco existe actualmente información acerca de la factibilidad de realizar perforaciones en esta zona.

Por otro lado, en el departamento de Pomán, se delimitaron áreas muy aptas, debido a la coincidencia de disponibilidad de agua subterránea de buena calidad para riego (Fernández-Turiel et al., 2008), con la presencia de cursos de agua no permanentes. Todos estos cursos son aprovechados para el riego de cultivos de nogal, vid, aromáticas, y otros frutales (Tálamo et al., 2016). Sin embargo, se debe tener en cuenta que, aunque la mayor parte de estas aguas son aptas para todo tipo de usos, tienen una tendencia a la sodificación, por lo cual deberían manejarse cuidadosamente para evitar riesgos inherentes a la irrigación con aguas con alta relación de absorción de sodio (Fernández-Turiel et al., 2008).

4.1.4.3. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Santa María

En esta cuenca, los recursos hídricos fueron clasificados como muy aptos, por la coincidencia de la presencia de acuíferos de buena calidad, con cursos de agua no permanentes, principalmente en la parte más deprimida del valle de la cuenca (Ruiz & Tineo, 2014). También se delimitaron áreas moderadamente aptas, donde solo hay presencia de acuíferos. El río Santa María es el curso de agua principal en esta cuenca, de carácter temporario, y se aprovecha en forma intensiva tanto para consumo humano como para riego (Ruiz & Tineo, 2014), y podría ser utilizado para regar nogal pecán.

4.1.4.4. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca Valle Central (o Falda Oriental de Ambato)

Las áreas más aptas en esta cuenca se distribuyeron en las zonas donde existen acuíferos con aguas de calidad de buena a regular, de acuerdo a la conductividad eléctrica y a la relación de absorción de sodio (Bucich et al., 2008). Estos recursos principalmente se han utilizado para regar cultivos anuales y forrajeras (Ahumada, 2018), y podrían ser utilizados para regar nogal pecán. Por otro lado, en algunas zonas delimitadas como muy aptas, coincidieron la presencia de acuíferos con la presencia del río Del Valle, de régimen permanente y considerado el más caudaloso de toda la provincia de Catamarca (Nuñez-

Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004). Los caudales de este río son regulados por el dique Las Pirquitas, y proveen de agua de riego de buena calidad (Denim, 2013) a las colonias de Nueva Coneta y del Valle, en el departamento de Capayán, donde se cultivan cítricos, nogales, hortalizas, y cultivos forrajeros (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

4.1.4.5. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca Falda Oriental de Ancasti

Dado que en esta cuenca hay presencia de cursos de agua superficiales regulados por diques (INA, 2010), y acuíferos con agua de buena calidad para riego (Bucich et al., 2011), se pudieron delimitar áreas correspondientes a las tres categorías más altas de aptitud. Las áreas más aptas se localizaron en las colonias el Alto y Collagasta, coincidiendo con la presencia de áreas donde se cultivan hortícolas, frutales y forrajeras (INA, 2010), por lo cual podrían considerarse estos recursos también apropiados para regar el cultivo de nogal pecán.

4.1.4.6. Disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca Santa Rosa (o Laguna Mar Chiquita)

Al igual que en la cuenca Falda Oriental de Ancasti, en la cuenca Santa Rosa se pudieron delimitar áreas correspondientes a las tres categorías más altas de aptitud. Las áreas correspondientes a las colonias Alijilán-Manantiales y Los Altos, donde se producen forrajeras, hortalizas y frutales (INA, 2010), regados a partir de los cursos regulados por los diques La Cañada y Sumampa (Batistella et al., 2016; Torres et al., 2015), fueron consideradas muy aptas, dado que allí coinciden la disponibilidad de cursos superficiales y subterráneos. Con respecto a estos últimos, la zona de mayor desarrollo de los acuíferos explotables se desarrolla en el centro geográfico de la cuenca (Batistella et al., 2016; Segura et al., 2019), y la extracción de agua subterránea por bombeo de pozos, responde a la necesidad de riego complementario para las explotaciones agrícolas, donde el riego se realiza principalmente con sistema de aspersión a pivote central (Batistella et al., 2016). Debe tenerse en cuenta que la calidad de estas aguas para riego, de acuerdo a su conductividad eléctrica es de clase C2 y C3, es decir que poseen una peligrosidad salina entre media y moderada según el criterio del laboratorio del Riverside, estableciéndose las zonas más aptas para el uso de agua para riego en el área central de la cuenca (Torres et al., 2015).

4.1.5. Restricciones territoriales

Las restricciones territoriales fueron aplicadas con la finalidad de confinar los resultados a un sector delimitado del área de estudio (Buzai & Baxendale, 2011; Lanzelotti & Buzai, 2015). Los tres mapas de restricciones modelados representaron limitaciones territoriales para la implantación del cultivo de nogal pecán, ya sea porque se correspondieron con áreas urbanas impermeabilizadas, o porque implicaron una limitación legal para ello.

En el caso de la capa centros poblados de la provincia, se trató de zonas impermeabilizadas y urbanizadas donde no es posible establecer una plantación de nogal pecán a nivel comercial. Por otro lado, las capas Ley de bosques (Ley 5311 de ordenamiento ambiental y territorial del bosque nativo) (2010) y Áreas protegidas, representaron restricciones legales para la intervención del territorio.

De las tres capas de restricciones aplicadas, la que presentó menor proporción de tierras no aptas fue la capa centro poblados (figura 3.10b). De un total de 101.486,67 km² de superficie que tiene la provincia de Catamarca, solo 116,77 km² resultaron no aptos (cuadro 3.1); estos sectores correspondieron a las áreas cubiertas por centros poblados, en distintas densidades edilicias.

De acuerdo al censo nacional poblacional 2022 (INDEC, 2023), la provincia de Catamarca tiene una población de 429.556 habitantes, y una densidad poblacional baja, de 4,23 habitantes por km², si se la compara con la provincia de Buenos Aires que tiene 57,51 habitantes por km². Mayormente estas poblaciones se concentran en la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca (aproximadamente un 53% de la población provincial), y luego en los departamentos de Belén, Santa María, y Andalgalá. Estas densidades poblacionales se manifiestan en los radios censales de la capa vectorial radios censales de Catamarca (INDEC, 2015), donde cada polígono representa un total de 300 viviendas. Por esta razón, los polígonos correspondientes a los ejidos urbanos presentaron áreas más pequeñas que los de zonas rurales, debido a la disminución de la densidad poblacional. De esta forma, los polígonos de mayor tamaño, clasificados como rurales, se consideraron aptos para la producción de nogal pecán, puesto que se consideró que, al no presentar poblaciones que impidan el establecimiento del cultivo, se encuentran disponibles para ello (Salvatore et al., 2019).

Las capas Ley de bosques y áreas protegidas (figuras 3.10a y 3.10c, respectivamente), presentaron entre un 19 y un 15% de áreas no aptas, respectivamente (cuadro 3.1). Estas áreas se correspondieron con aquellas donde, por ley, está prohibida o regulada la intervención del territorio.

La ley de bosques N° 26.331 fue sancionada y promulgada por el Senado y la Cámara de Diputados de la Nación Argentina en 2007, e implementada en la provincia de Catamarca en el año 2010 (Ahumada, 2018). Las disposiciones de esta ley establecen los criterios para el Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos y la zonificación resultante en la Provincia de Catamarca; en función de esto se definen tres categorías:

“Categoría I (rojo): sectores de muy alto valor de conservación que deben mantenerse o ser mejorados. Están incluidas en esta categoría las formaciones boscosas y aquellas no boscosas que influyen sobre las áreas que sean esencialmente protectoras en su función, áreas de muy alto valor de conservación de bosques nativos donde pueden realizarse actividades de protección, mantenimiento, recolección, investigación, experimentación, turismo y ganadería que no sea de gran escala, siempre que no alteren los atributos intrínsecos de la formación boscosa y las cabeceras de cuencas hídricas.

Categoría II (amarillo): sectores de mediano valor de conservación, que pueden estar degradados pero que con la implementación de actividades de restauración pueden llegar a incrementar su valor de conservación y que pueden ser sometidos a los siguientes usos: aprovechamiento sostenible, aprovechamiento silvo-pastoril bajo monte, turismo, recolección, investigación y experimentación científica.

Categoría III (verde): sectores de bajo valor de conservación que pueden transformarse parcialmente o en su totalidad, con un cambio de uso de suelo que garantice los criterios de la ley. Se consideran por lo tanto incluidos dentro de esta categoría: bosques nativos de bajo valor de conservación que pueden transformarse totalmente sin alterar condiciones de sostenibilidad ambiental”.

Para la estandarización booleana de la capa Ley de bosques se tuvo en cuenta lo citado en el ARTICULO 9° de la ley 5311 (2010):

“no están autorizados los desmontes de bosques nativos en las superficies clasificadas como Categoría I y II, excepto para la ejecución de obras públicas, siempre que cuenten con la Evaluación de Impacto Ambiental aprobada, y se hayan cumplimentado los requisitos específicos de cada una de las categorías según corresponda. También pueden incorporarse en las áreas de aprovechamientos silvo-pastoril bajo monte (Categoría II), un porcentaje de la superficie para realizar siembras, implantación de especies pastoriles no invasoras o perjudiciales para el funcionamiento del bosque nativo que permitan recuperar o sostener a dicha actividad en épocas desfavorables”.

A los fines de este trabajo, entonces, se consideró que las tres categorías de ordenamiento territorial de la ley 5311 (2010) queden excluidas de las áreas aptas para plantar nogal pecán, puesto que se trata de una especie exótica originaria de Norte América que podría generar efectos negativos en la conservación de la biodiversidad originaria del bosque nativo. Por lo tanto, se reclasificaron los valores de cada categoría considerando dos opciones: no apto (0) para todas las categorías I, II y III, y apto (1) al resto de la superficie de la provincia.

Con respecto a las áreas protegidas, la provincia de Catamarca cuenta con la presencia de sitios RAMSAR, que son los que se utilizaron como fuentes de datos para el modelado de la capa áreas protegidas. Estos sitios, denominados Lagunas Altoandinas y Puneñas de Catamarca se ubican en los departamentos de Antofagasta de la Sierra, Belén y Tinogasta (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Argentina aprobó la Convención sobre los Humedales (conocida como Convención RAMSAR) en el año 1991 a través de la Ley Nacional 23.919 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021a). La misión de esta ley es la conservación y uso racional de los humedales mediante acciones locales, nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo. De acuerdo con lo establecido en el Anexo I de la Resolución 80/2021 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021b), el cual aprueba la creación del Programa de Humedales, se define que:

“Los humedales son los ambientes en los cuales la presencia de agua superficial o subsuperficial, de forma permanente o temporaria, da lugar a suelos o sustratos

característicos y organismos adaptados a esas condiciones. Engloban una variedad de ecosistemas tales como mallines, bañados, salares, turberas, lagunas, bosques fluviales, esteros y marismas, entre otros.

En los últimos años, a partir de la mayor comprensión de su funcionamiento e importancia, hay una valoración de estos ecosistemas y de los servicios ecosistémicos que brindan, que se traduce en iniciativas y regulaciones que promueven su conservación, uso sostenible e incorporación en los procesos de ordenamiento del territorio.

Son ecosistemas de importancia respecto del cambio climático, tanto para los procesos de mitigación como para los procesos de adaptación, ya que actúan como “infraestructura verde” para reducir el efecto de la contaminación, tormentas, inundaciones y sequías. Los múltiples beneficios y servicios que proporcionan los humedales contribuyen en forma directa o indirecta para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que integran la Agenda 2030 aprobada en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible en 2015.”

Por lo tanto, por ser consideradas áreas de alto valor de conservación, las locaciones correspondientes a las áreas protegidas resultaron no aptas (0) para la producción de nogal pecán. Por otro lado, el resto del territorio provincial se consideró apto (1).

El mapa de restricciones global (figura 3.10d) obtenido por multiplicación de las tres capas de restricciones, presentó 35.055,76 km² (cuadro 3.1). Esto representa un 34,5% del territorio provincial, lo que quiere decir que alrededor de un 65% de la superficie de la provincia de Catamarca no presentó restricciones territoriales para el cultivo de nogal pecán. En estas áreas aptas, es posible producir pecán, y los grados de aptitud que presenten las unidades espaciales libres de restricciones están determinadas por los factores involucrados en este estudio, variando entre 0 y 255 (Lanzelotti & Buzai, 2015).

La mayor influencia en la distribución espacial de las restricciones globales, la reflejan las restricciones individuales áreas protegidas y Ley de bosques.

4.2. Mapa de aptitud para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca.

El territorio de la provincia de Catamarca presentó diferentes grados de aptitud para la producción de nogal pecán. Estos grados de aptitud, se encontraron, en una primera instancia, en una escala de bytes, de 0 a 255; donde 0 representó el menor valor, y 255 el máximo (Eastman, 2012). Entre estos valores extremos, se dio un continuo de aptitudes con transiciones graduales del espacio (Ceballos-Silva & López-Blanco, 2010), donde las diferentes unidades de tierras presentaron diferentes niveles de aptitud (figura 3.11). Estos niveles, fueron el resultado de la combinación lineal ponderada (WLC) de los factores considerados para este estudio, multiplicados por sus respectivos valores de ponderación (cuadro 3.3), y de la aplicación de las restricciones territoriales globales modeladas.

Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, y el mapa fuzzy de aptitud para la producción de nogal pecán (figura 3.11), fue reclasificado en rangos de acuerdo a los conceptos teórico-metodológicos de FAO (1976) (cuadro 2.6). Este sistema de evaluación es un marco metodológico basado en la comparación entre las cualidades de las unidades de tierras y los requerimientos de un uso específico (Morales-Poclava et al., 2015), y ha sido utilizado y adaptado por diversos autores en la determinación de la aptitud de las tierras para distintos usos (Montes-Galbán, 2022; Morales-Poclava et al., 2015; Salvatore et al., 2019; Zolekar & Bhagat, 2015). Si bien la cantidad de clases de idoneidad pueden ser fácilmente adaptadas, se recomienda que no sean más de cinco (FAO, 1976); al respecto, algunos autores han utilizado cuatro rangos de aptitud (Moisa et al., 2022; Zolekar & Bhagat, 2015), mientras que otros han utilizado cinco (Montes-Galbán, 2022; Salvatore et al., 2019). En este trabajo, se tomaron los elementos conceptuales del esquema de evaluación de tierras de FAO (1976) a modo orientativo para la generación de las clases de aptitud finales (Montes-Galbán, 2022; Salvatore et al., 2019) que se presentan en la figura 3.12.

La clasificación del mapa de aptitud en cinco categorías de aptitud (FAO, 1976), permitió discriminar las áreas aptas para la producción de nogal pecán, de aquellas no aptas, considerando como aptas a las categorías Muy apto, Apto y Moderadamente apto; y, por otro lado, considerando no aptas a las categorías Marginalmente apto y No apto. La mayor proporción del territorio, alrededor de un 92% (cuadro 3.2) resultó clasificado en las dos categorías inferiores de aptitud: no apto y marginalmente apto. El 8% restante se

distribuyó entre las categorías moderadamente apto, apto y muy apto. Estos resultados se debieron a la distribución espacial de la aptitud de cada uno de los factores y restricciones involucrados en este estudio, y de las ponderaciones aplicadas en la combinación lineal ponderada (WLC) (Buzai & Baxendale, 2011).

Todos los factores involucrados en este estudio, presentaron distintos grados de aptitud, distribuidos en diferentes zonas de la provincia. Cada factor se expresó en mayor o menor medida, en función del peso que se les asignó previo a la WLC (cuadro 2.3). El método de ponderación por ranking recíproco de Malczewski (1999), constó de la asignación de un orden a cada capa temática de acuerdo a la importancia que tuvo en el estudio. Debido a su simplicidad de cálculo, y a la efectividad demostrada cuando se le compara con métodos similares (Buzai & Baxendale, 2011), este método ha sido aplicado en numerosos estudios donde la técnica de Evaluación Multicriterio se utiliza para determinar la aptitud de tierras para distintos tipos de usos (Montes-Galbán, 2022). Para la asignación del orden de importancia a los factores involucrados en este trabajo, se realizó una encuesta a profesionales de las Ciencias Agrarias, algunos de ellos relacionados con la producción de nogal pecán. A través de ello, se determinaron tres órdenes de importancia, resultando los factores T_{min}, HF, suelos, y disponibilidad de recursos hídricos los de primer orden. Por otro lado, los factores T_{min} y altura sobre el nivel del mar resultaron con número de orden 2, mientras que el factor P_p obtuvo número de orden 3. Debido a esto, los factores que mayor peso tuvieron en la WLC fueron los primeros, por lo tanto, fueron los que mayormente se expresaron en el mapa final (figuras 3.11 y 3.12); luego, los siguieron los factores T_{max} y altura, y por último el factor P_p (cuadro 3.3).

Un aspecto a resaltar y tener en cuenta es que, en la medida en que estas ponderaciones cambian, los resultados hallados podrían cambiar también. De esta forma se entiende que se pueden obtener múltiples resultados, al cambiar los números de orden de importancia de los factores. Por ejemplo, como ya se ha discutido previamente en este apartado respecto al factor altura sobre el nivel del mar, y considerando que por sí solo este factor no representa efectos directos que afecten el cultivo de nogal pecán. Debido a esto, se podría cambiar su número de orden en el ranking recíproco y su peso en la WLC resultaría inferior. Por ejemplo, si su número de orden fuera 4, su ponderación cambiaría de 0,09 a 0,05, y si fuera 5 pasaría a 0,04. Estos números de orden podrían ir disminuyéndose

consecutivamente, o directamente eliminarse este factor del estudio, de manera que no ejerza ninguna influencia en el resultado final.

Este razonamiento podría aplicarse también al factor Pp, considerando que al tratarse de una provincia con clima árido a semiárido (Nuñez-Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004), se entiende que las precipitaciones anuales probablemente se encuentren por debajo de los requerimientos del cultivo, como sucedió en este estudio, y que sea condición necesaria disponer de recursos hídricos para riego para poder producir nogal pecán en Catamarca (Gómez & Cruzate, 2007). El mapa del factor Pp (figura 3.4b) demostró esto: todo el territorio provincial resultó no apto para este factor, de acuerdo a los requerimientos de la especie (Sparks, 2005). Por esta razón, podría considerarse disminuir la ponderación de este factor, bajando su orden de importancia de 3 a 4 o a 5, con lo cual sucedería algo similar a lo que ocurriría con el factor altura sobre el nivel del mar. Un ejemplo de cómo cambiaría la aptitud de las tierras se muestra en la figura 4.4b, la cual presenta el mapa de aptitud obtenido cambiando el ranking de los factores mencionados, en comparación con el mapa obtenido originalmente (figura 4.4a).

Si se lo compara con el mapa de aptitud obtenido inicialmente (figura 4.4a), se observa un cambio en la distribución espacial de la categoría apto, en las cuencas Salar de Pipanaco y Valle Central: las áreas aptas pasan a la categoría moderadamente apto. Sin embargo, el resto de las áreas y las categorías en el resto del territorio provincial se mantienen igual. Esto indicaría que estos factores no tienen un efecto marcado en la distribución espacial de la aptitud para producir pecán, debido a sus valores bajos de ponderación en ambos mapas, y que el cambio de orden de 3 a 5 no implica cambios significativos. No obstante, debe tenerse en cuenta que en las zonas donde la categoría apto cambia a moderadamente apto, el factor altura sobre el nivel del mar presentó los valores máximos de aptitud, mientras que el resto de los factores mantuvieron valores de aptitud de medios a bajos, con excepción del factor HF que tuvo valores de aptitud similares al factor altura sobre el nivel del mar. Por este motivo se evidencia el efecto del factor altura en el mapa de aptitud obtenido originalmente (figura 4.4a).

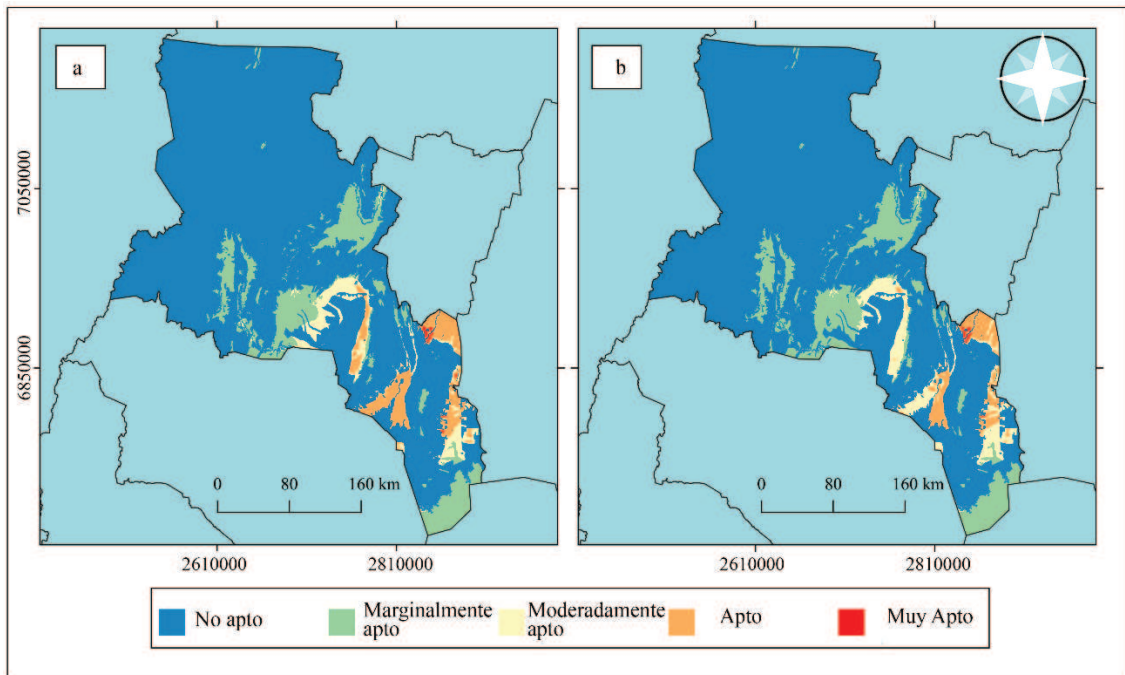


Figura 4.4: aptitud de las tierras de la provincia de Catamarca para la producción de nogal pecán clasificada en rangos de acuerdo a FAO (1976) (a). Mapa de aptitud obtenido considerando a los factores Pp y altura sobre el nivel del mar con un orden 5 en el ranking recíproco (b).

De acuerdo a las consideraciones mencionadas acerca del factor Pp, el factor disponibilidad de recursos hídricos para riego cobra importancia, puesto que la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca solo sería posible si existe disponibilidad de agua para riego (Delgado & Carabajal, 2018; Gómez & Cruzate, 2007). Por estos motivos, se justifica el orden determinado en el ranking para este factor (cuadro 2.3).

Por otro lado, entre los factores climáticos, los considerados en orden 1 fueron los factores Tmin y HF. La importancia del primero de ellos, tiene que ver con la tolerancia al frío que presenta la especie, la cual difiere entre cultivares (Sparks, 2005). Por ejemplo, entre los cultivares plantados en el ensayo de INTA EEA Catamarca (Delgado & Carabajal, 2018), se pueden citar como susceptibles al daño por frío a las variedades Western, Wichita y Shoshoni, y como resistentes, Stuart y Desirable (Sparks, 1992). Los menores valores de aptitud para el factor Tmin, se presentaron en zonas coincidentes con las áreas marginalmente aptas y no aptas del mapa final de aptitud (figura 4.4a). En relación al factor HF, las áreas con menores valores de aptitud para este factor (figura 3.1b), coincidieron con las áreas marginalmente aptas y no aptas del mapa final de aptitud,

donde también los factores T_{min} y disponibilidad de recursos hídricos presentaron valores marginales de aptitud.

El factor T_{max} presentó valores de aptitud altos para la mayor parte de la provincia, con excepción de las áreas por encima de los 3000 m sobre el nivel del mar, donde las temperaturas máximas estuvieron por debajo de 18,3°C (cuadro 2.7). En el resto del territorio provincial, tampoco existieron temperaturas máximas por encima del valor máximo determinado para la especie, de 41°C (Sierra et al., 2007). Los efectos de este factor en el mapa final resultaron inferiores a los de los demás factores climáticos, puesto que este recibió un orden 2 en el ranking (cuadro 2.3).

En la obtención del factor suelos, cada variable edáfica involucrada presentó el mismo orden de importancia en el cálculo del PCE, siendo el resultado un promedio de todas las variables (Buzai et al., 2015). Una propuesta que podría considerarse, y que generaría modificaciones en el mapa final de aptitud, sería analizar cada variable como un factor individual, de manera de poder asignarles pesos diferenciales en la WLC. Por ejemplo, Moisa et al. (2022) y Garfias-Salinas et al. (2012), para distintos usos, evaluaron por separado la textura, la profundidad y el drenaje, asignándole ponderaciones diferentes a cada uno; en estos estudios, la profundidad y el drenaje tuvieron los mayores valores de ponderación. Por lo tanto, una posibilidad de ampliación del presente trabajo podría ser incorporar las variables edáficas como factores individuales en la WLC. De esta manera, por ejemplo, las variables drenaje, profundidad, y salinidad se considerarían en primer orden, las variables textura y rocosidad en segundo, y la variable anegamiento en último lugar; considerando que en un territorio como el de Catamarca, ocupado en su mayoría por cordones montañosos (Nuñez-Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004), no deberían presentarse problemas de anegamiento. De hecho, esto último se verifica en el mapa de aptitud de esta variable (figura 3.5a).

Otro aspecto a considerar, que ya se discutió anteriormente, son las implicancias del cambio climático para el área de estudio, que podrían modificar la distribución de la aptitud para los factores climáticos. El cambio climático ha tenido efectos en la duración del periodo de desarrollo del cultivo de nogal pecán en el estado de Nuevo México (Estados Unidos), observándose una tendencia creciente provocada por un aumento de las temperaturas, tanto mínimas como máximas, para el período 1950-2019 respecto del período comprendido entre los años 1901 y 1950 (Mokari et al., 2021). Un aumento de 1

°C en la temperatura promedio parece no ser relevante, hasta que se ve en referencia al alargamiento de las temporadas de crecimiento (Mexal & Herrera, 2013). En base a las proyecciones de cambios para el Noroeste argentino (Barros et al., 2015), se puede inferir que el periodo libre de heladas podría verse modificado a futuro. Si bien esta variable no pudo modelarse como factor para incluirlo en la WLC, se conoce que las áreas correspondientes a las tres categorías de aptitud superiores no presentan limitaciones en cuanto a la duración del periodo de desarrollo del cultivo del nogal pecán, de acuerdo a la caracterización realizada por Fernández-Long et al. (2016) (ver anexo Ic). En relación a esto, el desarrollo de nuevos cultivares potencialmente adaptados a las condiciones futuras esperadas resultaría una opción de adaptación a estos cambios (Fernández et al., 2023).

Por otro lado, en el caso particular de las precipitaciones, las proyecciones realizadas en el contexto del cambio climático no prevén cambios significativos en las precipitaciones anuales para esta región, para los periodos 2016-2035 y 2081-2100, aunque existe una tendencia a la reducción (Barros et al., 2015; Camilloni, 2018). Por lo tanto, podría esperarse que los efectos del factor Pp en el mapa de aptitud final de mantengan iguales a los de este trabajo.

Finalmente, y a modo de resumen, puede decirse que la provincia de Catamarca presentó tierras aptas para la producción de nogal pecán, en base a los resultados hallados en este estudio. Si se consideran como las mejores opciones solo las categorías muy apto y apto (figura 4.4a), estas representan apenas un 4,17% del territorio provincial (cuadro 3.2). Estas áreas estarían distribuidas en el oeste de la cuenca Salar de Pipanaco, en un sector que recorre la ruta 46, en el Valle Central, en el departamento de Santa Rosa, y parte de la cuenca de Ancasti. Si se tienen en cuenta también las áreas moderadamente aptas, como opciones intermedias, estas representaron un 3,40% del total provincial, distribuyéndose principalmente en el sector oeste de la cuenca Salar de Pipanaco, parte de la cuenca de Ancasti, y el valle del río Santa María. Sumando todas estas categorías de tierras se obtiene un total de 7,57% de zonas candidatas para la producción de nogal pecán. Los grados de aptitud que presentaron estas áreas, sin embargo, no representan las condiciones más óptimas. Si se tiene en cuenta, y se compara con la zonificación realizada por Sierra et al. (2007) y Gómez & Cruzate (2007), las mejores condiciones agroclimáticas en Argentina se presentan en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Entre Ríos, mientras

que la provincia de Catamarca se encuentra en un área clasificada como marginal. Las mayores limitaciones que encontraron estos autores tuvieron que ver con las condiciones de aridez que predominan en el área de estudio. No obstante, Gómez & Cruzate (2007) señalan que es posible producir pecán en el Noroeste argentino, siempre y cuando existan fuentes de agua para riego, coincidiendo con Delgado & Carabajal (2018). Al respecto, los resultados hallados en este trabajo señalaron que en el territorio catamarqueño existe disponibilidad de agua de buena calidad para riego, pero que es necesario realizar un manejo sostenible del recurso, dadas las condiciones de aridez imperantes que implican una baja recarga de los acuíferos (Fernández-Turiel et al., 2008).

Por lo tanto, las áreas aptas o zonas candidatas para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca, abarcaron una superficie de 767.596 ha, lo cual representa solo un 7,57% del total. De esta superficie, únicamente 429.576,06 ha dispondrían de recursos hídricos para riego, si se consideran las tres categorías superiores presentadas en el mapa del factor disponibilidad de recursos hídricos (figura 3.9a). De las áreas que disponen de recursos hídricos para riego, alrededor de 280.551,31 ha (aproximadamente el 37% de la superficie de las zonas candidatas) se encuentran desocupadas y con posibilidad de expansión para el cultivo de nogal pecán, distribuyéndose principalmente sobre el Valle Central, la cuenca Salar de Pipanaco, el sector norte de la cuenca Falda Oriental de Ancasti y parte de la cuenca Santa Rosa.

La existencia de estas áreas potenciales para plantar nogal pecán, representa una posibilidad de expansión de las zonas de cultivo con frutales en la provincia de Catamarca hacia tierras actualmente desocupadas. En tal sentido, si bien en esta provincia existen alrededor de 4000 ha plantadas con nogal europeo (Ministerio de Hacienda Presidencia de la Nación, 2019), este cultivo no puede expandirse por limitaciones en el cumplimiento de los requerimientos de horas frío (Delgado & Carabajal, 2018).

Las zonas más recomendables para expandir inicialmente la producción de nogal pecán se dan en el departamento de Santa Rosa y entre las localidades de San Antonio y Quirós, en el departamento de La Paz. Allí se presentan las mejores condiciones climáticas, de suelos y de disponibilidad de agua para riego de buena calidad (Bucich et al., 2011; Torres et al., 2015; Batistella et al., 2016; Segura et al., 2019). En cambio, si bien en las áreas más aptas del Valle Central existe buena calidad de agua para riego (Bucich et al., 2011), podrían presentarte algunas limitaciones por las condiciones de salinidad de los suelos.

Por otro lado, en el departamento de Pomán (cuenca Salar de Pipanaco) hay disponibilidad de agua para riego, pero esta tiene una tendencia a la sodificación, por lo cual debe manejarse cuidadosamente para evitar riesgos inherentes a la irrigación con aguas con alta relación de absorción de sodio (Fernández-Turiel et al., 2008). Asimismo, en el departamento de Pomán también podrían presentarse limitaciones por la salinidad de los suelos, y por condiciones desfavorables de temperaturas.

Al tener en cuenta estas consideraciones, idealmente el área potencial de expansión con cultivo de nogal pecán inicialmente debería dirigirse a aquellos sectores de la provincia donde se presenta la mejor calidad de agua para riego y las mejores condiciones edáficas. Como se mencionó anteriormente, estas condiciones se dan en los departamentos de Santa Rosa y La Paz en una superficie de alrededor de 85.000 ha.

4.3. Factores involucrados en la obtención del mapa de distribución óptima de plantas de procesamiento para nuez pecán en la provincia de Catamarca

Los mapas de los factores socioeconómicos tenidos en cuenta para el modelado de la distribución óptima de las plantas de procesamiento para nuez pecán en la provincia de Catamarca (figuras 3.17, 3.18 y 3.19), presentaron en todos los casos, los mayores valores de aptitud en las locaciones cercanas a los objetos espaciales a partir de los cuales se modelaron las capas. De esta manera, las mejores aptitudes para la distancia al puerto de Zárate (figura 3.17) resultaron ser las mas cercanas a su ubicación, mientras que las mejores aptitudes para las distancias a rutas se localizaron cercanas a estas (figura 3.18). De la misma manera, las mayores aptitudes para el factor distancia a zonas candidatas se localizaron cerca de estas (figura 3.19).

En el caso de las zonas candidatas, todo el territorio provincial presentó valores de aptitud de medios a altos (figura 3.19). Esto se debe a que la distancia máxima aceptada para este factor fue de 4857 km (cuadro 2.19), lo cual excede ampliamente los límites de la provincia. En el caso del factor distancia a puertos, la provincia de Catamarca presentó niveles de aptitud de medios a bajos, debido a que la distancia máxima aceptada para este factor fue de 4410 km (cuadro 2.19) y que la distancia entre el puerto de Zárate y la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca es de aproximadamente 830 km. El factor distancia a rutas, presentó los valores máximos de aptitud en un radio de 2 km de la

ubicación de las líneas que representan las rutas; todas las locaciones que se encontraron a más de 2 km de las rutas resultaron no aptas (figura 3.18).

Para la distancia a puertos, se consideró solo el puerto de Zárate, ya que esta es la única ubicación desde la cual se exportó nuez pecán hasta la actualidad (comunicación personal con Rigel Farm, productores de nuez pecán de San Pedro socios de la Cámara Argentina de Productores de Pecán, diciembre de 2022). No obstante, dada la expansión de la superficie plantada en Argentina, y la apertura de nuevos mercados, esta situación podría cambiar a futuro y podrían contemplarse otras vías para exportar. En el caso de las distancias a las zonas candidatas, se consideraron para el modelado cartográfico las clases de aptitud muy apto, apto y moderadamente apto, del mapa final de aptitud para producir nogal pecán en Catamarca (figura 3.12), excluyendo a las áreas marginalmente aptas y no aptas.

Los puntos de inflexión aplicados en la estandarización fuzzy de los mapas de distancias euclidianas medidas en kilómetros, se determinaron en función de los costos de traslado para dos instancias: el traslado de la producción desde las zonas candidatas a la planta de procesamiento, y el traslado desde las plantas de procesamiento al puerto de Zárate. Las distancias estimadas para estos dos factores, tuvieron que ver con la aplicación del modelo de Von Thünen (1966), el cual establece una relación entre la renta de ubicación por unidad de superficie, los costos de producción a campo, y los costos de traslado por unidad de distancia (Engler et al., 2005). La importancia de este factor radica en que el costo de transporte es un factor que afecta significativamente los costos de operación, y que la reducción de la distancia se traduce directamente en un menor costo de transporte (Nantasaksiri et al., 2021).

Para la estimación de los costos de traslado, se entrevistaron a diferentes actores de la cadena de la nuez pecán en Argentina, principalmente profesionales de INTA, y miembros del Clúster de la nuez pecán y de la Cámara Argentina de Productores de Pecán (CAPP). A partir de esto se llegó a la conclusión de que no existe en el sector una estimación certera o aproximada de los gastos de traslado y comercialización de la producción, debido a que estos cambian año a año en función de diferentes factores del mercado (comunicación personal con Carlos Schulte, productor y miembro de la CAPP).

Por lo tanto, los costos de traslado por unidad de distancia debieron estimarse utilizando como referencia la tarifa espiga del mes de noviembre de 2022, publicado por la federación de transportadores argentinos (FeTrA, 2022). También se consideró como referencia la composición porcentual de los costos de traslado y comercialización de cultivos agrícolas en el NOA para la campaña 2021/2022 (Ministerio de Agricultura, 2021). Debe considerarse que los costos de traslado estimados de esta forma y en moneda nacional (pesos argentinos), solo resultan aplicables a los fines de este estudio, por la variación mensual de las tarifas de traslado generada por la inflación en Argentina.

La renta y los costos de producción por unidad de superficie en moneda extranjera (dólares americanos), se tomaron para una plantación de pecán de 19 años de edad, con marco de plantación de 10 x 10 m y un rendimiento de 2000 kg ha⁻¹ de nuez con cáscara (Grassi, 2021). Por lo cual, para plantaciones más jóvenes estos resultados podrían ser diferentes, ya que implican otros costos de producción relacionados al manejo específico que se debe realizar durante las diferentes etapas de crecimiento del cultivo (Grassi, 2021; Madero et al., 2016).

En el caso la estandarización fuzzy del mapa de distancias a rutas, la distancia máxima aceptable desde la planta de procesamiento hasta las vías de comunicación principales, se determinó de acuerdo a lo informado por otros autores que consideran la distancia como un factor que influye sobre los costos de producción. En este trabajo, esta distancia fue de 2 km (Babilonia Ballesteros et al., 2019), pero en otros estudios se han considerado distancias máximas de 1 km (Moisa et al., 2022) y hasta 5 km (Nantasaksiri et al., 2021). El criterio aplicado en todos los casos es el mismo, mientras más cercanas están las locaciones a las vías de comunicación principales, mayor es la aptitud (Moisa et al., 2022).

4.4 Mapa de localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán

En este trabajo, el modelado de la distribución óptima de las plantas de procesamiento, se realizó con el objetivo de brindar un modelo que incluya no solo la caracterización de las tierras de la provincia de Catamarca para la producción primaria, sino también para el procesado de las nueces pecanas obtenidas allí. De esta manera, el modelo incorpora varios eslabones de la cadena productiva (PROSAP-UCAR, 2015). Esto se justifica en base a la consideración de que la evaluación de tierras aplicada para distintos tipos de

usos, en general involucra el análisis de criterios socio-económicos, además de las características inherentes a la tierra (Akinci et al., 2013). En tal sentido, algunos estudios han demostrado la importancia e influencia que presentan los factores relacionados con la infraestructura y los mercados de un área de estudio sobre la idoneidad de las tierras, para un tipo de uso determinado (Babilonia-Ballesteros et al., 2019; Moisa et al., 2022; Nantasaksiri et al., 2021; Sarkar et al., 2023).

Las áreas clasificadas como muy aptas y aptas para la localización de las plantas de procesamiento representaron alrededor del 20% del territorio provincial (cuadro 3.3) y se distribuyeron principalmente en zonas cercanas a las vías de comunicación (figura 3.21). Se evidencia en estos resultados el efecto del factor distancia a rutas, debido a que en el ranking recíproco este factor recibió un orden 1, asignándole el mayor peso entre los tres factores (cuadro 2.4). Los demás factores, fueron considerados en orden 2 (distancia a zonas candidatas) y orden 3 (distancia a puertos). Por otro lado, las áreas moderadamente aptas se distribuyeron principalmente donde se localizaron las mayores aptitudes para el factor zonas candidatas (figura 3.19), y las aptitudes medias para el factor distancia a rutas.

Fuera del área de influencia de las vías de comunicación, se presentó una evidente influencia del factor distancia a zonas candidatas, dividiéndose el territorio provincial en dos categorías (figura 3.21): moderadamente apto, en el área de influencia de las zonas candidatas ubicadas en la región Este, Centro y en la cuenca Salar de Pipanaco (parte de la región Oeste); y marginalmente apto en el resto de la región Oeste, donde las distancias a las zonas candidatas resultaron mayores.

No se observaron áreas no aptas dentro del territorio de la provincia de Catamarca, y esto se debió principalmente a las distancias máximas aplicadas en la estandarización de los mapas de distancia, las cuales en los casos de los factores distancias a zonas candidatas y distancia a puertos sobrepasaron los límites provinciales. No obstante, las plantas de procesamiento idealmente deberían localizarse en los perímetros cercanos a las zonas candidatas y principales centros urbanos de la provincia, por ser considerados los principales centros de consumo local (Babilonia-Ballesteros et al., 2019; Mascaray et al., 2001) y de mano de obra. De esta manera, y considerando la experiencia del sector pecanero argentino, podrían aplicarse distancias más restrictivas y determinar, por ejemplo, que las plantas de procesamiento se ubiquen en perímetros de no más de 350 km desde las zonas candidatas (Rigel Farm, productores de nogal pecán socios de la CAPP,

comunicación personal, diciembre de 2022), no más de 4 o 5 km desde los centros urbanos principales, y a una distancia de menos de 500 metros de las rutas, por ejemplo. De este modo se minimizarían los costos de transporte (Engler et al., 2005) y se maximizaría la rentabilidad.

De la misma manera en que se discutió anteriormente para el mapa final de aptitud para la producción de nogal pecán en la sección 4.2, los resultados obtenidos para la distribución óptima de plantas de procesamiento podrían cambiar en diferentes grados al cambiar los valores de ponderaciones, o incluir otros factores. Por ejemplo, podría considerarse incorporar la localización de los mercados locales bajo el supuesto que estos se ubican en los principales centros urbanos de la provincia: San Fernando del Valle de Catamarca, Andalgalá, Belén y Recreo (INDEC, 2023); o considerar, por ejemplo, la cercanía a las líneas de alta tensión para la provisión de electricidad a las plantas de procesamiento (Nantasaksiri et al., 2021). Si se asignaran, por ejemplo, orden 1 a las distancias a las rutas y a las zonas candidatas, y orden 2 a la distancia a puertos, se obtiene un resultado como el que se muestra en la figura 4.5.

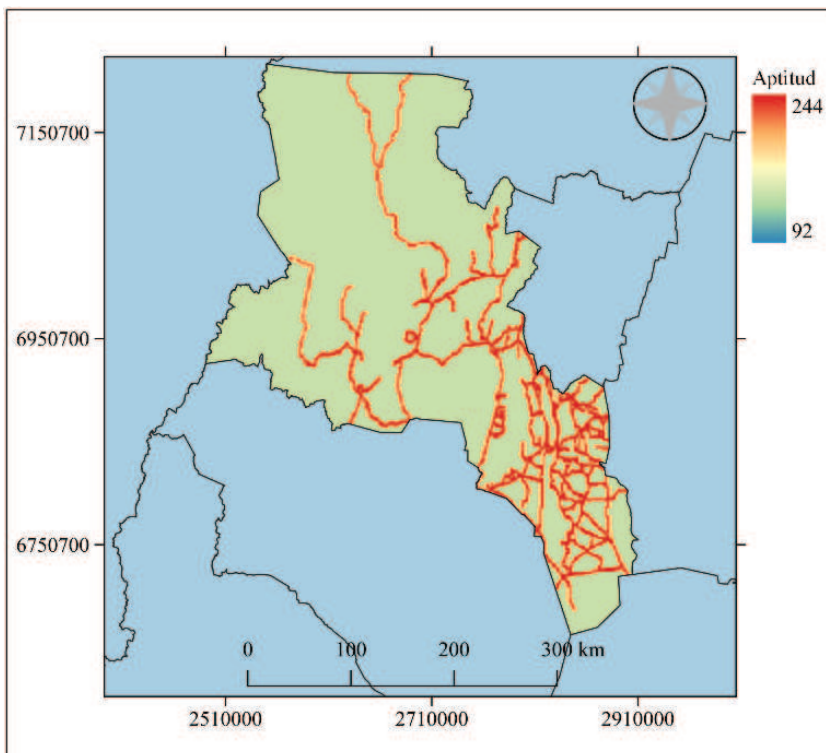


Figura 4.5: localización óptima de plantas de procesamiento con diferente orden de factores en el ranking recíproco.

Nótese que en el territorio provincial no aparecen valores de aptitud cero, correspondientes a áreas no aptas, puesto que la mayor influencia está dada por los factores distancias a zonas candidatas y distancias a rutas, por el cambio de ponderación (figura 4.5). Nuevamente, las áreas más aptas se localizaron a 2 km de los lados de las rutas.

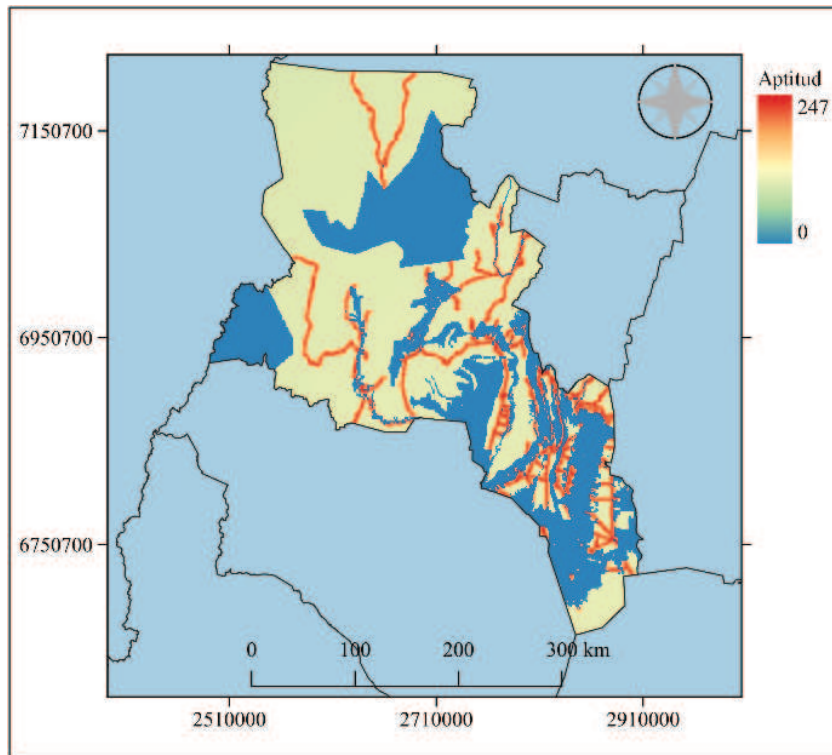


Figura 4.6: localización óptima de las plantas de procesamiento luego de haber aplicado al mapa obtenido por WLC, las restricciones territoriales ley de bosques, áreas protegidas y centros poblados.

Por otro lado, y a diferencia del mapa de aptitud final para la producción de nogal pecán en la provincia de Catamarca, para determinar la localización de las plantas de procesamiento no se tuvieron en cuenta las restricciones territoriales consideradas en este estudio. Si se aplican las restricciones territoriales, entonces aparece la categoría no apto, que se puede identificar en color azul con aptitud cero (figura 4.6).

Por lo tanto, puede decirse que los resultados serán diferentes en la medida en que se apliquen diferentes ponderaciones, y se incluyan o no otros factores, por ejemplo, los mercados locales, que no fueron tenidos en cuenta en este estudio.

5. CONCLUSIONES

- La metodología aplicada en este trabajo permitió caracterizar el territorio de la provincia de Catamarca para la producción de nogal pecán, en función de los requerimientos de la especie.
- En base de los resultados hallados, puede afirmarse que la provincia de Catamarca cuenta con 767.596 hectáreas de zonas aptas para la producción de nogal pecán, lo cual corresponde a un 7,57% del territorio provincial.
- Las zonas candidatas para la producción de nogal pecán en Catamarca comprenden áreas delimitadas por las categorías muy apto, apto y moderadamente apto del mapa final de aptitud. Estas, se distribuyen principalmente en el departamento de Santa Rosa, algunos sectores de la cuenca Salar de Pipanaco, en el Valle Central, parte de la cuenca Falda Oriental de Ancasti, y en el Valle del río Santa María.
- Los factores climáticos, las características de los suelos, y la disponibilidad de recursos hídricos para riego resultaron ser los factores más importantes en la delimitación de las zonas candidatas para plantar nogal pecán.
- Dado que las precipitaciones medias anuales en la provincia de Catamarca se encuentran muy por debajo de los requerimientos de la especie en todo el territorio provincial, en Catamarca solo es posible producir nogal pecán en aquellas zonas donde existe disponibilidad de recursos hídricos para riego.
- De acuerdo a los resultados hallados en este estudio, las zonas candidatas que cuentan con disponibilidad de recursos hídricos comprenden alrededor de 429.576,06 hectáreas, de las cuales aproximadamente un 65% corresponden a tierras actualmente no cultivadas y disponibles para la expansión con el cultivo de nogal pecán.
- De estas áreas disponibles, solo el 30% presenta las mejores condiciones para todos los factores considerados en este estudio, abarcando alrededor de 85.000 ha, en los departamentos de Santa Rosa y La Paz.
- La distribución óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán, se localizó en las áreas cercanas a las vías de comunicación dentro de los límites provinciales.
- Para un análisis aún mas exhaustivo de la localización óptima de plantas de procesamiento de nuez pecán, se podrían incorporar otros factores socio-económicos, que permitan delimitar en un orden más estricto la selección de los

sitios óptimos, como por ejemplo la cercanía a los centros urbanos principales de la provincia y distancia a las líneas de alta tensión para provisión de energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Administración de parques nacionales de Argentina. (2018). Infraestructura de Datos Espaciales de la Administración de Parques Nacionales de Argentina. <https://mapas.parquesnacionales.gob.ar/layers/?limit=100&offset=0>
- Ahumada, R. (2018). El avance de la frontera agrícola en el Valle Central de Catamarca. Ediciones INTA. Primera edición. Catamarca. https://www.researchgate.net/publication/333703188_El_avance_de_la_frontera_agropecuaria_en_el_Valle_Central_de_Catamarca
- Akıncı, H.; Özalp, A. Y.; Turgut, B. (2013). Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.07.006>
- Almonacid, L; Pessacg, N; Diaz, B; Bonfili, O., Peri, P.L. (2022). Nueva base de datos reticulada de temperatura para la provincia de Santa Cruz, Argentina. *Meteorológica*, 47 (1). ISSN 1850-468X. <https://doi.org/10.24215/1850468Xe010>.
- Andales, A.; Wang, J.; Sammis, T. W.; Mexal, J. G.; Simmons, L. J.; Miller, D. R.; Gutschick, V. P. (2006). A model of pecan tree growth for the management of pruning and irrigation. *Agricultural Water Management*, 84 (1–2), 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.02.012>
- Atkinson, P. M. (2013). Downscaling in remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 22 (1), 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.012>
- Babilonia-Ballesteros, R. I.; Acuña, R. S.; Páez Castro, D. D. (2019). Factores condicionantes para la localización óptima de la agroindustria vitivinícola en Valle del Maule, Chile. *Revista RIVAR*, 6 (18), 1–13. <https://doi.org/10.35588/rivar.v6i18.4155>
- Barredo, J. I.; Bosque-Sendra, J. (1998). Multi-criteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment. *Geographical Systems*, 5(4), 313–323. <https://www.researchgate.net/publication/253993117>

- Barros, V. R.; Boninsegna, J. A.; Camilloni, I. A.; Chidiak, M.; Magrín, G. O.; Rusticucci, M. (2015). Climate change in Argentina: Trends, projections, impacts and adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6 (2), 151–169. <https://doi.org/10.1002/wcc.316>
- Battistella, R.; Ortega, I., Morvillo, M.; Luna, P. (2016). Caracterización hidroquímica de la Cuenca de Santa Rosa con métodos multivariados y predicción espacial de contaminantes. Tercer encuentro de investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Ezeiza, Buenos Aires. 6 y 7 de octubre de 2016. Pp 54.
- Bosque-Sendra, J; García, R. (2000). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 20, 49-67.
- Bucich, N.; Savio, M.; Gianni, R. N.; Guimaraes, R.; Luna, P. (2008). Estudio Hidrogeológico Valle Central de Catamarca. Informe final. Departamentos: Capital, Fray Mamerto Esquiú, Capayán, Valle Viejo. Provincia de CATAMARCA. <https://www.ina.gov.ar/cras@ina.gov.ar>.
- Bucich, N.; Torres, C.; García Perón, E.; Gianni, R.; Luna, P. (2011). Estudio hidrogeológico en la cuenca del Faldeo Oriental del Ancasti. <https://www.ina.gov.ar/cras@ina.gov.ar>
- Bunruamkaew, K.; Murayama, Y. (2011). Site suitability evaluation for ecotourism using GIS & AHP: A case study of surat Thani Province, Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 21, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.07.024>
- Buzai, G.D. (2013). *Sistemas de información geográfica: teoría y aplicación*. Primera edición. Editorial Universidad Nacional de Luján. Luján.
- Buzai, G. D. (2015). *Análisis espacial en geografía de la salud (1a ed.)*. Lugar Editorial S.A. Buenos Aires.
- Buzai, G. D.; Baxendale, C. A. (2011). *Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica. Perspectiva científica. Temáticas de base ráster*. Primera edición. Lugar Editorial. Buenos Aires.
- Buzai, G. D.; Baxendale, C. A. (2013). *Aportes del análisis geográfico con sistemas de información geográfica como herramienta teórica, metodológica y tecnológica para la*

práctica del ordenamiento territorial. *Persona y Sociedad*, XXVII (2), 113–141.
<https://personaysociedad.uahurtado.cl/index.php/ps/article/view/43/41>

Buzai, G. D.; Cacace, G.; Humacata, L.; Lanzelotti, S. (2015). *Teoría y métodos de la geografía cuantitativa. Libro 1: por una geografía de lo real*. MCA Libros, Ed.; 2015th ed., Vol. 1. Buenos Aires.

Buzai, G. D.; Montes-Galbán, J. E. (2021). *Estadística espacial: fundamentos y aplicación con Sistemas de Información Geográfica. Volumen 1.1*. Editorial Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Cabrera, A. L. (1971). *Fitogeografía de la República Argentina*. *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica*, 14, 1–42.

Cámara argentina de productores de pecan. (2023). Cámara argentina de productores de pecán.
<https://www.cappecan.com.ar/el-pecan/quienes-somos>

Camilloni, I. (2018). Argentina y el cambio climático. *Ciencia e Investigación*, 68(5), 6–10.
<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

Caprioli, C.; Bottero, M. (2021). Addressing complex challenges in transformations and planning: A fuzzy spatial multicriteria analysis for identifying suitable locations for urban infrastructures. *Land Use Policy*, 102, 1-26.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105147>

Carabajal, D. E.; Colica, J. J.; Prativiera, A. G.; Delgado, E. A.; Gariglio, N. F. (2021). Agronomic Characterization of the ‘Trompito INTA’ Persian Walnut Cultivar. *Agricultural Research*, 11(3), 429–435. <https://doi.org/10.1007/s40003-021-00582-8>

Ceballos-Silva, A. P., López-Blanco, J. (2010). Delineation of Suitable Areas for Alternative Crops: A Multicriteria-GIS Evaluation Approach. *Terra Latinoamericana*, 28, 101–118.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v28n2/v28n2a2.pdf>

Ceballos-Silva, A., López-Blanco, J. (2003). Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: A case study in Central Mexico. *Agricultural Systems*, 77 (2), 117–136. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00103-8)

- Cervantes- Herrera, J.; Ledesma Mares, J. C.; Gallegos Vázquez, C. (2005). Estimación de horas frío con datos altimétricos, para la región sur de Zacatecas. *Revista de Geografía Agrícola*, 34, 23–36. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75703403>
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio* (1st ed., Vol. 1). Barcelona: Ariel.
- Clark, S. (2015). Chill Requirement of Pecans. <https://www.pecangrowers.org.au/here/wp-content/uploads/Pecan-Growing-Chill-Requirement-of-Pecans.pdf>
- CONHIDRO. (2011). Línea de base ambiental de los recursos hídricos subterráneos área de influencia Recreo. https://liex.com.ar/informes/Informe_Liena_Base_Recreo_Oct_2018.pdf
- Conti, H. A.; R. C. Moschini; C. Abbate; G. Cazenave; Frusso, E. (2016). Área de aptitud agroclimática del pecan en la región pampeana. <http://agro.unc.edu.ar/~clima/AADA/Congresos/MDQ/236.htm>
- Conti, H.; Moschini, R.; Cazenave, G. (2018). Zonificación agroclimática del pecan en región pampeana y noreste argentino. XII Reunión Argentina de Agrometeorología, 8 al 10 de octubre de 2008. San Salvador de Jujuy. Argentina. Pp, 113-114.
- Damario, A.; Pascale, A. J.; Bustos, C. (1998). Método simplificado para la estimación agroclimática de “horas frío” anuales. *Revista Facultad de Agronomía*, 18 (1), 93–97. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/facultadagronomia/1998damarioa.pdf>
- Damario, E. A.; Pascale, A. J.; Perez, S.; Maio, S.; Rodriguez, R. O. (1996). Cartas climáticas 1961-90 de fechas de primeras y últimas heladas en la Argentina. *Revista Facultad de Agronomía*, 16 (3), 253–263. <https://core.ac.uk/download/pdf/144234082.pdf>
- Da Silva, C.J.; Cardozo, O.D. (2015). Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en Resistencia (Argentina). *GeoFocus (Artículos)*, 16, 23-40.
- De Cos Guerra, O. (2007). SIG y evaluación multicriterio: propuesta metodológica para cuantificar el grado de metropolización en el territorio. *Mapping*, 116, 6–12. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/4380/SIG+y+evaluaci%F3n>

+multicriterio+propuesta+metodol%F3gica.pdf;jsessionid=2B2D5441AE266D8560E014218FFBD008?sequence=6

- Delgado, E. A.; Carabajal, D. E. (2018). Evaluación fenológica del nogal pecán en la provincia de Catamarca. *Revista Del CIZAS*, 19 (2), 7-15.
- Denim, P. E. (2013). Caracterización preliminar de la calidad del agua en la cuenca superior del río Del Valle (Catamarca). *Revista Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO*, 45 (1), 53–61. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-86652013000100005
- Doreste, P. (2013). Frutos Secos y Frutas Deshidratadas. http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/frutasecas/informes/Frutasecas_anuario_2013.pdf
- Eastman, J. R. (2012). *Idrisi selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Clark University.
- El Baroudy, A. A. (2016). Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. *CATENA*, 140, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.010>
- Engler, P. L.; Deybe, D.; Vicién, C.; Vicente, G. R. (2005). ¿Es óptima la localización de la producción agropecuaria en el departamento de Paraná? Aplicación del modelo de Von Thünen. XXXVI Reunión Anual de La Asociación Argentina de Economía Agraria. Adrogué, 1–10. https://www.researchgate.net/publication/262560284_ENGLER_P_DEYBE_D_VICIEN_C_y_VICENTE_G_2005_Es_optima_la_localizacion_de_la_produccion_agropecuaria_en_el_departamento_de_Parana_Aplicacion_del_modelo_de_Von_Thunen_XXXVI_Reunion_Anual_de_la_Asociacion
- FAO. (1976). A framework for land evaluation. *Soils Bulletin* 32.
- Fernández, E; Mojahid, H; Fadon, E.; Rodrigo, J.; Ruiz, D.; Egea, J. A.; Ben Mimoun, M.; Kodad, O.; El Yaacoubi, A; Ghrab, M.; Egea, J.; Benmoussa, H.; Borgini, N.; Elloumi, O.; Luedeling, E. (2023). Climate change impacts on Winter chill in Mediterranean temperate fruit orchards. *Regional Environment Change*. 23:7. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-02006-x>

- Fernández-Long, M. E.; Barnatán, I.; Dominici, C.; Murphy, G. (2016). Información agroclimática de las heladas en la Argentina: generación y uso. *Meteorológica*, 41(2), 7–31. <http://www.meteorologica.org.ar/nota/informacion-agroclimatica-de-las-heladas-en-la-argentina-generacion-y-uso/>
- Fernández-Turiel J.L.; Córdoba G. del V.; Gimeno D.; García-Vallès M.T.; Saavedra J.; R. F. (2008). Calidad de las aguas superficiales y subterráneas del oeste de la Sierra de Ambato, Catamarca, Argentina. *Las fronteras de la física y química ambiental en Iberoamérica: Ponencias completas del V congreso iberoamericano de física y química ambiental: 95-100*. Universidad Nacional General de San Martín (Ed.)
- FeTrA. (2022). Tarifa nacional espiga noviembre 2022. <https://fetra.org.ar/nota/100002681/tarifa-nacional-espiga-febrero-2022>
- Fick, S.; Hijmans, R. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37 (12), 1-14.
- Frusso, E. (2007). Características morfológicas y fenológicas del pecán, guía fenológica ampliada y resumida. En *Producción de pecán en Argentina*. Vol. 1, pp. 1–25.
- Gardea, A. A.; Martínez-Téllez, M. A.; Yahia, E. M. (2011). Pecan (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch.). In *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857092618.143>
- Garfias-Salinas, R.; Castillo Soto, M.; Yañez Leiva, A. (2012). Método fuzzy para la identificación de áreas potenciales para la producción de leña. *Ampliacion de caso: comuna de Empedrado, región del Maule, Chile*. *Geographicalia*, 61, 5–23. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4138928>
- Gómez, L. A.; Cruzate, G. A. (2007). Aptitud de los suelos argentinos para el pecán (*Carya illinoensis*). *Producción de Pecán en Argentina*. Pp 1–9.
- Grageda-Grageda, J.; Sabori-Palma, R.; Valenzuela-Martínez, A.; Quijada-Flores, A.; Nuñez-Moreno, J. H.; Rodríguez, J. C. (2011). Salinidad del suelo en huertas de Nogal Pecán *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch. *Revista de Ciencias Biológicas y de La Salud de La Universidad de Sonora*, 13(3), 22–27. <https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/download/95/88/188>

- Grassi, A. L. (2021). Ficha técnica de Pecán N° 23: resultado económico de una plantación de pecán. <https://clusterdelpecan.org.ar/fichas-tecnicas/>
- Herrera, E. (1999). Selecting soil and Site for a Pecan Orchard. Cooperative Extension Service. College of Agriculture and Home Economics. New & M. S. University., Eds. New Mexico State University.
- Ibrahim, M. (2005). The relationship between pecan Price and cold storage inventories: a seasonal cointegration approach. Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed. Cambridge University Press.
- Ibraimo, N. A.; Taylor, N. J.; Steyn, J. M.; Gush, M. B.; Annandale, J. G. (2016). Estimating water use of mature pecan orchards: A six stage crop growth curve approach. *Agricultural Water Management*, 177, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.024>
- IDECAT. (2017). Infraestructura de datos espaciales de Catamarca. <https://idecat.catamarca.gob.ar>
- IDECAT. (2021). IDECAT. Infraestructura de Datos Espaciales de La Provincia de Catamarca. <https://idecat.catamarca.gob.ar/>
- IDECAT (2023). Infraestructura de datos espaciales de la provincia de Catamarca. <https://nodoide.catamarca.gob.ar/>
- IGN. (2018). Provincias. <http://ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- IGN. (2022). Capas SIG. Capas SIG. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- INDEC (2002). Censo Nacional Agropecuario 2002. Resultados por provincia. https://sitioanterior.indec.gob.ar/cna_index.asp?_ga=2.51206185.1416114106.1678309204-538039566.1665586877
- INDEC (2015). Unidades Geoestadísticas - Cartografía y códigos geográficos del Sistema Estadístico Nacional. <https://www.indec.gov.ar/codgeo.asp>
- INDEC (2023). Censo Nacional Poblacional. Resultados provisorios. <https://censo.gob.ar/index.php/censo-2022-resultados-provisorios/>

- INTA. (2011). Suelos de Argentina 500.000. <http://www.geointa.inta.gob.ar/2013/05/26/suelos-de-la-republica-argentina/>
- International Nut & Dried Fruit Council. (2015). Nuts and dried fruits Global Statistical Review 2014-2015. <https://www.nutfruit.org>
- International nut and dried fruit council foundation. (2020). Nuts and dried fruits statistical yearbook 2019-2020. https://inc.nutfruit.org/wp-content/uploads/2021/09/1594640174_INC_Statistical_Yearbook_2019-2020.pdf
- International nut and dried fruit council foundation. (2022). Pecan Global Estadistical Review. <https://inc.nutfruit.org/pecans-global-statistical-review/>
- International nut and dried fruit council foundation. (2023). International nut and dried fruit council foundation. <https://inc.nutfruit.org/I>
- Kader, A. A. (2013). Impact of nut postharvest handling, de-shelling, drying and storage on quality. In *Improving the Safety and Quality of Nuts*. Woodhead Publishing Limited, 22-34. <https://doi.org/10.1533/9780857097484.1.22>
- Kuden, A. B.; Tuzcu, Ö.; Bayazit, S.; Yildirim, B.; Imrak, B. (2013). Studies on the chilling requirements of pecan nut (*Carya illionensis* Koch) cultivars. *African Journal of Agricultural Research*, 8(24), 3159–3165. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.1983>
- Lanzelotti, S.; Buzai, G. (2015). Modelos de aptitud espacial para la agricultura prehispánica y actual en el valle de Santa María, Catamarca. *Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía*, 18, 139–150.
- Ley N° 26.331. (2007). Presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos. Boletín oficial. Disponible on line en: <https://www.boletinoficial.gob.ar/#!DetalleNormativa/291/null>.
- Ley No 5.311 de la Provincia de Catamarca, (2010). <https://faolex.fao.org/docs/pdf/arg177454.pdf>
- LI, B.; Zhang, F., Zhang, L.; Huang, J., Jin, Z., Gupta, D. K. (2012). Comprehensive Suitability Evaluation of Tea Crops Using GIS and a Modified Land Ecological Suitability Evaluation Model. *Pedosphere*, 22(1), 122–130. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60198-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60198-7)

- Linsley-Noakes, G.C.; Allan, P. (1994). Comparison of 2 models for the prediction of rest completion in peaches. *Sci. Hort.* 59, 107–113.
- Lompo, O.; Dimobe, K.; Mbayngone, E.; Savadogo, S.; Sambaré, O.; Thiombiano, A.; Ouédraogo, A. (2021). Climate influence on the distribution of the yellow plum (*Ximenia Americana* L.) in Burkina Faso. In *Trees, Forests and People* (Vol. 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100072>
- Lourdes, K.T.; Perrine, H.; Gibbins, C.N.; Sanusi, R.; Azhar, B.; Lechner, A.M. (2022). Planning for green infrastructure using multiple urban ecosystem service models and multicriteria análisis. *Landscape and Urban Planning*, 226, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104500>
- Luedeling, E. (2012). Climate change impacts on winter chill for temperate fruit and nut production: A review. In *Scientia Horticulturae* (Vol. 144, pp. 218–229). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.07.011>
- Luedeling, E.; Zhang, M.; McGranahan, G.; Leslie, C. (2009). Validation of winter chill models using historic records of walnut phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (11), 1854–1864. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.013>
- Madero, E.; Trabichet, F.; Pepé, F.; Wright, E. (2016). *Manual de manejo del huerto de nogal pecán* (1st ed., Vol. 1). Ediciones INTA. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decisión análisis*. John Wiley & Sons. New York.
- Malczewski, J. (2006). Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (4), 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.01.003>
- Maldonado, V. P. (2011). *Plan estratégico provincial de la provincia de Catamarca: informe de avance II año 2011*. Editores Maldonado, V.P; Lovell, E.E; Ogas, C.F. Vol. 1. Gobierno de Catamarca. <https://www.mininterior.gov.ar/planificacion/pdf/planes-prov/CATAMARCA/Plan-Estrategico-Territorial-Catamarca.pdf>
- Mascaray, M. Á.; Meza, L.; Albisu, L. M. (2001). La localización de la industria agroalimentaria en La Rioja: núcleos rurales versus núcleos urbanos. *Berceo*, 141, 229–246.

https://www.researchgate.net/publication/28050469_La_localizacion_de_la_industria_a_groalimentaria_en_La_Rioja_nucleos_rurales_versus_nucleos_urbanos

Mendas, A.; Delali, A. (2012). Integration of MultiCriteria Decision Analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria. *Computers and Electronics in Agriculture*, 83, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.003>

Mexal, J. G.; Herrera, E. (2013). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de nuez en la Región del Noroeste de México y Suroeste de Estados Unidos. *Tecnociencia Chihuahua*, 7(3), 163–170. <https://vocero.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/658/700>

Midgley, S.J.E.; Lötze, E. (2011). Climate change in the Western Cape of South Africa: trends, projections and implications for chill unit accumulation. *Acta Hort.* 903, 1127–1134.

Ministerio de Agricultura. (2020). Sector pecanero argentino. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sector-pecanero-argentino-oct-2020.pdf>

Ministerio de Agroindustria. (2016). IDE Agroindustria. Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos- Catamarca. <http://ide.agroindustria.gob.ar/visor/>

Ministerio de Agricultura, ganadería y pesca. (2021). Resultados agrícolas (ingresos-gastos-márgenes). Campaña agrícola 2021/2022. [https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/analisis_economico/margenes/_archivos//000002_Informes%20de%20M%C3%A1rgenes%20y%20Resultados/220300-Margenes%20Resultados%20\(Marzo%202022\).pdf](https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/analisis_economico/margenes/_archivos//000002_Informes%20de%20M%C3%A1rgenes%20y%20Resultados/220300-Margenes%20Resultados%20(Marzo%202022).pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021a). Anexo I-Programa de Humedales. <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/242480/20210330?busqueda=1>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021b). Resolución 80/2021. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-80-2021-348341/texto>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Ecosistemas acuáticos. Ecosistemas Acuáticos. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/agua/humedales/sitiosramsar/catamarca>

Ministerio de Hacienda Presidencia de la Nación. (2019). Catamarca informe productivo provincial.

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro_informes_productivos_provinciales_catamarca.pdf

Ministerio de minas y energía de Colombia. (2012). Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia. Capítulo III: Estudio SIG - Potencial de Expansión.

https://www.researchgate.net/publication/261805421_Evaluacion_del_ciclo_de_vida_de_la_cadena_de_produccion_de_biocombustibles_en_Colombia_Cap_III_Estudio_SIG_-_Potencial_de_Expansion

Ministerio de transporte. (2022). Mapa de puertos argentinos.

<https://www.argentina.gob.ar/puertos-vias-navegables-y-marina-mercante/Mapa-de-Puertos-Argentinos>

Moisa, M. B.; Merga, B. B.; Gabissa, B. T.; Gameda, D. O. (2022). Assessment of land suitability for oilseeds crops (sesame and groundnut) using geospatial techniques: In the case of Diga district, East Wollega zone, western Ethiopia. *Oil Crop Science*, 7(3), 127–134.

<https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2022.08.001>

Mokari, E.; Samani, Z.; Heerema, R.; Ward, F. (2021). Evaluation of long-term climate change impact on the growing season and water use of mature pecan in Lower Rio Grande Valley. *Agricultural Water Management*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106893>

Mokarram, M.; Mirsoleimani, A. (2018). Using Fuzzy-AHP and order weight average (OWA) methods for land suitability determination for citrus cultivation in ArcGIS (Case study: Fars province, Iran). *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 508, 506–518. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.05.062>

Montes-Galbán, J. E. (2022). Zonificación del uso potencial agrícola en la cuenca media del río Luján, Argentina. *Geográfica Digital*, 19 (38), 65-80. <https://doi.org/10.30972/geo.19386204>

Morales-Poclava, C.; Sobral, R.; Nakama, V.; Volante, J.; Bianchi, A. (2015). Evaluación de tierras mediante métodos paramétricos.

https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_indice_productividad_salju_moralespoclava.pdf

- Nantasaksiri, K.; Charoen-amornkitt, P.; Machimura, T. (2021). Integration of multicriteria decision analysis and geographic information system for site suitability assessment of Napier grass-based biogas power plant in southern Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2021.100011>
- Narvaez, L. (2021). Análisis espacial de evaluación multicriterio con la lógica fuzzy y sistemas de información geográfica aplicado a la vulnerabilidad global en el departamento Pocito (San Juan-Argentina). *Revista Geográfica Digital*, Vol. 18, N° 36, 54-67. DOI: <http://dx.doi.org/10.30972/geo.18364889>
- Núñez- Aguilar, F. A.; Alvarez de Toledo, J. M. (2004). El Riego En La Provincia De Catamarca. Desarrollo social y ambiental sostenible de la región de América Latina y el Caribe. Banco Mundial.
- Núñez Colima, J.A.; Moreno Reséndez, A.; Valenzuela Núñez, L.M.; Rodríguez Martínez, R.; González Torres, A.; García De La Peña, C.; Esparza Rivera, J.R.; Molina Ochoa, J. (2019). Influencia de variables climáticas en el contenido de N en *Carya illinoensis* Koch. *Revista de Investigación de la Universidad De La Salle Bajío*. N° 22, Vol. 11 (1). 207-223. ISSN 2007-0705. doi.org/10.21640/ns.v11i22.1823
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Edición 2020. Edición del autor. <https://volaya.github.io/libro-sig/>
- Oro, T.; Ogliari, P. J.; Dias de Mello Castanho Amboni, R.; Barrera-Arellano, D.; Mara Block, J. (2008). Evaluación de la calidad durante el almacenamiento de nueces Pecán [*Carya illinoensis* (Wangenh.) C. Koch] acondicionadas en diferentes envases. *Grasas y aceites*, 59 (2), 132–138. <https://doi.org/10.3989/gya.2008.v59.i2.501>
- Palmieri, C. N.; Olmos, L. R.; Quiroga, A.; de la Orden, E.; Carma, M. I. (2005). Caracterización hidroclimática de siete localidades del Departamento de Ambato. Provincia de Catamarca. Argentina. *Revista Del CIZAS*, 6 (1 y 2), 7–17. <http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CIZAS/imagenes/pdf/V6/1.palmieri.pdf>

- Panigatti, L. (2010). Argentina, 200 años, 200 suelos. Ediciones INTA. <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-200-suelos.pdf>
- Paoli, H. P. (2003). Aprovechamiento de los recursos hídricos y tecnología de riego en el altiplano argentino. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-aprov_rh.pdf
- Pascale, A. J.; Damario, E. A.; Hurtado, R. (2001). Frío invernal disponible para especies criófilas en el noroeste de la Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología, Asociación Argentina de Agrometeorología*, 1(2), 13–20. http://www.siaj.fca.unju.edu.ar/media/publicaciones/2000-Horas_de_Frio_NOA.pdf
- Peterson, J.K. (1990). *Carya illinoensis* (Wangenh.) Koch. Pecan. En “Silvics of North America. Volume 2. Hardwoods”. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Agriculture Handbook 654. 205 – 210.
- Pilevar, A. R.; Matinfar, H. R.; Sohrabi, A.; Sarmadian, F. (2020). Integrated fuzzy, AHP and GIS techniques for land suitability assessment in semi-arid regions for wheat and maize farming. *Ecological Indicators*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105887>
- PROSAP-UCAR (2015). Plan de mejora competitiva. Clúster de la nuez pecán. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Poggio, L.; Simonetti, E.; Gimona, A. (2018). Enhancing the WorldClim data set for national and regional applications. *Science of the Total Environment*, 625, 1628–1643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.258>
- PROARGEX-PROSAP-UCAR. (2013). Estudio de mercado: exportación de Nuez Pecán a países seleccionados. <https://es.slideshare.net/proargex2013/23102013nuez>
- Provincia de Catamarca. (2014). Áreas de riego en la Provincia de Catamarca. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/rlc/utf017arg/estudio/riegointegral/areasexistentes/Anexos/PROVINCIA_DE_CATAMARCA_FINAL.pdf
- Puchulu, M. E.; Fernández, D. S. (2017). Suelos representativos del Noroeste Argentino. In C. M. Muruaga & P. Grosse (Eds.), *Ciencias de la tierra y recursos naturales del NOA. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino*. (Vol. 1, pp. 874–912). Asociación geológica argentina.

<https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/1447;jsessionid=BCBC75399D4BBB1D2A2E7B95892E6AD8>

- Regil, H. H.; Franco, S. (2009). Nivel de adecuación del territorio para el desarrollo de especies forestales y agrícolas en el parque nacional Nevado de Toluca (PNNT). *Economía, Sociedad y Territorio*, IX (31), 803–830.
- Rhebergen, T.; Fairhurst, T.; Zingore, S.; Fisher, M.; Oberthür, T.; Whitbread, A. (2016). Climate, soil and land-use based land suitability evaluation for oil palm production in Ghana. *European Journal of Agronomy*, 81, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.004>
- Romano, G.; Dal Sasso, P.; Trisorio Liuzzi, G.; Gentile, F. (2015). Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of Southern Italy. *Land Use Policy*, 48, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.013>
- Ruiz, A.; Tineo, A. (2014). Estudio hidrogeológico valle del río Santa María – sector Catamarca. https://www.ipcinfo.org/fileadmin/user_upload/rlc/utf017arg/valles_calchaquies/07.pdf
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- SAGyP-INTA. (1990). Atlas de suelos de la República Argentina (1a ed.). SAGPyA-INTA.
- Salvatore, M.; Kassam, A.; Gutiérrez, A. C.; Bloise, M.; Marinelli, M. (2019). Metodología de evaluación de aptitud de tierras. <http://www.fao.org/3/i1708s/i1708s02.pdf>
- Sammis, T. W.; Mexal, J. G.; Miller, D. (2004). Evapotranspiration of flood-irrigated pecans. *Agricultural Water Management*, 69 (3), 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.05.005>
- Sarkar, D.; Saha, S.; Mondal, P. (2023). Modeling agricultural land suitability for vegetable crops farming using RS and GIS in conjunction with bivariate techniques in the Uttar Dinajpur district of Eastern India. *Green Technologies and Sustainability*, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2023.100022>
- Secretaría de Agroindustria. (2019). Cadena de nuez pecán. Resumen. <https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/HomeAlimentos/Cadenas%20de%20Valor%2>

Ode%20Alimentos%20y%20Bebidas/informes/Resumen_Cadena_NUEZ_PECAN_mayo_2019.pdf

- Segura, L.; Saracho, M.; Lobo, P.; Leguizamón, M. (2019). Calidad química de los recursos hídricos subterráneos en las cuencas de la falda oriental de la sierra de Ancasti, Catamarca, Argentina. *Revista de Geología Aplicada a La Ingeniería y al Ambiente*, 43, 1–15. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7384133>
- Sierra, E. M.; López, E. R.; Perez, S. P. (2007). Agroclimatología Del Pecán en la Argentina. En *Producción de Pecán en Argentina*. Pp. 1–10.
- Smith, M. W.; Carroll, B. L.; Cheary, B. S. (1992). Chilling Requirement of Pecan. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(5), 745–748. <https://WOS:A1992JV03700011>
- SMN. (2023). Tendencias observadas en Argentina 1961-2020. *Tendencias Observadas En Argentina 1961-2020*. <https://www.smn.gob.ar/clima/tendencias>
- Sparks, D. (1992). *Pecan Cultivars: The Orchard's Foundation* (1st ed., Vol. 1). Pecan Production Innovations.
- Sparks, D. (1993). Chilling and heating model for pecan budbreak. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118 (1), 29–35. <http://journal.ashspublications.org/content/118/1/29.abstract>
- Sparks, D. (1996). A climatic model for pecan production under humid conditions. *J. Amer. Soc. Hort. Science*, 121, 908-914.
- Sparks, D. (1997). A model for predicting pecan production under arid conditions.pdf. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122 (5), 648–652.
- Sparks, D. (2002). Rainfall governs pecan stand homogeneity in native, wild habitats. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127 (5), 860–868. <https://WOS:000177609600024>
- Sparks, D. (2005). Adaptability of pecan as a species. *HortScience*, 40 (5), 1175–1189.

- Sunley, R.J.; Atkinson, C.J.; Jones, H.G. (2006). Chill unit models and recent changes in the occurrence of winter chill and spring frost in the United Kingdom. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 81, 949–958.
- Tálamo, E.; Rodríguez, M.; Bea, S.; Vives, L.; Mira, A.; García, R.; Moya Ruiz, F.; Rocha, V. (2016). Modelo hidrogeológico del Salar de Pipanaco, provincias de Catamarca y La Rioja, Argentina. En García & E. Mariño (Eds.), *Calidad del Agua Subterránea: Actas IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. Pp. 87–94. Editorial Científica Universitaria UNCA. <https://digital.cic.gba.gov.ar/items/1093677e-3e27-4355-9064-759d30d03bfd>
- Tercan, E.; Dereli, M. A. (2020). Development of a land suitability model for citrus cultivation using GIS and multi-criteria assessment techniques in Antalya province of Turkey. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106549>
- Torassa, J. (2023). Ficha técnica de Pecán N° 33: El negocio de exportar pecanes. <https://clusterdelpecan.org.ar/fichas-tecnicas/>
- Torres, C. A. J.; Bucich, N. G.; Perón, E. G.; Gianni, R. N.; Luna, P. S. (2013). Estudio Hidrogeológico en la Cuenca Abaucán – Colorado –Salado. Catamarca, Argentina. En E. de la U. N. de L. P. (EDULP) (Ed.), *Agua subterránea, recurso estratégico Tomo I*. pp. 170–177. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/103434>
- Torres, C. A. J.; García, E.; Gianni, R.; Luna, P.; Salvioli, G.; Urnicia, J. (2015). Estudio hidrogeológico de la cuenca de Santa Rosa. Departamentos: Santa Rosa, El alto, Paclín, y Ambato. Provincia de Catamarca. Informe final. www.ina.gov.ar/cras@ina.gov.ar
- Trabichet, F. C. (2020). Caracterización de la aptitud de los suelos de la provincia de Catamarca mediante sistemas de información geográfica. 24 (2), 47–63. <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/huellas/article/view/5042>
- USDA. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos Servicio de Conservación de Recursos Naturales. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- USDA. (2023). Pecan Report. Pecan Prices. <https://pecanreport.com/price-list/>

- Varela S.; L.C. Terribile, L.C.; de Oliveira, G.; Diniz-Filho, J.A.F.; J. González-Hernández, M. S. L. (2015). ecoClimate vs. Worldclim: variables climáticas SIG para trabajar en biogeografía. *Ecosistemas*, 24 (3), 88–92. <https://doi.org/10.7818/re.2014.24-3.00>
- Vigo, M. (2010). Recursos Hídricos. In *Propuestas para el Diseño Urbano Bioambiental en Zonas Cálidas Semiáridas. Caso Área del Gran Catamarca. Tomo I*. Editorial, 978–987. http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicaciones/online/DIGITESIS/marta_vigo/pdf/I.1introduccion.pdf
- Von Thünen, J.H. (1966). *Von Thünen' Isolated State*. Edición inglesa de P. Hall de Der Isolierte Staat. Pergamon, Oxford.
- Walke, N.; Obi Reddy, G. P.; Maji, A. K.; Thayalan, S. (2012). GIS-based multicriteria overlay analysis in soil-suitability evaluation for cotton (*Gossypium* spp.): A case study in the black soil region of Central India. *Computers & Geosciences*, 41, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.08.020>
- Wolstenholme, B. N. (1979). The ecology of pecan trees, part 1. Characteristics of the native habitat. *Pecan Quart.* 13(2):32-35.
- Xue, L.; Cao, P.; Xu, D.; Guo, Y.; Wang, Q.; Zheng, X.; Han, R.; You, A. (2023). Agricultural land suitability analysis for an integrated rice–crayfish culture using a fuzzy AHP and GIS in central China. *Ecological Indicators*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109837>
- Zabihi, H.; Ahmad, A.; Vogeler, I.; Said, M. N.; Golmohammadi, M.; Golein, B.; Nilashi, M. (2015). Land suitability procedure for sustainable citrus planning using the application of the analytical network process approach and GIS. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.07.014>
- Zhang, R., Peng, F.; Li, Y. (2015). Pecan production in China. *Scientia Horticulturae*, 197, 719–727. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.035>
- Zolekar, R. B.; Bhagat, V. S. (2015). Multi-criteria land suitability analysis for agriculture in hilly zone: Remote sensing and GIS approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 300–321. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.016>

ANEXOS

ANEXO I: INFORMACIÓN ANEXA SOBRE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS.

ANEXO Ia

TEMPERATURAS MÍNIMAS MEDIAS MENSUALES EN ABRIGO A 1,50 M.

Datos provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23,95
2013	22,93	22,57	19,31	16,21	9,35	6,66	3,75	6,61	11,05	18,43	19,29	24,08
2014	22,81	20,51	16,94	18,17	11,05	7,45	5,88	9,76	15,06	20,39	19,02	20,82
2015	22,38	21,22	20,42	14,51	13,32	7,29	5,94	11,62	13,24	15,29	18,32	21,22
2016	23,72	23,73	18,72	15,11	11,34	4,87	6,12	8,94	11,91	15,94	18,10	21,68
2017	24,27	21,82	20,19	18,11	11,18	5,18	6,64	10,34	11,51	17,02	21,05	22,54
2018	21,58	21,01	18,85	15,92	12,12	3,03	3,65	6,43	14,30	16,98	19,70	20,37
2019	21,22	20,17	17,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cuadro I.1: datos provenientes de Estación meteorológica Sumalao (INTA).

Fuente: <http://siga.inta.gob.ar/>

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012	20,36	21,13	17,90	15,74	12,44	5,69	3,21	6,41	11,60	15,26	18,99	19,21
2013	20,05	18,79	16,50	14,33	9,86	6,97	5,01	3,85	8,63	13,88	15,94	20,98
2014	19,48	19,75	16,10	15,80	12,53	8,12	5,52	7,88	11,92	16,62	16,04	18,33
2015	19,78	20,32	19,34	17,62	12,93	8,71	5,97	9,76	10,80	12,88	16,57	19,05
2016	20,84	20,92	17,57	15,22	11,29	5,05	5,75	7,35	9,24	13,96	16,00	19,06
2017	20,66	19,73	19,35	15,14	11,90	7,12	7,41	9,10	10,05	14,22	16,98	19,66
2018	20,13	19,68	16,36	17,05	12,72	4,16	4,75	4,46	11,98	14,78	17,77	18,66
2019	20,04	19,34	16,36	15,34	11,33	7,33	6,58	5,97	8,68	13,84	18,69	18,91

Cuadro I.2: datos provenientes de estación meteorológica Andalgala (INTA).

Fuente: <http://siga.inta.gob.ar/>

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	19,4	20,5	18,2	10,6	3,8	1,3	-1,3	1,2	6,3	10,7	14,0	17,0
2011	18,3	17,4	14,8	11,2	4,6	1,6	-0,2	1,2	7,4	11,5	16,7	17,8
2012	18,7	18,9	16,7	11,9	5,8	1,2	-1,7	2,5	8,2	11,4	17,1	19,4
2013	18,5	18,2	14,3	10,1	5,5	2,4	-0,2	0,8	5,3	11,4	14,5	21,1
2014	19,0	17,7	13,7	11,8	6,0	3,1	1,3	4,4	7,9	14,7	15,3	17,4
2015	19,6	18,4	17,4	13,5	6,4	1,2	0,8	6,8	8,0	9,8	14,2	17,4
2016	20,0	20,2	15,0	10,6	7,4	0,8	2,4	4,5	7,4	12,7	14,4	18,6
2017	21,0	18,9	15,5	10,8	5,5	2,2	1,2	3,2	6,0	10,5	15,0	18,5
2018	17,9	17,4	10,7	11,7	6,9	-0,5	-0,8	1,6	8,1	11,3	15,2	16,5
2019	18,9	18,3	14,3	12,5	6,0	1,5	1,0	2,4	5,1	10,2	16,6	16,7

Cuadro I.3: datos provenientes de estación meteorológica Tinogasta.

Fuente: SMN.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	22,19	22,49	21,46	15,23	-	-	-	7,10	12,29	15,92	18,82	20,93
2011	20,80	19,50	18,08	14,87	10,58	5,23	4,49	6,05	13,49	16,62	21,57	21,01
2012	23,81	23,48	20,48	15,88	11,91	4,55	2,56	8,08	13,69	17,29	22,04	23,58
2013	23,00	22,45	19,10	16,45	9,51	6,87	3,90	5,75	10,77	18,36	19,08	23,79
2014	22,86	20,48	16,71	15,74	10,86	6,21	5,41	9,07	14,48	20,38	19,26	20,83
2015	22,35	21,05	20,18	17,78	12,78	7,55	4,80	10,91	12,38	14,69	17,74	21,24
2016	23,36	23,23	18,13	14,05	10,69	4,66	5,30	8,71	11,67	15,60	17,72	21,42
2017	24,25	21,34	20,27	14,97	11,45	4,62	5,75	9,49	11,03	16,20	21,06	22,29
2018	21,13	20,71	18,51	17,65	11,96	3,41	3,67	5,54	13,26	16,87	19,43	20,16
2019	20,73	20,24	16,61	14,94	10,40	5,08	4,56	7,06	11,64	15,84	21,64	21,53

Cuadro I.4: datos provenientes de estación meteorológica Catamarca.

Fuente: SMN.

ANEXO Ib

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS CAPAS DE HORAS DE FRÍO ANUALES

En el cuadro I.5 se presentan las horas frío anuales (HF) estimadas por el método de Damario et al. (1998) y las alturas sobre el nivel del mar, para cada una de las estaciones meteorológicas.

Estación	Altura m.s.n.m.	HF anuales
Famaillá	381	354
San Fernando	461	254
Sumalao	511	221
Tinogasta	1226	901

Cuadro I.5: datos para regresión HF vs Altura en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m).
Fuente: elaboración personal.

Con los datos del cuadro I.5 se realizó una regresión lineal en R Studio. Se presentan los resultados en el cuadro I.6:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	-64.8029	129.6694	-0.500	0.6668
ALT	0.7714	0.1780	4.333	0.0494 *

Signif. codes: 0 '*' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1**
Residual standard error: 120.6 on 2 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9037, Adjusted R-squared: 0.8556
F-statistic: 18.77 on 1 and 2 DF, p-value: 0.04936

Cuadro I.6: Salida R Studio regresión lineal.

Fuente: elaboración propia con R Studio.

Se realizó en RStudio un test de comparación de muestras independientes para determinar si las horas frío anuales estimadas utilizando el modelo WorldClim difieren estadísticamente de las estimadas utilizando los datos de las estaciones meteorológicas. Para ello se extrajeron los valores de HF en ambos mapas, utilizando la ubicación de las estaciones meteorológicas.

ALT (m)	HF estaciones	HF WorldClim
381	354,07	334,12
461	253,90	412,41
511	221,13	425,38
1226	901,04	1196,47

Cuadro I.7: resumen horas de frío estaciones vs. WorldClim

Fuente: elaboración personal.

Se realizó un análisis de normalidad y homocedasticidad; ya que ambas muestras no cumplen con el supuesto de normalidad entonces se realizó un test U de Man-Whitney (cuadro I.8).

W = 4, p-value = 0.3429

alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0

Cuadro I.8: salida RStudio Wilcox.test

Fuente: elaboración personal con RStudio.

El test indica que ambas poblaciones son iguales, es decir, no existen pruebas suficientes para afirmar que los datos obtenidos utilizando series de estaciones meteorológicas y datos de WorldClim sean diferentes. Esto es válido para el área de influencia de las estaciones meteorológicas.

ANEXO Ic

CARACTERIZACIÓN DEL PERIODO LIBRE DE HELADAS DE LA PROVINCIA DE CATAMARCA.

Resumen elaborado en base a la información publicada en Fernández-Long et al. (2016)

En este anexo se presenta la caracterización del periodo libre de heladas realizado por Fernández-Long et al. (2016), quienes trabajaron con las series climáticas históricas de estaciones meteorológicas de Argentina para determinar las fechas de primera y última helada en numerosas localidades. En base a los resultados obtenidos elaboraron mapas de distribución de dichos parámetros a nivel país (figuras I.1 y I.2).

Fernández-Long et al. (2016) definieron las series de fecha de primera helada (FPH) y fecha de última helada (FUH) mediante el criterio de Pascale y Damario (2004; como se citó en Fernández-Long et al., 2016), que determina que la FPH queda conformada como el primer día juliano del año en el que se registra una helada, siempre que la misma ocurra antes del día juliano 196 (15 de julio); si eso no ocurre, en ese año en particular no habrá ocurrido el evento. De la misma forma, la serie FUH se define como el último día juliano en el que se registra una helada, siempre que la misma ocurra después del día 196; al igual que en la serie anterior, es posible la no ocurrencia del evento (Fernández-Long et al., 2016). Asimismo, determinaron otras variables como: temperatura mínima absoluta, frecuencia de días con heladas y período con heladas. Para todas las variables calcularon los valores con probabilidad del 50%, considerado este como el valor más probable de ocurrencia, y aquellos con una probabilidad del 20% por ser considerados como un nivel de riesgo aceptable (Fernández-Long et al., 2016).

La información presentada en dicho trabajo, se amplía en el servidor web del Centro de Información Agroclimática de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (<https://www.agro.uba.ar/heladas/>), donde se puede consultar y descargar la información necesaria para caracterizar el periodo libre de heladas para dos localidades correspondientes al área de estudio: Tinogasta y San Fernando del Valle de Catamarca.

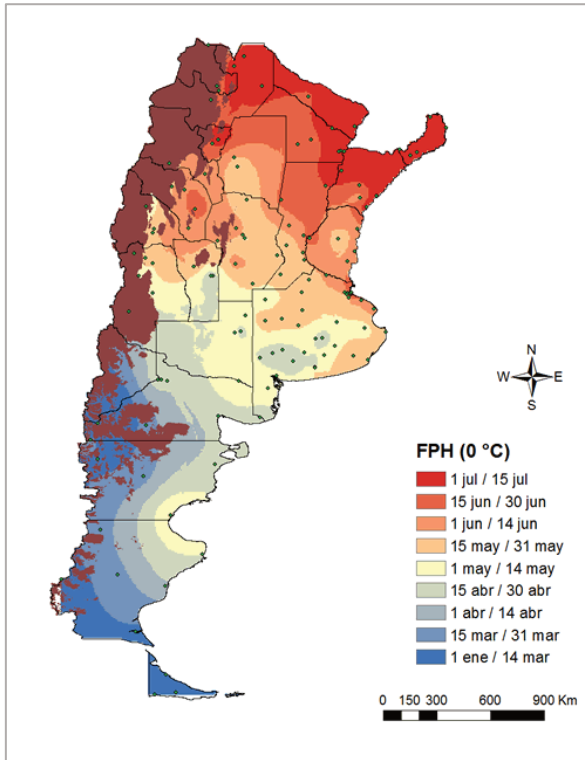


Figura I.1: fecha de primera helada.

Fuente: extraído de <https://www.agro.uba.ar/heladas/>

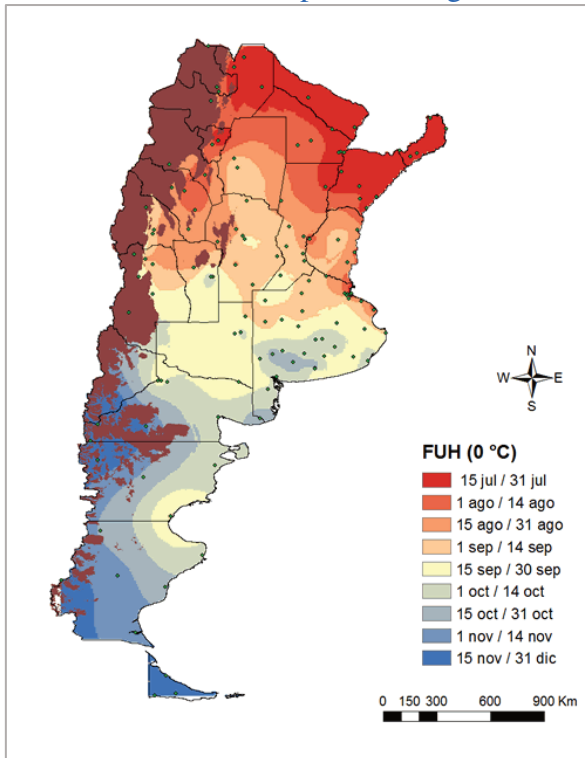


Figura I.2: fecha de última helada.

Fuente: extraído de <https://www.agro.uba.ar/heladas/>

En la figura I.3 a continuación, se presenta un resumen con las FPH y FUH, y otros parámetros asociados, para la localidad de Tinogasta; puede observarse que para una probabilidad de 20% la FPH resulta ser el 3 de mayo y la FUH el 16 de septiembre, con valores medios de 16 de mayo y 7 de septiembre, respectivamente. El periodo medio con heladas resulta en 116 días, por lo tanto, el periodo libre de heladas para esta localidad es de 249 días.

Tinogasta		Período analizado: 1956 - 2012			
	FPH	FUH	PER	Tab _s	FH
Valores medios	16-may	7-sep	116	-6,8	52
Desvío estándar	15	11	19	1,6	17
Valores con probabilidad (20 %):	3-may	16-sep	138	-8,2	66
Extremos	11-abr	8-oct	166	-10,6	102
Año de ocurrencia de los extremos	1956	1962	1956	1975	1956
Nº de años utilizados	55	52	51	51	51
Nº de años sin heladas	0	0	0	0	0

Figura I.3: fechas de primera y última helada para Tinogasta.

Fuente: extraído de <https://www.agro.uba.ar/heladas/>

En la figura I.4 se presenta el resumen para la localidad de San Fernando del Valle de Catamarca; puede observarse que para una probabilidad de 20% la FPH resulta ser el 1 de junio y la FUH el 22 de agosto, con valores medios de 11 de junio y 7 de agosto, respectivamente. El periodo con heladas medio resulta en 57 días, por lo tanto, el periodo libre de heladas para esta localidad es de 308 días.

Catamarca AERO		Período analizado: 1973 - 2012			
	FPH	FUH	PER	Tab _s	FH
Valores medios	11-jun	7-ago	57	-3,7	10
Desvío estándar	15	15	27	1,6	6
Valores con probabilidad (20 %):	1-jun	22-ago	83	-5,0	15
Extremos	14-may	17-sep	106	-7,4	27
Año de ocurrencia de los extremos	1984	1986	1990	1994	1988
Nº de años utilizados	37	40	37	39	39
Nº de años sin heladas	3	4	1	1	1

Figura I.4: fechas de primera y última helada para Catamarca AERO.

Fuente: extraído de <https://www.agro.uba.ar/heladas/>

Damario et al. (1996), confeccionaron cartas climáticas de FPH y FUH para la Argentina para el periodo 1961-1990, utilizando un método gráfico adaptado del propuesto originalmente por Papadakis (1952; como se citó en Damario et al., 1996). De dichas

cartas puede extraerse que la FPH para el área que comprende el Valle Central, la región de Falda Oriental de Ancasti y parte de la cuenca de Pipanaco es del 1 de junio, mientras que para el área que rodea a Tinogasta y la zona de PrePuna y Puna es de 21 de mayo. De la misma manera, la fecha para última helada resulta estar entre el 11 y el 21 de agosto, y entre el 1 y el 11 de septiembre respectivamente. Estos datos coinciden con los obtenidos por Fernández-Long et al. (2016), difiriendo en razón de algunos días: entre 5 y 10 días para FPH, y 4 y 6 días para la FUH.

En las figuras 1 y 2 se observan los mapas de distribución de las FPH y FUH, respectivamente; de acuerdo a lo citado por Fernández-Long et al. (2016), durante la elaboración de estos mapas se colocó una máscara en las áreas con altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., debido a la gran variabilidad espacial que presentan las temperaturas con respecto a la altura y a la poca información que se tiene, en cuanto a datos de estaciones meteorológicas, por lo cual en esta zona no es posible extrapolar datos; esto se muestra en ambos mapas como áreas sombreadas en color marrón. Luego se observan otros rangos en distintas gamas de colores, pudiéndose identificar para el área de estudio FPH del 15 al 30 de junio, y para FUH dos categorías distintas: del 1 al 14 de agosto para la zona del Valle Central, y 15 al 31 de agosto para la zona de Falda Oriental de Ancasti y cuenca de Salar de Pipanaco. De esta información se desprende que los periodos libres de heladas serían de 318 días para el área del Valle Central y de 290 días en el resto.

Referencias bibliográficas

- Damario, E. A.; Pascale, A. J.; Perez, S.; Maio, S.; Rodríguez, R. O. (1996). Cartas climáticas 1961-90 de fechas de primeras y últimas heladas en la Argentina. *Revista Facultad de Agronomía*, 16(3), 253–263. <https://core.ac.uk/download/pdf/144234082.pdf>
- Fernández-Long, M. E.; Barnatán, I.; Dominici, C.; Murphy, G. (2016). Información agroclimática de las heladas en la Argentina: generación y uso. *Meteorológica*, 41(2), 7–31. <http://www.meteorologica.org.ar/nota/informacion-agroclimatica-de-las-heladas-en-la-argentina-generacion-y-uso/>
- Papadakis, J. (1952). Mapa ecológico de la República Argentina. 2da ed., I texto, 231 pág. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Buenos Aires.
- Pascale, A. J.; E. A. Damario. (2004). *Bioclimatología agrícola y agroclimatología*. Ed. Facultad de Agronomía, UBA. 550 pp.

**ANEXO II: INFORMACIÓN ANEXA SOBRE LOS SUELOS DE LA
PROVINCIA DE CATAMARCA.**

**ANEXO IIa
TABLA DE ATRIBUTOS DE LA CAPA VECTORIAL SUELOS DE
CATAMARCA.**

Extraído y adaptado de la capa Suelos de la República Argentina 1:500.000 (INTA, 2017)

NEW_NCART	SIMB C	TIPO_UC	LIMIT_PPA L	LIMIT_SEC U	LIMIT_TER C	POSI_SUE1
2001	AEtc-25	Complejo	Salin en 1ros 50cm	Alcalin menos 50cm	Drenaje deficiente	Plano aluvial
2002	AEtc-34	Complejo	Drenaje deficiente	Alcalin menos 50cm	Salin en 1ros 50cm	Plano aluvial
2003	DEtc-1	Asociación	Climática	Erosión hídrica actu	-	Sector medio y superior de cono
2004	DGtc-1	Asociación	Climática	Baja reten humedad	-	Sector medio y superior de cono
2005	DGtc-7	Asociación	Climática	Erosión hídrica actu	Pedregosidad	Llanura
2007	EKtc-8	Asociación	Climática	Baja reten humedad	-	Sector medio y superior de cono
2008	EKtc-10	Asociación	Climática	Baja reten humedad	-	Sector medio y distal de cono
2009	EKtc-11	Asociación	Climática	Pedregosidad	-	Sector medio e inferior de conos
2010	EKtc-13	Complejo	Pedregosidad	Drenaje deficiente	-	Vía de escurrimiento
2011	EMad-1	Complejo	Climática	Pendientes	-	Afloramiento rocoso
2012	ENli-6	Complejo	Climática	Pendientes	-	Afloramiento rocoso
2013	ENtc-14	Asociación	Climática	Salin en 1ros 50cm	Drenaje deficiente	Planicie
2014	ENtc-22	Complejo	Pedregosidad	Pendientes	-	Pendiente escarpada
2016	EN:ag-1	Asociación	Erosión hídrica actu	Pedregosidad	-	Sector apical y medio de cono
2017	EPLi-24	Complejo	Pendientes	Pedregosidad	Prof. Efectiva somera	Afloramiento rocoso
2018	EPLi-25	Complejo	Pendientes	Prof. Efectiva somera	-	Afloramiento rocoso
2019	EPtc-18	Complejo	Pedregosidad	Climática	Baja reten humedad	Sector medio e inferior de conos
2020	ETtc-1	Consolidación	Climática	Erosión eólica actúa	-	Planicie arenosa
2021	ETtc-14	Complejo	Salin en 1ros 50cm	Alcalina menos 50cm	Climática	Planicie arenosa
2022	ET:EI-1	Complejo	Climática	Salin en 1ros 50cm	-	Sector medio y distal de cono
2023	ET:EI-2	Complejo	Climática	Pedregosidad	-	Sector medio e inferior de conos
2024	ICtc-2	Complejo	Alcalina menos 50cm	Salin en 1ros 50cm	Drenaje deficiente	Plano inundable
2027	MKud-16	Asociación	Climática	Suscep eros hídrica	-	Sector apical y medio de cono
2029	MNtc-12	Asociación	Climática	Baja reten humedad	-	Explanadas
2030	MNtc-13	Asociación	Climática	Pendientes	-	Sector medio y distal de cono

Cuadro II.1: tipo de unidad cartográfica, limitante principal, limitante secundaria, limitante terciaria, y posición del suelo (INTA, 2017).

NEW_NCART	SIMBC	TIPO_UC	LIMIT_PPAL	LIMIT_SECU	LIMIT_TERC	POSI_SUE1
3039	DDut-3	Complejo	Alcalin menos 50cm	Drenaje deficiente	Climática	Bajo
3231	MNto-3	Asociación	Climática	Drenaje deficiente	-	Loma
11001	ENtc-29	Consociación	Climática	Pedregosidad	Pendientes	Sector medio y superior de cono
11003	ENtc-45	Asociación	Climática	Pedregosidad	-	Sector medio y superior de cono
11004	ENtc-46	Asociación	Climática	Salin en 1ros 50cm	Drenaje deficiente	Planicie
11005	ENtc-48	Asociación	Climática	-	-	Planicie
11010	ETtc-20	Consociacion	Climática	Baja retenc humedad	-	Planicie arenosa
11011	MNli-5	Complejo	Climática	Rocosidad	Pendientes	Afloramiento rocoso
16001	DEtc-1	Asociación	Climática	Erosión hídrica actu	-	Sector apical y medio de cono
16003	ENli-6	Complejo	Climática	Pendientes	-	Ladera empinada
16018	DGtc-7	Asociación	Climática	Erosión hídrica actu	Pedregosidad	Llanura extendida
16024	Eltc-15	Complejo	Climática	Pedregosidad	-	Llanura extendida
16032	EMad-1	Complejo	Climática	Pendientes	-	Afloramiento rocoso
16035	ENtc-22	Complejo	Pedregosidad	Pendientes	-	Ladera escarpada
16044	ICtc-2	Complejo	Alcalinidad menos 50cm	Salin en 1ros 50cm	Drenaje deficiente	Bajo
21003	AETc-25	Complejo	Salin en 1ros 50cm	Alcalin menos 50cm	Drenaje deficiente	Plano aluvial
21006	AETc-34	Complejo	Drenaje deficiente	Alcalin menos 50cm	Salin en 1ros 50cm	Plano aluvial
21052	MNai-3	Asociacion	Climática	Baja retenc humedad	-	Explanadas
21064	MNen-59	Complejo	Climática	Alcalin menos 50cm	Salin en 1ros 50cm	Llanura
21073	MNtc-12	Asociación	Climática	Baja retenc humedad	-	Explanadas
22002	DEtc-1	Asociación	Climática	Erosión hídrica actu	-	Sector medio y superior de cono
22011	ENtc-24	Complejo	Pedregosidad	Pendientes	-	Sector apical y medio de cono
22015	IWen-2	Complejo	Pendientes	Prof.Efectiva somera	-	Pendiente escarpada
22020	MKud-6	Asociación	Pendientes	Suscep eros hídrica	-	Sector apical y medio de cono
22031	MNud-11	Asociación	Suscep eros hídrica	-	-	Sector medio y distal de cono
22033	MNud-23	Complejo	Climática	-	-	Explanadas
22034	MPud-1	Asociación	Suscep eros hídrica	-	-	Llanura
50004	S	Salinas	No apto agricultura	No apto agricultura	No apto agricultura	Lago/laguna
50005	R	Roca	No apto agricultura	No apto agricultura	No apto agricultura	Afloramiento rocoso
50017	L	Agua	No apto agricultura	No apto agricultura	No apto agricultura	Lago/laguna

Cuadro II.1: continuación

NEW_NCAR T	SIMB C	TEXT_BS 1	DRENAJE_S 1	PROFUND_S 1	ALCALIN_S 1	ROCOS_S1	ANEGAB_S 1
2001	AEtc-25	Arcillosa	Pobre	80	Muy fuerte	-	-
2002	AEtc-34	Arcillosa	Pobre	80	Muy fuerte	-	-
2003	DEtc-1	Arcillosa	Imperfecto	100	Débil	Interfiere labra	-
2004	DGtc-1	Franco arenosa	Bien drenado	80	Débil	Interfiere labra	-
2005	DGtc-7	Franco arenosa	Bien drenado	80	Débil	Interfiere labra	-
2007	EKtc-8	Arenosa	Algo Excesivo	80	Débil	Interfiere labra	-
2008	EKtc-10	Arenosa	Algo Excesivo	80	Débil	Interfiere labra	-
2009	EKtc-11	Arenosa	Algo Excesivo	80	Débil	Interfiere labra	-
2010	EKtc-13	Arenosa	Algo Excesivo	80	Débil	Interfiere labra	-
2011	EMad-1	No determinada	-	0	-	-	-
2012	ENli-6	No determinada	-	0	-	-	-
2013	ENtc-14	Arenoso gruesa	Excesivo	100	No sódico	Interfiere labra	-
2014	ENtc-22	Arenoso gruesa	Excesivo	100	No sódico	Interfiere labra	-
2015	ENtc-24	Arenoso gruesa	Excesivo	100	No sódico	Interfiere labra	-
2016	EN:ag-1	Arenosa	Algo Excesivo	120	No sódico	Interfiere labra	-
2017	EPLi-24	No determinada	-	0	-	-	-
2018	EPLi-25	No determinada	-	0	-	-	-
2019	EPtc-18	Arenoso gruesa	Excesivo	100	No sódico	Interfiere labra	-
2020	ETtc-1	Arenosa	Excesivo	120	Débil	-	-
2021	ETtc-14	Arenosa	Excesivo	120	Débil	-	-
2022	ET:EI-1	Arenoso gruesa	Excesivo	120	No sódico	-	-
2023	ET:EI-2	Arenoso gruesa	Excesivo	120	No sódico	-	-
2024	ICtc-2	Arenofranca	Imperfecto	70	Moderada	-	-
2027	MKud-16	Franco arcillosa	Bien drenado	100	No sódico	-	-
2029	MNtc-12	Franco arcillo limos	Bien drenado	105	No sódico	-	-
2030	MNtc-13	Franco arcillo limos	Bien drenado	105	No sódico	-	-
3039	DDut-3	Franco limosa	Pobre	100	Muy fuerte	-	-
3231	MNto-3	Franco limosa	Algo Excesivo	100	Fuerte	-	-
11001	ENtc-29	Arenogravillosa	Excesivo	100	No sódico	Compl.cubierto	-

Cuadro II.2: textura del horizonte subsuperficial, drenaje, profundidad, alcalinidad, rocosidad y anegabilidad.

NEW_NCAR T	SIMB C	TEXT_BS I	DRENAJE_S I	PROFUND_S I	ALCALIN_S I	ROCOS_S I	ANEGAB_S I
11003	ENtc-45	Franca	Bien drenado	100	Moderada	-	-
11004	ENtc-46	Franca	Bien drenado	100	Moderada	-	-
11005	ENtc-48	Franca	Bien drenado	100	Moderada	-	-
11010	ETtc-20	Franca	Algo Excesivo	100	Moderada	-	-
11011	MNli-5	No determinada	-	0	-	-	-
16001	DEtc-1	Franco arcillosa	Imperfecto	100	No sódico	Interfiere labra	-
16003	ENli-6	No determinada	-	0	-	-	-
16018	DGtc-7	Franco arenosa	Bien drenado	80	No sódico	Interfiere labra	-
16024	EItc-15	Arenosa	Bien drenado	80	No sódico	Interfiere labra	-
16032	EMad-1	No determinada	-	0	-	-	-
16035	ENtc-22	Arenogravosa	Excesivo	100	No sódico	Interfiere labra	-
16044	ICtc-2	Arenofranca	Imperfecto	70	Débil	-	-
21003	AEtc-25	Arcillosa	Pobre	80	Poca	-	-
21006	AEtc-34	Arcillosa	Pobre	80	Poca	-	-
21052	MNai-3	Franco arenosa	Algo Excesivo	100	No sódico	-	-
21064	MNen-59	Franco arenosa	Algo Excesivo	120	No sódico	-	-
21073	MNtc-12	Franco arcillo limos	Bien drenado	100	No sódico	-	-
22002	DEtc-1	Arcillosa	Imperfecto	100	No sódico	Interfiere labra	-
22011	ENtc-24	Arenogravosa	Excesivo	100	No sódico	Interfiere labra	-
22015	IWen-2	Franco limo-gravilloso	Bien drenado	95	No sódico	Interfiere labra	-
22020	MKud-6	Franco arcillosa	Bien drenado	100	No sódico	-	-
22031	MNud-11	Franca	Bien drenado	100	No sódico	-	-
22033	MNud-23	Franca	Bien drenado	100	No sódico	-	-
22034	MPud-1	Franco arcillosa	Moderado	140	No sódico	-	-
50004	S	No determinada	-	0	-	-	-
50005	R	No determinada	-	0	-	-	-
50017	L	No determinada	-	0	-	-	-

Cuadro II.2: continuación

ANEXO IIb

CAPA DE SUELOS DE LA PROVINCIA DE CATAMARCA 1:500.000.

Descripción de las características y limitaciones de las unidades cartográficas. Adaptado de Atlas de suelos de la República Argentina (SAGyP-INTA, 1990) y Panigatti (2010).

1- EMAd-1

Criortentes andépticos.

Secuencia de horizontes A, C. Suelos formados a partir de material piroclástico de granulometría múltiple.

Ocupan laderas de montañas, cerros y colinas (relieve pronunciado). Abundan rocas volcánicas.

Noroeste de la provincia. Aptitud ganadera marginal.

Las limitaciones son: climática y pendientes.

La unidad es un COMPLEJO: 70 afloramiento rocoso + 10 torriortente típico (ladera escarpada)+ 10 Vitrandeptes lítico (ladera media).

2- ENLi-6

Torriortentes líticos

Horizontes: A, C, R. Espesor inferior a 50 cm y abundantes piedras en el perfil y superficie. EL contacto con la roca subyacente es neto.

Laderas empinadas a alturas inferiores a los 4000 msnm. Región montañosa de puna y Sierras pampeanas. Ganadería marginal.

Las limitantes son: climática y pendientes.

La unidad es un COMPLEJO: 60 afloramiento rocoso+ 20 torriortente lítico (ladera empinada)+ 20 torriortente típico (laderas empinadas).

3- S

Salinas.

4- EPLi-24

Ustortente típico

Secuencia de horizontes A, C, R.

Suelos pedregosos, acumulaciones de regolita o aglomerados de varias granulometrías.

El contacto con la roca subyacente es neto.

Sierras y colinas de la región natural de selva y pastizales de altura. Pertenecen a los faldeos cuyo rasgo distintivo es el relieve pronunciado y la abundancia de piedras y fragmentos gruesos. Abarca sierras de altura intermedia, debajo de los 2000 msnm.

Aptitud ganadera.

Las limitantes son: pendientes, pedregosidad y profundidad efectiva somera.

La unidad es un complejo: 60 Roca+30 ustortente lítico (ladera empinada)+haplustol lítico (ladera media).

5- EPLi-25

Las limitantes son: pendientes y profundidad efectiva somera.

La unidad es un complejo: 50 afloramiento rocoso+20 Haplustol típico (ladera media)+20 ustortente lítico (ladera empinada).

6- L

Lagunas.

7- AETc-25

Natracualfes típicos

Secuencia de horizontes A1 (ócrico claro), B2t (nátrico oscuro), B3. Hidromorfismo por presencia de napa casi superficial.

Abundantes sales en horizontes basales.

Paisajes de derrames y bañados, depresiones plano cóncavas muy expuestas al anegamiento. Áreas mal drenadas próximas al embalse Rio Hondo. Campos naturales de pastoreo.

Esta unidad es de tipo COMPLEJO: 80 natracualfes (planos aluviales)+20 ustifluventes (vías de escurrimiento).

Las limitantes principales, secundarias y terciarias son: salinidad en los primeros 50 cm, alcalinidad en menos de 50 cm y drenaje deficiente.

8- Aetc-24

Complejo: 60 natracualf típico (planos aluviales)+30 ustifluvente típico (vías de escurrimiento)+10ustifluvente ácuico (vías de escurrimiento).

Las limitantes principales, secundarias y terciarias son: drenaje deficiente, salinidad en los primeros 50 cm, y alcalinidad en menos de 50 cm.

9- DDut-3

Complejo: 50 natrargides ustolico (bajo)+30 salortides típico (bajo)+20 haplagirdes ácuico (bajo).

Las limitantes son: alcalinidad, drenaje deficiente y climática.

10- Detc-1

Paleargides típico

Horizontes A1 (ócrico), B2t (horizonte argílico denso de poco espesor, color rojo intenso, aflora por erosión), B3, IIR.

Tierras altas: piedemontes, conos de deyección y planicies en la Puna Catamarqueña.
Campos naturales de pastoreo.

Esta unidad cartográfica es una ASOCIACIÓN: 70 paleoargides típico (sector medio y superior de cono)+30 paleoargides petrocalcico (sector medio y superior de cono).

Las limitantes son las siguientes: climática y erosión hídrica actual.

Los aridisoles son suelos que se forman en ambientes áridos. Los argids tienen un horizonte argílico o nátrico y no tienen un horizonte petrocálcico dentro de los 100 cm de la superficie del suelo.

11- DGTc-1

Cambortides típico.

A, B2, C. Epipedón ócrico claro, B2 cámbico suelto. Sobre sedimentos aluviales y coluviales de textura variable.

Conos de deyección de bajo ángulo, llanuras aluviales y terrazas, tanto en tierras altas (>2000 msnm), como bajas (<800 msnm).

Cuando están cerca de zonas de salinas, presentan abundantes sales solubles a partir de los 30 cm aumentando en profundidad.

Esta unidad cartográfica es una ASOCIACION: 65 cambortides típico + 35 torrifluente típico (ambos sector medio y superior de cono).

Las limitantes son: climática y baja retención de humedad.

12- DGtc-7

La unidad es una ASOCIACIÓN: 50 Cambortides típico (llanuras)+ 25 Torrifluente taptó cámbico (vías de escurrimiento)+25 Torriortente taptó cámbico (vías de escurrimiento).

Las limitantes son: climática, erosión hídrica y pedregosidad.

13- Eltc-15

Complejo: 50 Torrifluente típico+ 30 Torriortente típico + 20 Cambortide típico (los tres en llanuras extendidas).

Las limitaciones son: climática y pedregosidad.

14- EKTc-10

Ustifluentes típicos

Entisol, suborden fluvent, con régimen de humedad ústico.

Perfil integrado por capas aluviales variables en texturas, espesores y composiciones mineralógicas.

Bajadas en cauce, cauces incipientes, derrames, terrazas y llanuras aluviales. Su distribución es muy generalizada, en tierras de altura intermedia y bajas.

Aptitud de usos variados.

También se los encuentra próximos a los salares de las tierras bajas, y presentan abundantes eflorescencias salinas en las capas inferiores.

Las limitantes son: climática y baja retención de humedad.

LA unidad cartográfica es una ASOCIACIÓN: 40 ustifluente típico (sector medio y distal de cono)+30 Haplustol éntico (sector medio y distal de cono)+30 haplustol típico (sector medio en inferior de cono).

15- EKTc-11

Las limitantes son: climática y pedregosidad.

La unidad es una ASOCIACION: 40 Ustifluente típico (sector medio e inferior de cono)+ 20 Haplustol éntico +20 Haplustol típico (ambos sector medio y distal de cono).

16- EKTc-13

Las limitantes son: pedregosidad y drenaje deficiente.

La unidad es un COMPLEJO: 70 Ustifluente típico+ 30 Ustortente típico (ambos en vías de escurrimiento).

17- EKTc-8

Las limitantes son: climática y baja retención de humedad.

La unidad es una ASOCIACION: 60 ustifluente típico+40 haplustol éntico (sector medio y superior de cono ambos).

18- EN:ag-1

Torriortentes tapto árgico

Secuencia de horizontes: I, IIA1b, IIB2b. Corresponden a alfisoles rojizos enterrados por un manto espeso de material grueso areno-pedregoso.

Están en la Puna ubicados en la porción distal de conos y piedemontes de formato reciente y su distribución geográfica es restringida.

Las limitantes son: erosión hídrica y pedregosidad.

La unidad es una ASOCIACION: 60 torriortente tapto árgico (sector apical y medio de cono)+ 40 haplargides ácuico (sector medio y distal de cono).

19- ENTc-14

Torriortentes típicos

Suelos profundos con perfiles variables en granulometría y composición de los fragmentos de roca, espesas acumulaciones de sedimentos gruesos areno-pedregosos, expuestos en diferentes niveles topográficos. Horizontes A, C.

Formas de transición submontañosa, de relieve quebrado, extremadamente recortadas por erosión hídrica y en bajadas aluviales, vías de escurrimiento y llanuras aluviales.

Regiones naturales de montaña (punas y sierras pampeanas) y en los Valles y Quebradas Áridos. Suelos ganaderos, campos naturales de pastoreo.

Las limitantes son: climática, salinidad en los primeros 50 cm y drenaje deficiente.

La unidad es una ASOCIACIÓN: 50 torriortente típico (planicie)+30 Haplargides típico (cubetas)+20 torripsamente típico (planicie arenosa).

En la unidad ENTc-14 presentan sales solubles abundantes.

20- ENTc-22

Las limitantes son: pedregosidad y pendientes.

La unidad es un COMPLEJO: 60 torriortente típico (laderas escarpadas y pendientes escarpadas)+ 40 cambortides típico (pendiente baja y faldeo de volcanes).

21- ENTc-24

Las limitantes son pedregosidad y pendientes.

La unidad es un complejo: 50 Torriortente típico (sector apical y distal de cono)+30 Torrifluente típico (vía de escurrimiento)+20 Cambortide típico (sector medio y distal de cono).

22- ENTc-29

Las limitantes son: pedregosidad y pendientes.

La unidad es una CONSOCIACION: 100 Torriortentes típico (sector medio y superior de cono).

23- ENTc-45

Las limitantes son: climática y pedregosidad.

La unidad es una ASOCIACIÓN: 50 Torripsamente típico (pendiente suave)+10 torrifluente típico (sector medio y superior de cono).

24- ENTc-46

Las limitantes son: climática, salinidad y drenaje deficiente.

La unidad es una asociación: 50 torriortente típico (planicie)+30 haplalgides típicos (planicie)+20torripsamente típico (planicie).

25- ENTc-48

Las limitantes son: climática.

La unidad es una asociación: 50 Torriortente típico (planicie)+30 Cambortides típico (planicie)+20 haplargides típico (cubetas).

26- EPtc-18

Ustortentes típicos

Secuencia A, C. Suelos formados por acumulación de material grueso.

Cauces, llanuras aluviales abandonadas recientemente, y en cauces y llanuras aluviales actuales.

Se distribuyen en toda la provincia. Ocupando vías de avenamiento de tierras de altura intermedia y en las tierras bajas.

Aptitud agrícola limitada por factores físicos.

La unidad es un COMPLEJO: 30 Ustortente típico (sector medio e inferior de cono)+30 ustifluente típico (vía de escurrimiento)+20 haplustol éntico (media loma baja).

Las limitantes son: pedregosidad, climática y baja retención de humedad.

27- ET:EI-1

Torripsamientos tapto Torrifluentes

A, C, II, III. Torrifluentes enterrados por un banco arenoso reciente. El suelo enterrado tiene capas variables en espesor, granulometría y composición litológica. El contacto entre los materiales eólicos y fluviales es neto.

Esta unidad se ubica en la parte media de los bolsones, el viento aporta material arenoso que sepulta a los suelos preexistentes. Bolsones de Fiambalá y Pipanaco. Suelos ganaderos marginales.

Las limitantes son: climática y salinidad en los primeros 50 cm.

La unidad es un complejo: 60 Torripsamientos tapto torrifluente (sector medio y distal de cono)+40 torrifluente típico (sector medio e inferior de cono).

28- ET:EI-2

Las limitantes son: climática y pedregosidad.

La unidad es un complejo: 60 Torripsamientos tapto torrifluente+40 Torripsamientos tapto torriortente (ambos sector medio e inferior de conos).

29- ETtc-1

Torripsamientos típicos

Horizontes A, C.

Depósitos de arena acumulados por el viento en distintas situaciones topográficas, algunas veces en las partes bajas sobre los conos y piedemontes, o sobre las laderas de las montañas.

Suelos arenosos que se manifiestan como médanos activos y parcialmente estabilizados, en los sectores más áridos de la provincia.

Aptitud ganadera marginal.

La unidad es una consociación: 100 torripsamente típico (planicie arenosa).

Las limitantes son: climática y erosión eólica actual.

30- ETtc-14

Las limitantes son: salinidad, alcalinidad y climática.

La unidad es un complejo: 70 torripsamente típico (planicie arenosa)+ 30 Psamacuentes típico (explanadas)

31- ETtc-20

Las limitantes son: climática y baja retención de humedad.

La unidad es una consociación: 100 torripsamente típico (planicie arenosa)+

32- ICtc-2

Halacueptes típicos

Secuencia A1, A2, B2, B3x. El Epipedón es ócrico oscuro con abundantes sales solubles. Luego de un horizonte A2 no alábico, continua un horizonte cámbico (B2) delgado. En la base del solum se encuentra un fragipan generado por la presencia de una capa freática fluctuante.

Se encuentran en la Puna, en el fondo de Valles y Bolsones en un ambiente de llanuras aluviales perimetrales a lagunas, salares y arroyos, alcanzando una distribución geográfica generalizada.

La unidad es un complejo: 50 Halacueptes típico (plano inundable)+ 30 Fragiacueptes aerico (llanura extendida)+ 10 Medifibristes hídrico (bajo, depresión cerrada).

Las limitantes son: alcalinidad, salinidad y drenaje deficiente.

33- IWen-2

Haplumbreptes énticos

Horizontes: O1, A, B2, R. Epipedon úmbrico oscuro rico en materia orgánica y de baja saturación de bases, que soporta una capa de restos vegetales parcialmente humificados. El horizonte subsuperficial es un cámbico cuyo límite inferior es abrupto en contacto con la roca subyacente. En todo el perfil abundan fragmentos de roca. Suelos desarrollados sobre material rico en ceniza volcánica.

Faldeos y porciones apicales de las sierras, en la porción más húmeda de la región de selva y pastizales de altura.

Aptitud forestal.

La unidad es un complejo: 30 Haplumbreptes éntico (pendiente escarpada)+ 30 Distrandeptes lítico (pendiente escarpada) +20 Argialbol típico.

Las limitantes son: pendientes y profundidad efectiva somera.

34- MKud-16

Argiustoles údicos

Horizontes: A1, B2t, B3, C. El epipedón es Mólico, oscuro y el horizonte B2t es un horizonte argílico bien estructurado. Por debajo de los 80 cm de profundidad hay presencia de carbonatos libres. Sobre sedimentos de origen loessico, que cubren acumulaciones de origen aluvial.

Piedemontes y conos adosados al relieve serrano. Se ubican en tierras bajas en el sector oriental de la provincia.

Aptitud agrícola, cultivos bajo riego y secano.

Las limitantes son: climática y susceptibilidad a la erosión hídrica.

La unidad es una asociación: 60 Argiustol údico (sector medio y apical de cono)+20 Ustifluente típico (vías de escurrimiento)+ 20 Haplustol údico (sector medio y apical de cono).

35- MKud-6

Las limitantes son: pendientes y susceptibilidad a la erosión hídrica.

La unidad es una asociación: 70 Argiustol údico (sector medio y apical de cono)+30 Haplustol údico (sector medio y apical de cono).

36- MNai-3

El complejo es una asociación: 80 Haplustoles arídico cálcico (explanadas)+20 Calciortides típico (explanadas).

Las limitantes son: climática y baja retención de humedad.

37- MNen-59

Haplustoles énticos

A1, B2, C1, C2.

Con Epipedón Mólico claro y horizonte cámbico débilmente estructurado, suelos desarrollados a partir de material eólico de textura medianamente gruesa.

Piedemontes, conos y llanuras estabilizadas ubicados en tierras bajas. También se los encuentra en laderas serranas. Parte oriental de la provincia.

Aptitud agrícola (excepto suelos de sierras).

Estos suelos se presentan en la variante húmeda del ambiente de sierra con un mantillo superficial y abundantes fragmentos de roca con granulometría variada. Tienen aptitud forestal (en unidad IWEN-2).

Las limitantes son: climática, alcalinidad y salinidad.

La unidad es un complejo: 50 Haplustol éntico (llanura)+ 30 ustifluente típico (vías de escurrimiento)+20 natracualf típico (depresión abierta).

38- MNli-5

La unidad es un complejo: 60 afloramiento rocoso+ 40 Haplustol lítico (lomas graníticas).

Las limitantes son: climática, rocosidad y pendientes.

39- MNtc-12

Haplustoles típicos

A1, B2, B3ca, Cca. Tienen Epipedón Mólico y horizonte cámbico, los carbonatos libres se manifiestan desde los 50cm de profundidad. Están desarrollados sobre material loessico.

Tierras de altura intermedia en piedemontes y conos aluviales en situación media y distal, en las tierras bajas en la llanura chaqueña estabilizada en situación de explanada y en el relieve ondulado de lomas tanto en las partes altas como en las bajas.

Sector norte y sector sur de la provincia, en la longitud de la ciudad de Catamarca.

Agrícola con riego.

Las limitantes son: climática y baja retención de humedad.

La unidad es una asociación: 50 haplustol típico (explanadas)+50 Haplumbreptes éntico (explanadas).

40- MNtc-13

Las limitantes son: climáticas y pendientes.

La unidad es una asociación: 50 haplustol típico (sector medio y distal de cono)+30 ustifluente típico (vías de escurrimiento)+20 Ustortente típico (sector medio y distal de cono).

41- MNto-3

Las limitantes son: climática y drenaje deficiente.

La unidad es una asociación: 50 Haplustoles torriortentico (lomas)+ 40 Cambortides ustolico (lomas)+ 10 Albacualfes típico (bajos).

42- MNud-23

Haplustol údico

A1, B2, B3, C.

Tienen epipedón mólico y horizonte cámbico. Los carbonatos libres se manifiestan en profundidad debajo de los 80 cm. Suelos desarrollados sobre sedimentos loessicos.

Piedemontes y conos aluviales ocupando la posición media y distal y en el relieve ondulado de lomas en las partes altas. Ubicadas en tierras bajas. Noreste y este de la provincia.

Las limitaciones son: climática.

La unidad es un complejo: 30 Haplustol údico (explanadas)+30 Haplustol tapto árgico (vías de escurrimiento) +20 ustifluente típico (vías de escurrimiento).

43- MNud-13

Las limitantes son: susceptibilidad a la erosión hídrica.

La unidad es una asociación: 50 Haplustol údico (sector medio y distal de cono)+ 30 Haplustol tapto árgico (sector medio y distal de cono)+ 20 ustifluente típico (vías de escurrimiento).

44- MPud-1

Paleustoles údicos

A1, B1, B2t, B3 y C. El A1 corresponde a un epipedón mólico oscuro y B2t a un horizonte argílico, denso, profundo y de baja permeabilidad. Suelos desarrollados a partir de materiales aluviales y eólicos.

Piedemontes y conos aluviales. Faldeos del Aconquija (al límite con Tucumán).

Aptitud agrícola limitada.

Las limitantes son: susceptibilidad a la erosión hídrica.

La unidad es una asociación: 60 Paleustoles údico (llanura)+40 Argiustoles údicos (llanura)

Rerefencias bibliográficas

SAGyP-INTA. (1990). Atlas de suelos de la República Argentina (1a ed.).

SAGPyA-INTA.

Panigatti, L. (2010). Argentina, 200 años, 200 suelos. Ediciones INTA. 345 pp.

<https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-200-suelos.pdf>

ANEXO IIC

CRITERIOS APLICADOS PARA CLASIFICAR LA VARIABLE ROCOSIDAD

1- ENLi-6

Al ser un afloramiento rocoso se lo considera NO APTO.

Hay algunas unidades que no están clasificadas como afloramiento rocoso sino como LADERAS EMPINADAS. Allí se encontrarían los suelos TORRIORTENTES. Según la descripción de estos perfiles tienen abundantes piedras en el perfil y la superficie. Se lo clasifica como MARGINALMENTE APTO por la cantidad de piedras que dice en la descripción del perfil.

2- DGtc-7

En este caso, la capa de INTA además de indicar que es una unidad en la cual la rocosidad interfiere en la labranza, indica que la pedregosidad es una limitante terciaria. Son suelos del suborden de los ORTHENS y FLUVENTS (entisoles, que no tienen diferenciaciones de horizontes diagnóstico), que no tienen desarrollo porque se depositan en sitios muy dinámicos. Como la pedregosidad es considerada una limitante entonces se los considera NO APTO.

3- Eltc-15

Tiene como limitación pedregosidad: NO APTO.

4- EKTC-11

Como presenta como limitante secundaria la pedregosidad lo clasifico como NO APTO.

5- EKTC-13

Como presenta como limitante secundaria la pedregosidad lo clasifico como NO APTO.

6- EN:ag-1

Esta unidad presenta como limitante secundaria la pedregosidad y además la descripción de INTA dice que interfiere la labranza así que se considera como NO APTA.

7- ENTc-22

Por la limitante pedregosidad NO APTO.

8- EMAd-1

Se clasifica como NO APTO porque constituye un afloramiento rocoso.

9- S

Salinas.

NO APTO.

10- EPLi-24

Por la pedregosidad abundante y ser un afloramiento rocoso se lo considera NO APTO.

11- EPLi-25

Por ser un afloramiento rocoso se lo considera NO APTO.

12- L

Lagunas.

NO APTO.

13- ENTc-24

Por la limitante pedregosidad NO APTO.

14- ENTc-29

Por la limitante pedregosidad NO APTO.

15- ENTc-45

Por la limitante pedregosidad NO APTO.

16- EPtc-18

Por la pedregosidad se lo considera NO APTO

17- ET:EI-2

La descripción de INTA lo presenta como limitación secundaria a la rocosidad, por lo tanto se considerará NO APTO.

18- MNli-5

Como se trata de su mayoría afloramiento rocoso lo considero NO APTO.

19- IWen-2

Se trata de un suelo Inceptisol, con Epipedón úmbrico que puede presentar estructura de roca (pero no es seguro) en menos de la mitad del volumen del perfil. La capa de INTA indica que la rocosidad interfiere la labranza. Lo voy a considerar MODERADAMENTE APTO.

20- EKTc-10

Los haplustoles son suelos del orden de los Molisoles, suborden ustoles, no presentarían problemas de rocosidad. Sin embargo en la descripción de INTA dice que la rocosidad interfiere en la labranza. Por lo tanto lo clasifico como MODERADAMENTE APTO.

21- Detc-1

Esta unidad cartográfica no presenta como limitante (principal, secundaria o terciaria) la presencia de pedregosidad. En la descripción del perfil de suelos tampoco se ve que haya problemas con rocosidad, sin embargo la clasificación de rocosidad dice “interfiere labranza”. Para la plantación de pecan la labranza es al comienzo del cultivo para preparar

el suelo, luego si se realizan labranzas son verticales. Por lo tanto podría considerarse que esa interferencia para el cultivo de pecan no sería significativa. Esta unidad como puede presentar inconvenientes en la preparación del suelo se clasifica como MODERADAMENTE APTO (porque consideraría una reducción del 40 al 60 % del rendimiento).

22- DGTc-1

Por la descripción del perfil típico no pareciera presentar problemas de rocosidad. Sin embargo en la clasificación de la capa de suelos de INTA indica que la rocosidad interfiere en la labranza. Es similar al caso de la unidad anterior en la cual por la definición de los horizontes no habla de pedregosidad ni formación rocosa pero las indicaciones de INTA sí. Por lo cual se considera MODERADAMENTE APTO.

23- EKTc-8

La descripción de los suelos indicaría que no presenta problemas de pedregosidad, aunque la descripción de la capa dice que la rocosidad interfiere en la labranza. Lo clasifico como MODERADAMENTE APTO.

24- ENTc-14

En la descripción del perfil lo describe como abundante presencia de rocas y acumulaciones de sedimentos areno-pedregosos. También indica que la pedregosidad interfiere la labranza. Lo considero MARGINALMENTE APTO.

25- ETtc-1

La descripción del suelo indica que se trata de un suelo de orden ENTISOL, suborden PSAMENTS (Otros Entisols que tienen menos de 35 por ciento (por volumen) de fragmentos rocosos y una clase textural de arena francosa fina o más gruesa, en todas las capas (están permitidas lamelas franco arenoso) dentro de la sección de control de tamaño de partícula).

Por tener menos de 35 por ciento de pedregosidad se considera APTO (la clase MUY APTO sería aquella que se tiene seguridad de tener menos de 20% de piedras).

26- ETtc-14

Mismo criterio que unidad ETC-1.

27- ETtc-20

Mismo criterio que unidad ETC-14 y ETC-1

28- ICTc-2

La descripción del suelo, que es del orden Inceptisoles, suborden Aquepts, gran grupo Halaquepts (Un horizonte sálico. En uno o más horizontes con un espesor total de 25

cm o más dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral, un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de 15 o más (o una relación de adsorción de sodio [RAS] de 13 o más) y una disminución de los valores de PSI (o RAS) con el incremento de la profundidad abajo de los 50 cm). Son suelos de desarrollo incipiente (mayor nivel de desarrollo que los entisoles). En la descripción no se indica, y tampoco en la capa de INTA, que haya limitaciones respecto a la rocosidad. Por lo tanto lo considero MUY APTO.

29- MKud-16

Es un suelo del orden Molisol en su mayoría. No indica ni en la capa de INTA ni en la descripción del suelo que haya problemas con rocosidad. MUY APTO.

30- MKud-6

Lo mismo que la unidad anterior. MUY APTO.

31- MNai-3

Lo mismo que la unidad anterior. MUY APTO.

32- MNen-59

Los suelos no presentarían problemas de pedregosidad. Se considera MUY APTO.

33- MNtc-12

No presentarían limitantes respecto a la rocosidad, son molisoles. Se considera MUY APTO.

34- MNtc-13

Esta unidad en su descripción no incluye problemas de rocosidad. MUY APTO.

35- MNto-3

Esta unidad en su descripción no incluye problemas de rocosidad. MUY APTO.

36- MNud-23

Esta unidad en su descripción no incluye problemas de rocosidad. MUY APTO.

37- MNud-13

Esta unidad en su descripción no incluye problemas de rocosidad. MUY APTO.

38- MPud-1

Esta unidad en su descripción no incluye problemas de rocosidad. MUY APTO.

39- ENTc-46

La descripción de los perfiles no indicaría problemas de pedregosidad. MUY APTO.

40- ENTc-48

La descripción de los perfiles no indicaría problemas de pedregosidad. MUY APTO.

41- ET:EI-1

La descripción del tipo de suelo no indicaría que presenta problemas de rocosidad ni tampoco en la capa de INTA lo presentan como una limitante.

Se lo considera como MUY APTO en cuanto a rocosidad.

42- AETc-25

Los alfisoles son suelos que no presentan epipedon plaggen y presentan horizontes diagnóstico argílico, natrico o kandico. Si es un natracualf quiere decir que es un alfisol con horizontes natrico, y régimen hídrico acuico.

Los entisoles son suelos que no presentan desarrollo de horizontes diagnóstico. Si es ustifluvente quiere decir que tiene régimen ustico y Fluvents - suelos aluviales donde el desarrollo se ve impedido por deposiciones repetidas de sedimento en periódicas inundaciones. Se los halla en valles y en deltas fluviales, especialmente los que cargan mucho sedimento.

Teniendo en cuenta la aptitud respecto a la rocosidad, estas unidades cartográficas no tendrían problemas, por lo tanto se los clasifica como MUY APTOS.

43- Aetc-24

Teniendo en cuenta la aptitud respecto a la rocosidad, estas unidades cartográficas no tendrían problemas, por lo tanto los clasificaría como MUY APTOS.

ANEXO III: INFORMACION ANEXA SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA PROVINCIA DE CATAMARCA.

ANEXO IIIA

RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS DE CATAMARCA, POR CUENCA HIDROGRÁFICA: DESCRIPCIÓN Y MAPAS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.

En este anexo se presenta una descripción de los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, para cada una de las cuencas hidrográficas, así como también se presentan los mapas utilizados para digitalizar los recursos hídricos subterráneos.

Cuenca del río Abaucán-Colorado-Salado

Esta cuenca está delimitada al Norte por la Cordillera de San Buenaventura, al Este y Sudeste por las cumbres de Chaschuil, Narváez, Famatina y Velazco; al Oeste con las de Fiambalá y Zapata y en el extremo Sur por las cuencas de Sanagasta y Chilecito (Paoli, 2003). Abarca la mayor proporción del departamento de Tinogasta.

- **Recursos hídricos superficiales**

El Valle de Fiambalá – Tinogasta, basa su desarrollo agrícola en el aprovechamiento de las aguas superficiales del río Guanchín en Fiambalá y del río Abaucán y vertientes de la cuenca, en Tinogasta, Copacabana, Banda de Lucero y otras zonas de menor desarrollo (Paoli, 2003).

El río Guanchín ingresa al valle a la altura de la localidad homónima donde confluye con el drenaje central de la cuenca, escurriendo hacia el Sur a través del río Abaucán. Su caudal es permanente, variable según la época del año y arrastra un gran volumen de materiales sólidos en suspensión (Paoli, 2003). Al Norte de Palo Blanco el río Fiambalá, recibe afluentes como el río La Mesada, La Ciénaga, Antinaca y Tatón por margen izquierda; Arroyo Ranchilos y quebrada Colorada por margen derecha. Luego, a partir de la unión del río Guanchín con el río Fiambalá se forma el río Abaucán. Los caudales de este río son captados para el riego en la zona de Tinogasta y Copacabana – Banda de Lucero (Paoli, 2003).

Las principales poblaciones y zonas de desarrollo agrícola en la cuenca dentro del territorio catamarqueño son: Fiambalá, Tinogasta, Copacabana, y Banda de Lucero. La

principal actividad se centra en los cultivos de vid, olivo, nogal y otros frutales, para consumo en fresco o procesados (dulces, conservas o aceites) (Paoli, 2003).

El río Guanchín es captado y derivado en su totalidad para el riego de la zona de Fiambalá, contando con un caudal medio anual estimado en 1,21 m³/s y con un caudal mínimo aforado de 0,87 m³/s para el mes de noviembre (Paoli, 2003). La Conductividad Eléctrica del agua superficial del río Guanchín oscila entre 1.200 y 1.500 micromhos/cm a 25°C, lo que significa que es agua Altamente Salina (C3 acorde con el criterio de clasificación Riverside, modificado por Thorne y Peterson) (Paoli, 2003).

Respecto al río Abaucán-Colorado el caudal medio aforado para el periodo 1919-1956 en Tinogasta y Andaluca es de 2,54 m³/s, con un derrame anual promedio de 125 hm³. Al igual que el río Guanchín, se clasifica como altamente salino lo cual implica que se puede utilizar para riego únicamente en especies tolerantes y exclusivamente con obras de drenaje adecuadas, aunque no existen evidencias de problemas generados por el nivel de sales (Nuñez -Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

El departamento de Tinogasta cuenta con 25 distritos de riego. Las obras inician en un azud derivador sobre el río Abaucán aguas arriba de la ciudad de Tinogasta donde se deriva la totalidad del caudal disponible hacia un canal alimentador con una capacidad de conducción máxima de 2,5 m³/s; este termina en dos canales: uno del este (en margen izquierda) y otro del oeste en margen derecha. El canal principal del este permite regar 1325 ha y el del oeste permite regar 2130 ha. Las obras están deterioradas y requieren de mantenimiento para mejorar la eficiencia de riego (Nuñez -Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

- **Recursos hídricos subterráneos**

El relleno cuaternario en el Valle de Fiambalá (figura 1) cuenta con espesores que superan los 200 metros, con niveles permeables de arenas y gravas que permiten la acumulación de agua subterránea. Las perforaciones existentes en el valle indican la presencia de importantes niveles de arenas y gravas saturadas con agua de buena calidad, desde Medanitos-Saujil hasta la zona más baja de la cuenca en El Puesto, con caudales aptos para riego (Paoli, 2003). La zona de Fiambalá, por ejemplo, presenta un importante desarrollo de relleno cuaternario portador de acuíferos que son explotados por los pozos de la región, con un espesor del orden de los 220 m a 260 m (Torres et al., 2013). En la

región de Tinogasta, se da un incremento en el espesor con un máximo de aproximadamente 300 m, mientras que en la zona Las Higueritas – Cienaguita (al oeste de la sierra de Copacabana) los espesores máximos de relleno cuaternario interpretado son de unos 160 m (Torres et al., 2013).

La recarga a la cuenca de agua subterránea proviene de las sierras: el agua transportada por los cauces fluviales se infiltra en los sedimentos permeables del piedemonte y se mueve subterráneamente hacia la parte más baja del valle donde escurre en dirección al sur (Torres et al., 2013). Siguiendo la cuenca en sentido norte – sur, la profundidad del nivel de agua subterránea en la zona de Los Nacimientos – Medanito – Saujil varía entre 0 m y 10 m; en Fiambalá está comprendida entre unos 35 m y 84 m; en Tinogasta se ubica entre los 26 m y 106 m y finalmente en Copacabana varía entre 6 m y 23 m de profundidad. En la zona de Saujil y El Puesto existen algunos pozos con nivel piezométrico elevado sobre la superficie del terreno (pozos surgentes) (Torres et al., 2013).

En la zona de Saujil hay acuíferos de buena calidad entre los 40 y 150 m de profundidad donde se utiliza el recurso hídrico subterráneo para riego y abastecimiento de la población. Estas características se mantienen hasta la localidad de Tinogasta, donde el agua subterránea es utilizada para riego en cultivos de vid, con caudales del orden de los 200 m³/h y buena calidad química (Torres et al., 2013).

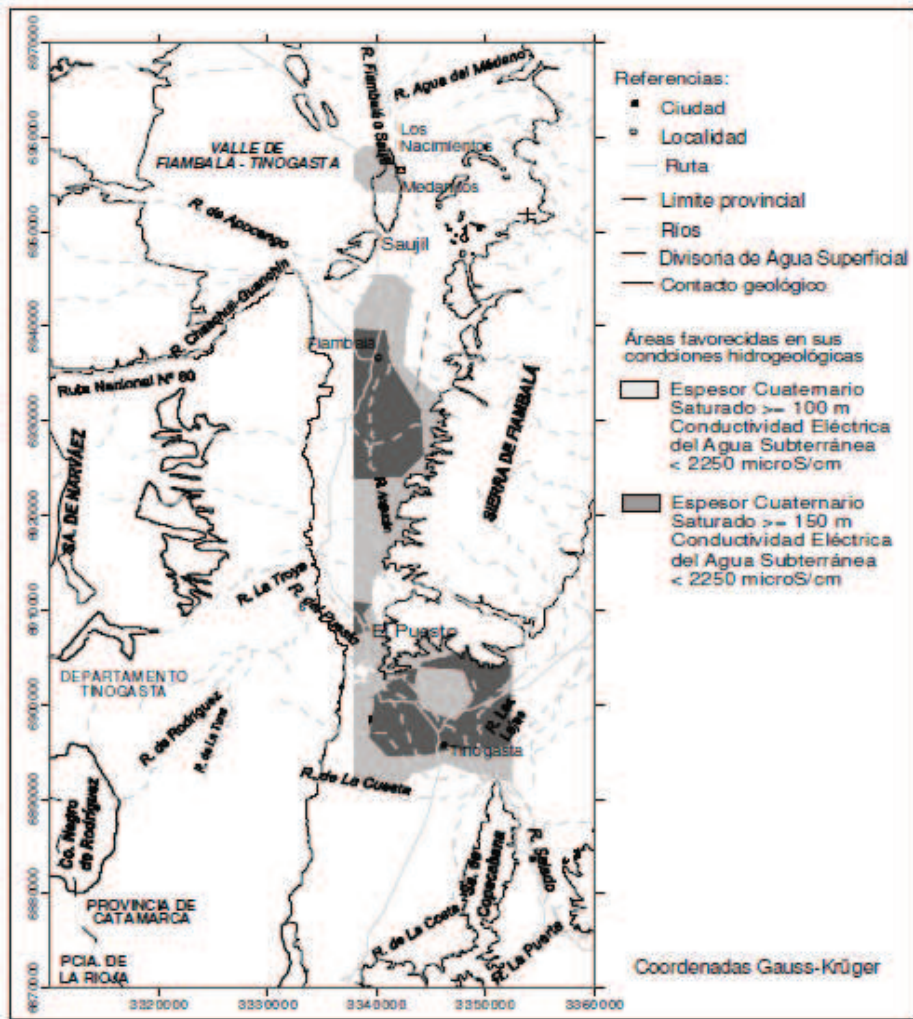


Figura III.1: ubicación de áreas favorecidas en sus condiciones hidrogeológicas para la cuenca del río Abaucán.

Fuente: Torres et al. (2013)

Cuenca Salar de Pipanaco

La cuenca del Salar de Pipanaco se ubica en la Provincia Geológica de Sierras Pampeanas, Limitando al norte con las sierras de Belén y Capillitas, al este con la sierra de Ambato y al oeste con las sierras de Vinquis y Zapata. El límite sur corresponde al río Salado o Colorado (Bucich et al., 2011). A continuación, se describen los recursos hídricos presentes.

- **Recursos hídricos superficiales**

Al noroeste de esta cuenca se encuentra la subcuenca del río Belén y sus afluentes, los cuales se aprovechan en la ciudad de Belén y en las localidades de San Fernando, Hualfin, La ciénaga, y Nacimientos, para consumo humano y riego (Paoli, 2003).

Por otro lado, al noreste de la cuenca se encuentra el sistema del río Andalgalá y sus afluentes con un derrame anual es de 27,2 Hm³. Los afluentes más importantes son los ríos Candado y Blanco, que nacen en el cerro El Nevado, y del río el Vallecito que desemboca en margen derecha del río Andalgalá. La cuenca ocupa 240 km² y es de aporte pluvionival (Paoli, 2003). Aproximadamente el 40% del caudal se aprovecha para el consumo humano y el resto para riego. Los ríos Choya, Potreros y Villamil son afluentes del Andalgalá que riegan localidades homónimas donde hay pequeños valles agrícolas (Paoli, 2003).

Por último, está el sistema del río Pomán, al oeste del Salar. El río Pomán y sus afluentes son de corto recorrido y nacen en las vertientes de los faldeos de las serranías de Ambato Manchao; entre los más importantes se destacan los ríos San José, Joyango, San Miguel, Mutquín, Pomán y otros de menor envergadura, los cuales son utilizados para consumo humano y riego por las poblaciones que se desarrollan en sus márgenes (Paoli, 2003).

Los módulos anuales obtenidos muestran al río Belén con 2,2 m³/s, el río Andalgalá con 0,7 m³/s, Quimivil o Londres con 0,5 m³/s, Pomán con 0,3 m³/s y el resto de los cursos menores muestran valores comprendidos entre 0,2 y 0,01 m³/s (Tálamo et al., 2016).

- **Recursos hídricos subterráneos**

La gran extensión de la depresión de Pipanaco, con sus más de 10.000 km², involucra una enorme cantidad de ambientes geológicos y geomorfológicos, con marcadas variaciones topográficas y climáticas (Tálamo et al., 2016). El borde occidental de las sierras de

Ambato-Manchao presenta importantes acumulaciones de sedimentos cuaternarios permeables que permiten la acumulación de agua subterránea, con recarga proveniente de las precipitaciones que se dan en las sierras y en algunas quebradas, dando origen a vertientes y arroyos que son aprovechados en pequeñas explotaciones agrícolas (Paoli, 2003). El Salar de Pipanaco aparece como la zona de descarga natural de los flujos subterráneos mediante el ascenso capilar del agua del subsuelo y posterior evaporación dejando una fina capa de sal (Bucich et al., 2011).

Existen numerosas perforaciones en establecimientos dedicados a la explotación de olivos ubicadas en su mayoría al este de la ruta N° 46; estas perforaciones son del orden de los 200 m de profundidad, con niveles que van desde los 100 m cerca de la ruta, a los 30 m pendiente abajo, con caudales de 100 m³/h a 200m³/h (Paoli, 2003). La superficie bajo riego con agua subterránea es del orden de las 10000 ha y la cantidad de perforaciones en funcionamiento son estimativamente unas 120, ubicadas en su mayoría entre las localidades de Siján y Pomán (Bucich et al., 2011).

Los niveles en el margen de la sierra de Ambato varían de 5 a 80 m sobre un perfil topográfico de 700 a 740 m s.n.m., que une el depocentro de la cuenca con la estación de ferrocarril de Pomán. La mayor parte de estas aguas son aptas para todo tipo de usos, pero tienen una tendencia a la sodificación, por lo cual debe manejarse cuidadosamente para evitar riesgos inherentes a la irrigación con aguas con alta relación de absorción de sodio (Fernández-Turiel et al., 2008).

La zona al oeste de la ruta provincial N° 46, es la zona con mayores posibilidades para el desarrollo futuro en base a la explotación de sus recursos hídricos subterráneos (Paoli, 2003). Para la gestión sostenible de estos recursos hídricos debe tenerse en cuenta que la recarga es muy baja y, por tanto, que el riesgo de sobreexplotación es elevado (Fernández-Turiel et al., 2008).

El Campo de Belén, en el sector noroeste de la zona de estudio, se caracteriza por la presencia de grandes abanicos aluviales que descienden hacia la depresión del Salar de Pipanaco y que en su sección media están cubiertos por dunas. Los depósitos cuaternarios permeables forman buenos reservorios para el agua subterránea en el sector. Su recarga proviene de las lluvias en las sierras y del río Belén (Paoli, 2003). Se carece de datos de profundidad y consecuentemente de cotas del agua subterránea en toda la extensa zona

medanosa occidental surcada por los ríos Belén y Londres (Bucich et al., 2011); tampoco existe información acerca de la factibilidad de realizar perforaciones en esta zona, por lo cual se sabe que los cultivos desarrollados en esta zona se riegan únicamente con recursos hídricos superficiales (Paoli, 2003).

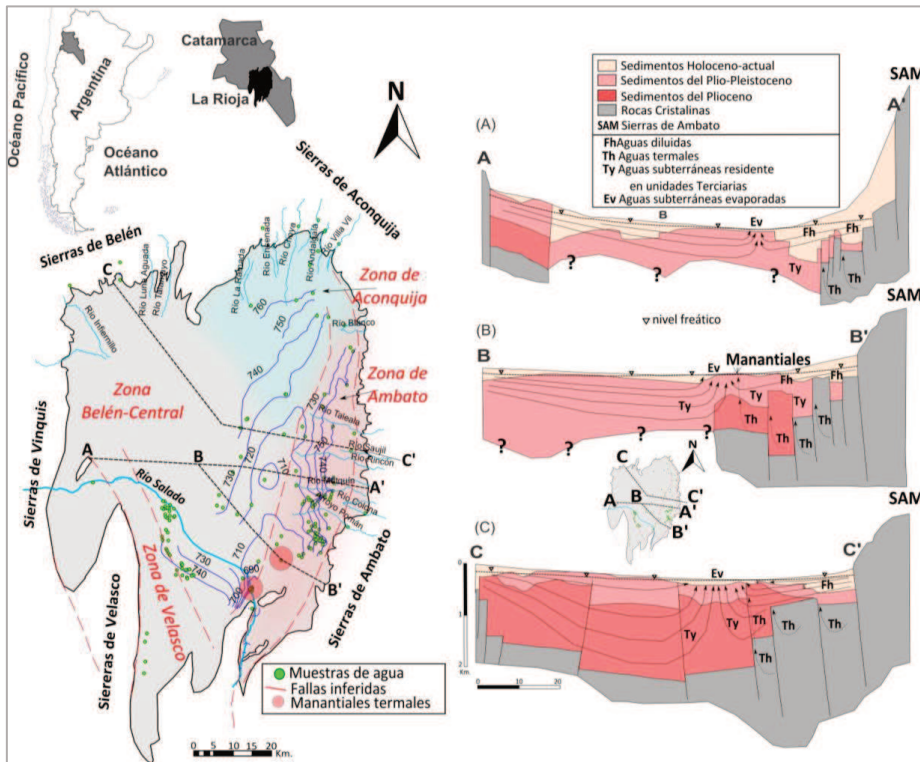


Figura III.2: esquema de la cuenca, principales ríos, isopiezas y traza de perfiles geológicos-geofísicos.

Fuente: Tálamo et al. (2016)

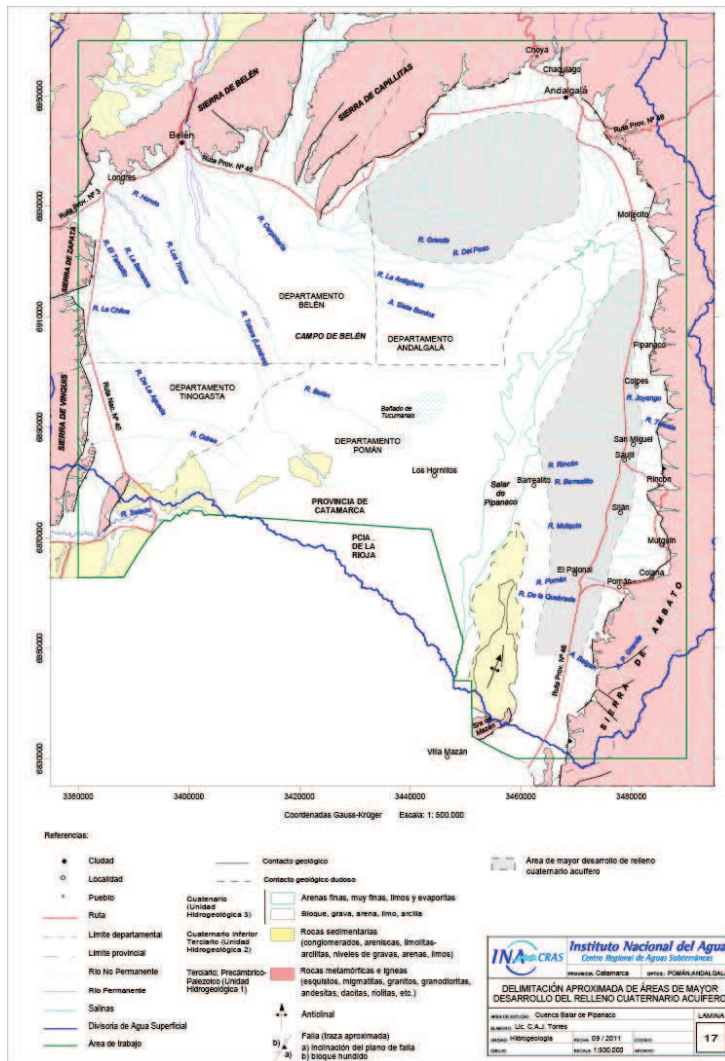


Figura III.3: delimitación de áreas de mayor desarrollo del relleno cuaternario.

Fuente: Bucich et al. (2011)

Cuenca del río Santa María

- **Recursos hídricos superficiales**

Los bordes de la cuenca de río Santa María están constituidos por la sierra de El Cajón o de Quilmes al Oeste y las Cumbres Calchaqués-Aconquija al Este; ambos bloques montañosos cuentan con una permeabilidad secundaria por fracturas y diaclasas, que permiten drenar las aguas desde las altas cumbres en una importante red de arroyos y ríos temporarios (Ruiz & Tineo, 2014).

El río Santa María presenta dirección curso sur-norte y es el colector principal del valle, con un caudal medio aforado de 2,46 m³/s (Paoli, 2003). Las aguas superficiales del valle

son en su mayoría de carácter temporario, debido a la elevada permeabilidad del sustrato y a su aprovechamiento intensivo, tanto para consumo humano como para riego (Ruiz & Tineo, 2014).

- **Recursos hídricos subterráneos**

La zona de explotación de los recursos hídricos subterráneos se restringe a la parte más deprimida del valle de la cuenca; esta zona tiene un ancho de 4 km y abarca alrededor de 160 km² (Ruiz & Tineo, 2014). El acuífero superior de la cuenca de Santa María está formado por una capa de arenas y gravas que se distribuye a lo largo del valle alcanzando una profundidad que va desde los 15 m hasta los 120-150 m (Ruiz & Tineo, 2014); mientras que el acuífero profundo presenta menor granulometría y tiene una profundidad estimada en 300 metros en el centro del valle, y 150 metros hacia los sectores de borde de los cordones montañosos (Ruiz & Tineo, 2014).

El flujo subterráneo presenta una circulación similar al flujo superficial del río Santa María, extendiéndose la zona de descarga del agua subterránea 1 km a ambos lados del canal de estiaje del mismo. Esta es la zona con mayores posibilidades para la explotación del agua subterránea, por encontrarse material sedimentario de granulometría adecuada que facilita la perforación y donde se localizan los niveles de explotación más favorables (Ruiz & Tineo, 2014). El agua obtenida en las perforaciones de la cuenca es apta para el consumo humano y la hacienda y de buena calidad para riego (Ruiz & Tineo, 2014).

Existen datos de perforaciones en Puesto de Incalilla, con niveles freáticos de entre 8 y 24 m de profundidad, en Amaicha con profundidades de 12 a 29 m, y en los alrededores de El Bañado se encuentra todo saturado hasta una profundidad de entre 10 y 16 m llegando a existir afloramientos de aguas superficiales formando lagunas (Ruiz & Tineo, 2014). Por debajo existen acuíferos sometidos a presión, generalmente por debajo de los 20 metros desde la boca de pozo con niveles que ascienden en todas las perforaciones hasta profundidades que oscilan entre 15 y 30 metros bajo boca de pozo (Ruiz & Tineo, 2014). Algunos pozos ubicados en la margen oeste del río Santa María frente a la localidad de Fuerte Quemado muestran niveles estáticos entre los 7 y 20 metros y caudales de hasta 200 m³/hora, mientras que en la zona de Punta de Balasto hay perforaciones hasta una profundidad de 150 m, con niveles estáticos comprendidos entre 80 m en la margen este del río, y 25 metros en la margen oeste del río (Ruiz & Tineo, 2014).

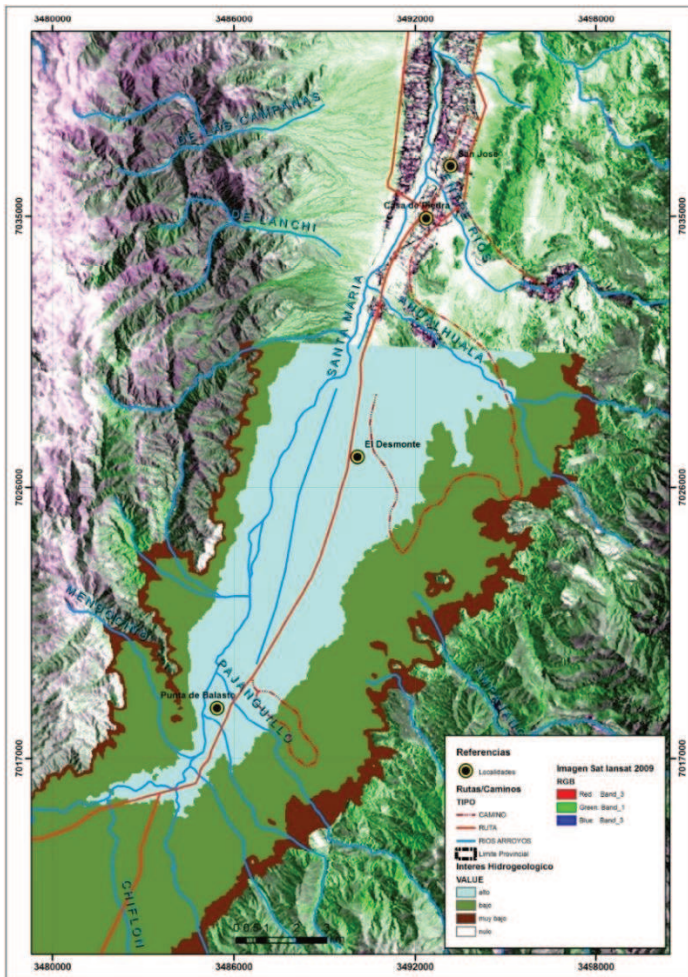


Figura III.4: áreas de interés hidrológico subterráneo sector sur de la cuenca.

Fuente: Ruiz & Tineo (2014).

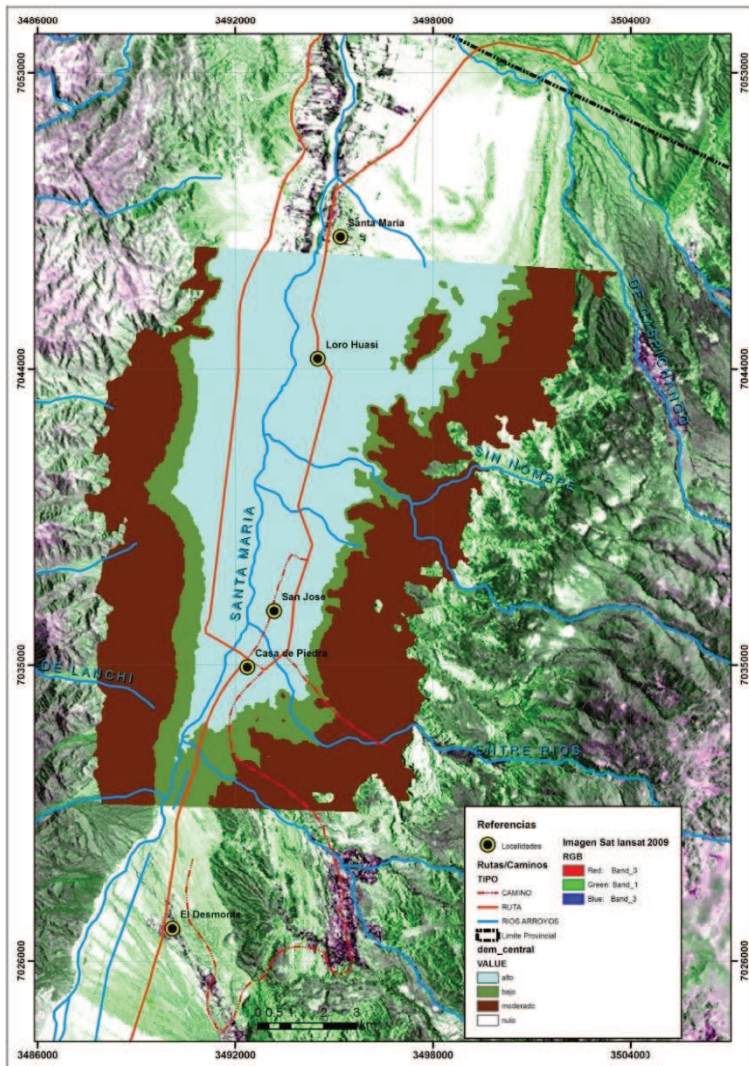


Figura III.5: áreas de interés hidrológico subterráneo sector medio de cuenca.

Fuente: Ruiz & Tineo (2014).

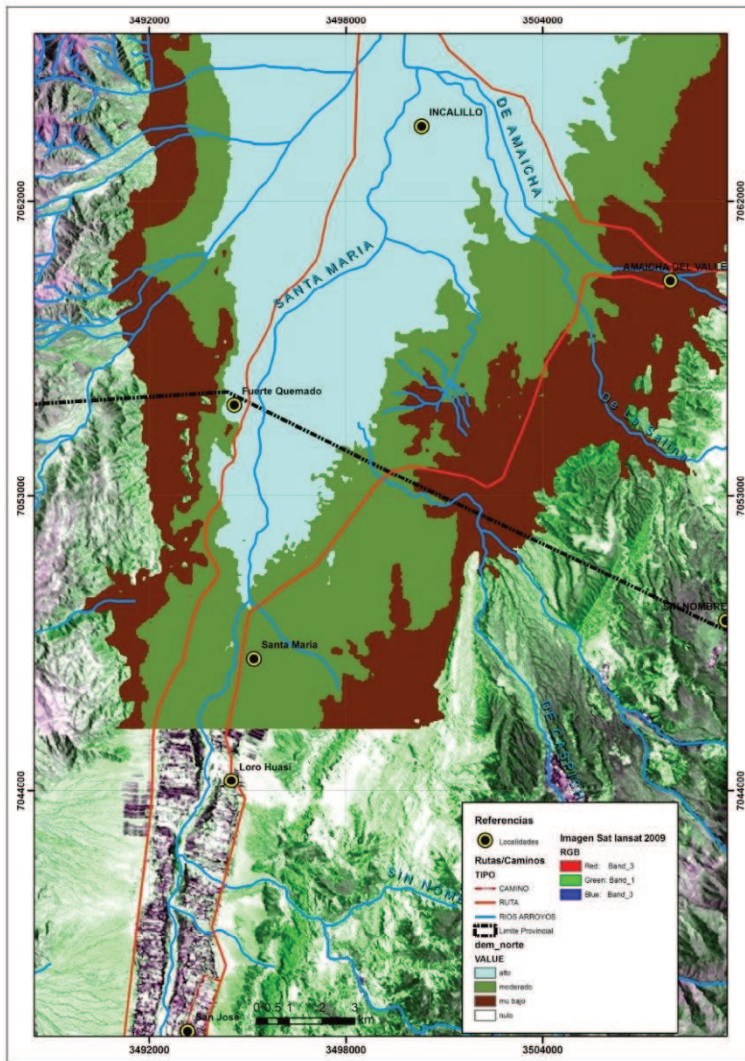


Figura III.6: áreas de interés hidrológico subterráneo sector norte de cuenca.

Fuente: Ruiz & Tineo (2014).

Cuenca Valle Central (Falda oriental de Ambato)

- **Recursos hídricos superficiales**

El dique Las Pirquitas regula los caudales del río del Valle estimados en $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bucich et al., 2008), cuya cuenca superior tiene una superficie de 1.400 km^2 . Este río es el más caudaloso de Catamarca y presenta un derrame anual de 140 hm^3 , registrándose los caudales máximos entre septiembre y octubre (Nuñez -Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004). El sistema que riega este dique está conformado por las colonias de Nueva Coneta y del Valle, en el departamento de Capayán, e inicia en el dique toma Payahuayco, ubicado sobre el río del Valle aguas abajo del dique Las Pirquitas; allí se deriva el agua a un canal matriz revestido de 36 km de longitud con una capacidad de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, que se

encuentra reducida a $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales una parte se destina a satisfacer necesidades de consumo de la población (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004). La superficie total de las colonias es de 7.500 ha subdivididas en lotes de 20 ha en Nueva Coneta y de 32 ha en Colonia del Valle. El caudal está limitado por la pérdida de capacidad del embalse Las Pirquitas y por las malas condiciones de mantenimiento del canal principal y de la red secundaria (Nuñez- Aguilar & Alvarez de Toledo, 2004).

Existen otros ríos afluentes del río Del Valle, cuyos caudales no han sido aforados; por ejemplo, los ríos Los Puestos y Huallumil, al norte de la cuenca, los cuales convergen para formar el curso del río Del Valle (Demin, 2013).

La conductividad eléctrica se mantiene en toda la cuenca, en valores con bajo riesgo de salinidad según el valor máximo establecidos de $2,3 \text{ dS/m}$ (Demin, 2013).

- **Recursos hídricos subterráneos**

El recurso hídrico subterráneo es un embalse natural subterráneo con límites laterales definidos por las sierras de Ancasti, Graciana y Ambato. Los sedimentos cuaternarios que cubren la mayor parte de la extensión de las depresiones intermontanas presentan la mayor parte del agua utilizable en la región (Bucich et al., 2008). La unidad superior del acuífero está formada por depósitos sedimentarios no consolidados de arenas y gravas del cuaternario cuyo límite superior es la superficie freática, mientras que la inferior está compuesta por depósitos sedimentarios terciarios con tamaño medio de granos considerablemente menor (Vigo, 2010). La formación clástica fina presenta los mayores espesores (del orden de los 500 m) a la altura del centro del valle sobre su margen Oeste y sector Este, mientras que la formación clástica gruesa aumenta hacia el Norte del valle, alcanzando los 200 m de profundidad, y llegando a valores inferiores a los 10 m en el sur del valle (Bucich et al., 2008).

La infiltración desde los lechos de ríos y arroyos del faldeo oriental y norte de la sierra de Ambato, es la principal entrada de agua al sistema, mientras que el faldeo occidental de la sierra de Ancasti complementa con aportes de menor magnitud. Los caudales de los pozos representativos para uso rural alcanzan los $100\text{-}150 \text{ m}^3/\text{h}$, con perforaciones cuya profundidad oscila alrededor de 120 m (Vigo, 2010).

La calidad del agua para riego evaluada por Bucich et al. (2008) , siguiendo el criterio de determinar su peligrosidad salina y su peligrosidad sódica mediante la CE a 25° C y la relación de adsorción de sodio (RAS), resulta Buena (C2S1) y Buena a Regular (C3S1; C3S2).

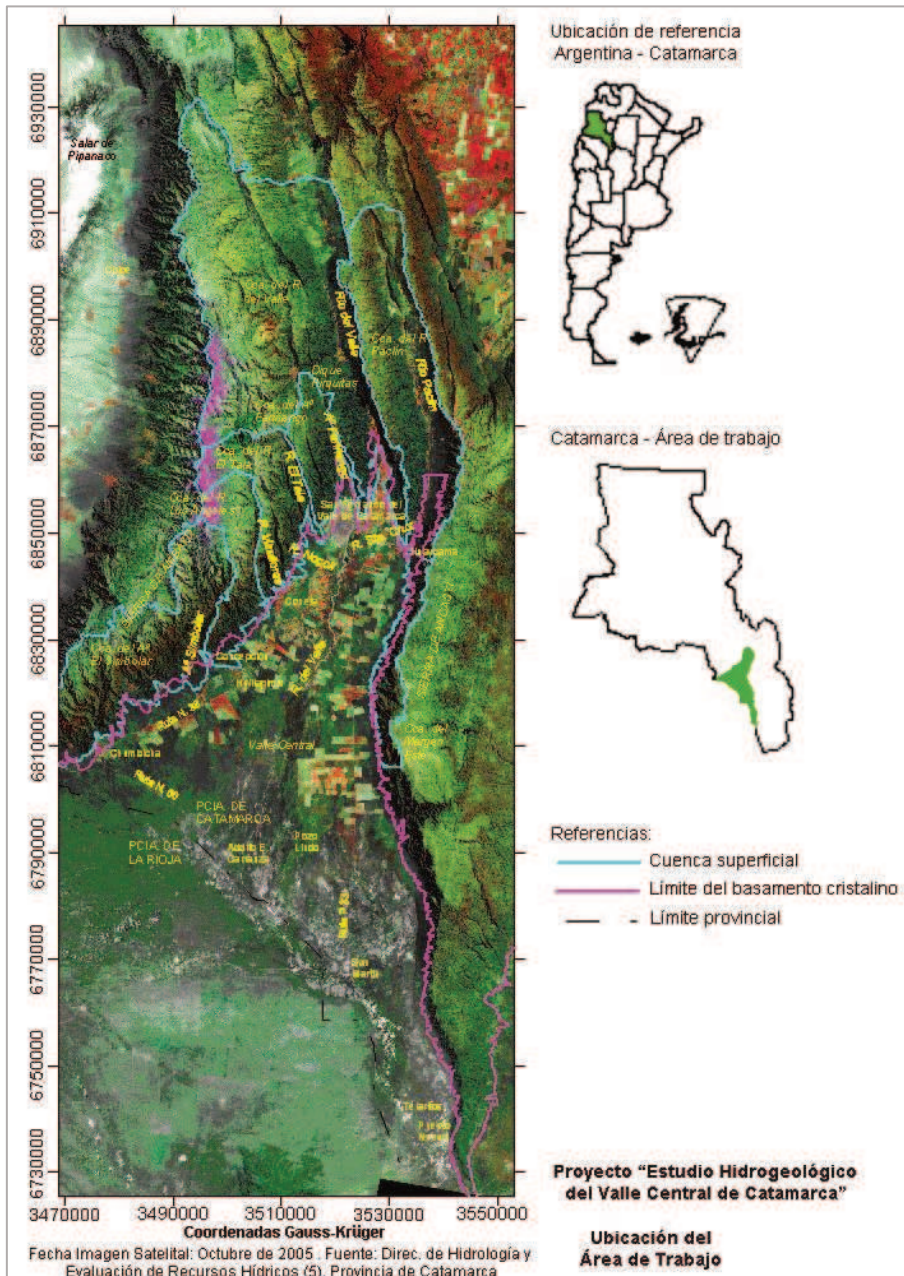


Figura III.7: ubicación de la cuenca Del Valle y sus límites.

Fuente: Denim (2013).

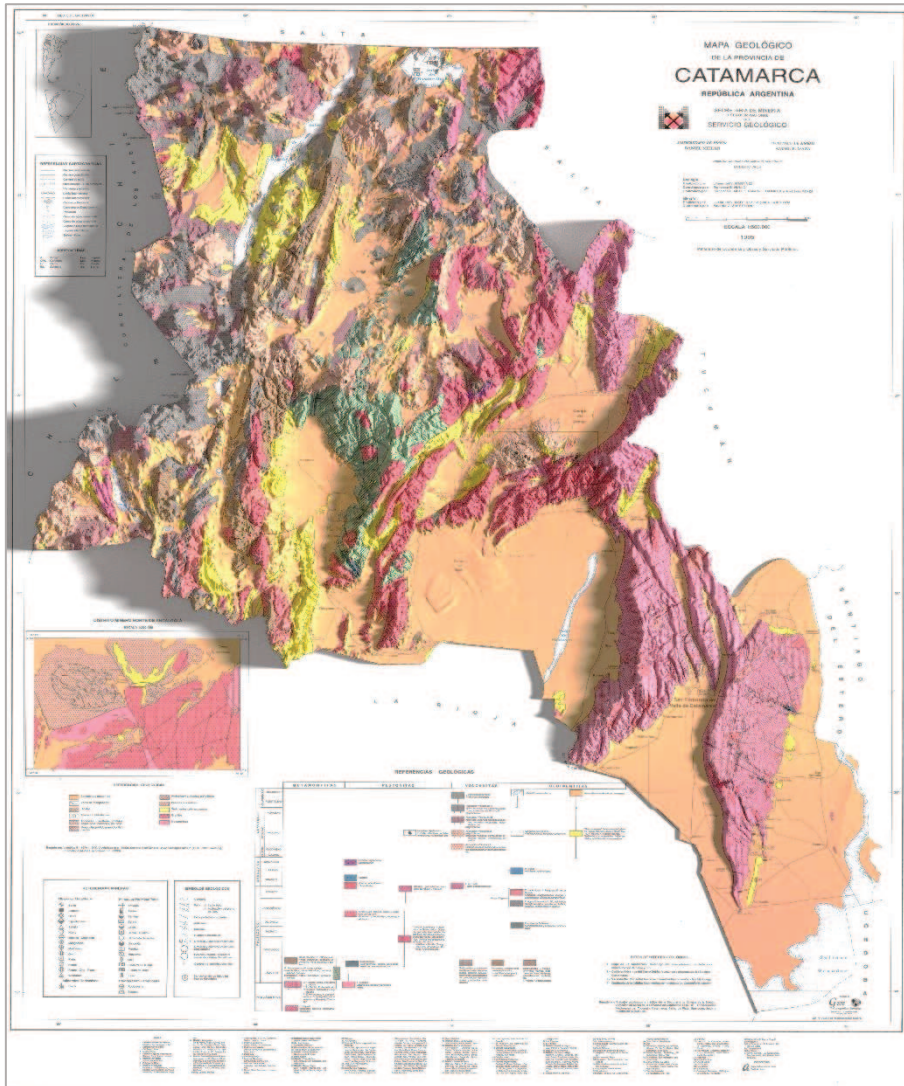


Figura III.8: mapa geológico de la provincia de Catamarca.

Fuente: IDECAT (2023).

Cuenca Falda Oriental de Ancasti.

La cuenca está delimitada al oeste por la sierra Ancasti y descarga al sur en las Salinas Grandes. Abarca los departamentos de La Paz, Ancasti y El Alto.

- **Recursos hídricos superficiales**

Es una cuenca que no cuenta con ríos importantes, sino con pequeños cursos que alimentan oasis productivos a partir de diques, que también permiten el aprovechamiento del agua para consumo humano (INA, 2010). Entre los oasis más importantes cabe mencionar: El Alto, Collagasta, Achalco, La Tuna, Iloga, Tapso, Los Altos, Vilismán, La Calera, Los Corrales, Los Morteros, Bella Vista, Albigasta, Tacana y Vallecito. Estos oasis desempeñan actividades agropecuarias poco desarrolladas, destacándose entre ellas

El Alto y Collagasta que han tenido una mayor evolución por la presencia del dique de Collagasta (INA, 2010).

La Colonia de Achalco, localizada sobre la ruta nacional número 157 tiene como fuente de agua para riego y consumo humano al dique de Collagasta, el cual tiene una capacidad de 9 hm³ y embalsa las aguas del río Guayamba. La superficie explotable en la colonia es de 2.600 hectáreas, de las cuales solo se aprovecha sólo el 17 por ciento. Sus principales cultivos son hortícolas, forrajeras, y frutales (INA, 2010).

Hacia el sur de la Región Este, el departamento de Ancasti cuenta con la presencia de los diques de Ipizca y Motegasta. El dique Ipizca tiene una capacidad de embalse de 9 Hm³ y proporciona agua a las colonias Icaño y Motegasta, en la localidad de Icaño (departamento de La Paz); esta colonia tiene una superficie aprovechable de 1.322 hectáreas, de las cuales se explota alrededor de un 13 %, pudiéndose citar entre sus cultivos principales las hortalizas y forrajeras (INA, 2010).

La colonia Motegasta toma agua para riego del dique Motegasta, el cual tiene una capacidad de embalse de 7 hm³, y también provee de agua potable a la ciudad de Recreo. La superficie explotable de la colonia es de 2.161 hectáreas de las que se usa apenas un 7%. Los principales cultivos en esta colonia son: hortalizas, forrajeras y frutales (INA, 2010).

- **Recursos hídricos subterráneos**

En esta región existen fuentes de agua subterránea con calidades diferentes y con ciertas limitaciones en la cantidad que a extraer (CONHIDRO, 2011). El flujo de agua subterránea tiene un sentido general noroeste – sureste, manifestándose la Sierra de Ancasti como la principal área de recarga a partir de las precipitaciones que allí ocurren y las Salinas Grandes como zona de descarga (Bucich et al., 2011). Además, en el sector noreste de la cuenca se presenta una divisoria de aguas asociada a las lomadas de edad terciaria que se desarrollan entre las latitudes de Recreo y Frías (Bucich et al., 2011). De esta forma, se desarrolla entre las sierras de Ancasti y Recreo una cuenca con relleno moderno, conformado principalmente por facies arenosas que se encuentran saturadas con agua de buena a muy buena calidad, donde pueden obtenerse importantes caudales de extracción (CONHIDRO, 2011).

En los entornos de las Sierras de Ancasti y Recreo, el potencial hidrogeológico disminuye drásticamente, por la presencia de acuíferos pobres que contienen agua de moderado a elevado tenor salino (CONHIDRO, 2011).

La profundidad máxima del nivel freático está comprendida entre unos 40 m y más de 47 m en una franja de orientación noreste-suroeste que se extiende desde Esquiú al sur hasta la latitud de San Antonio, mientras que las menores profundidades (del orden de los 3 a 7 m) se ubican al sureste de La Guardia–Recreo, en dirección a las Salinas Grandes (Bucich et al., 2011).

El área con los mayores espesores saturados con una conductividad eléctrica menor a $2250 \mu\text{S}/\text{c}$, se ubican sobre un eje central de la cuenca, elongado en sentido nor-noreste – sur-suroeste, con valores superiores a 50 m y máximo de 140 m ubicado al noroeste de la localidad de Recreo (Bucich et al., 2011). Las mayores profundidades se ubican en coincidencia con los mayores espesores saturados, correspondiendo con profundidades con valor máximo próximo a 50 m al noroeste de la localidad de Recreo (Bucich et al., 2011).

De acuerdo a lo determinado en Bucich et al. (2011), la conductividad eléctrica del agua dentro de la cuenca varía en rangos amplios, localizándose la zona con agua de menor salinidad en el sector nor-noroeste del valle y en las proximidades de la Sierra de Ancasti, y desmejorando hacia el Este y el Sur.

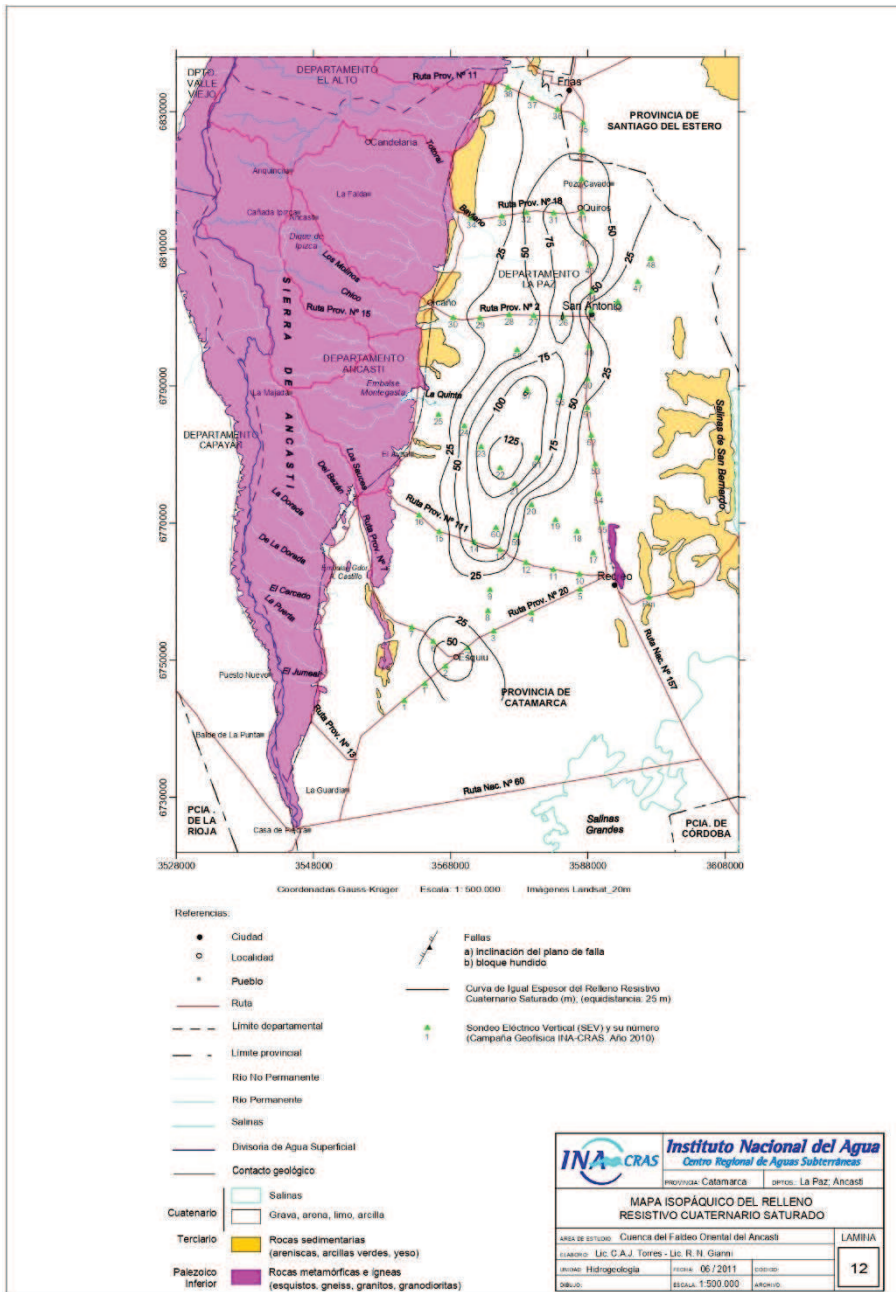


Figura III.9: mapa isopáquico del relleno resistivo cuaternario saturado.

Fuente: Bucich et al. (2011)

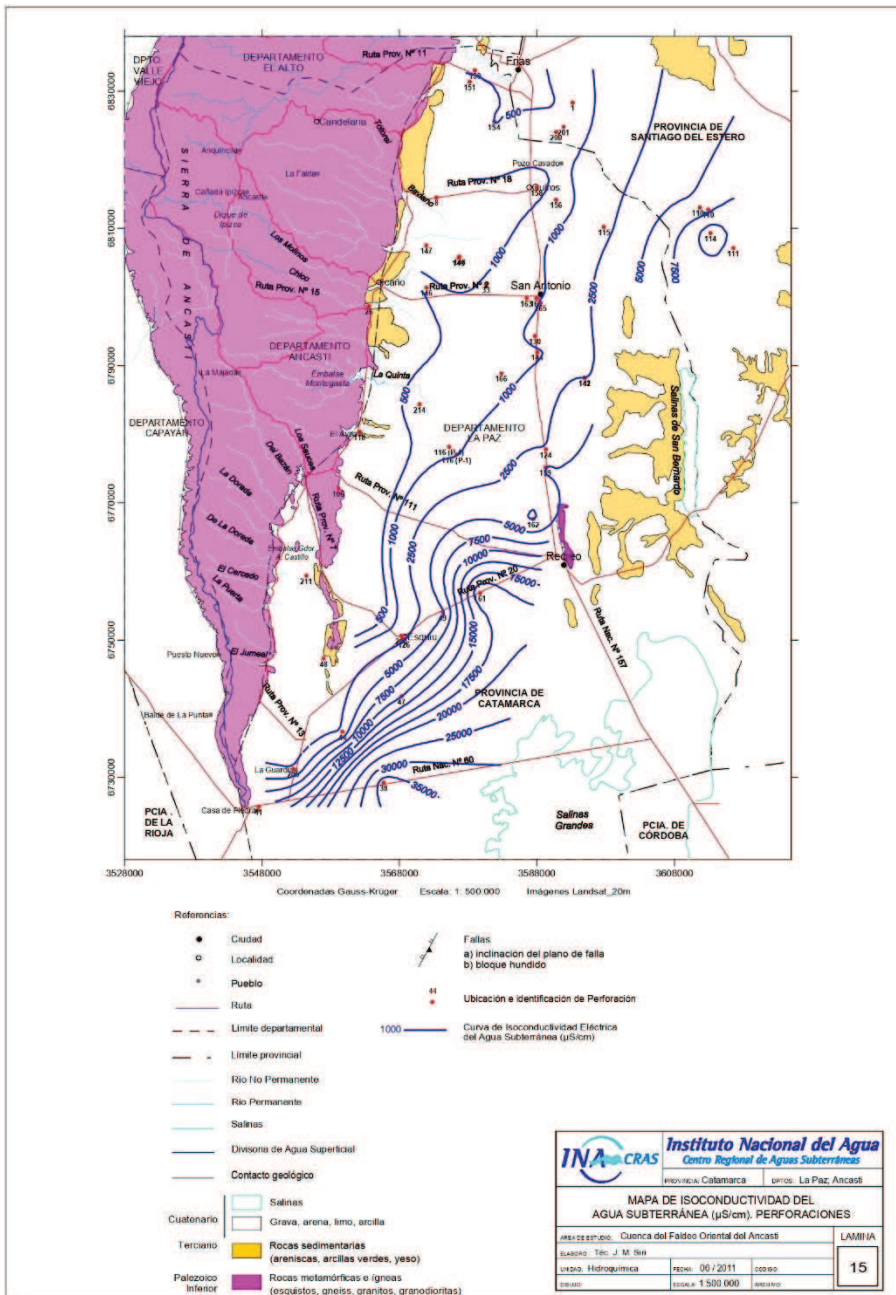


Figura III.10: mapa de isoconductividad del agua subterránea.

Fuente: Bucich et al. (2011).

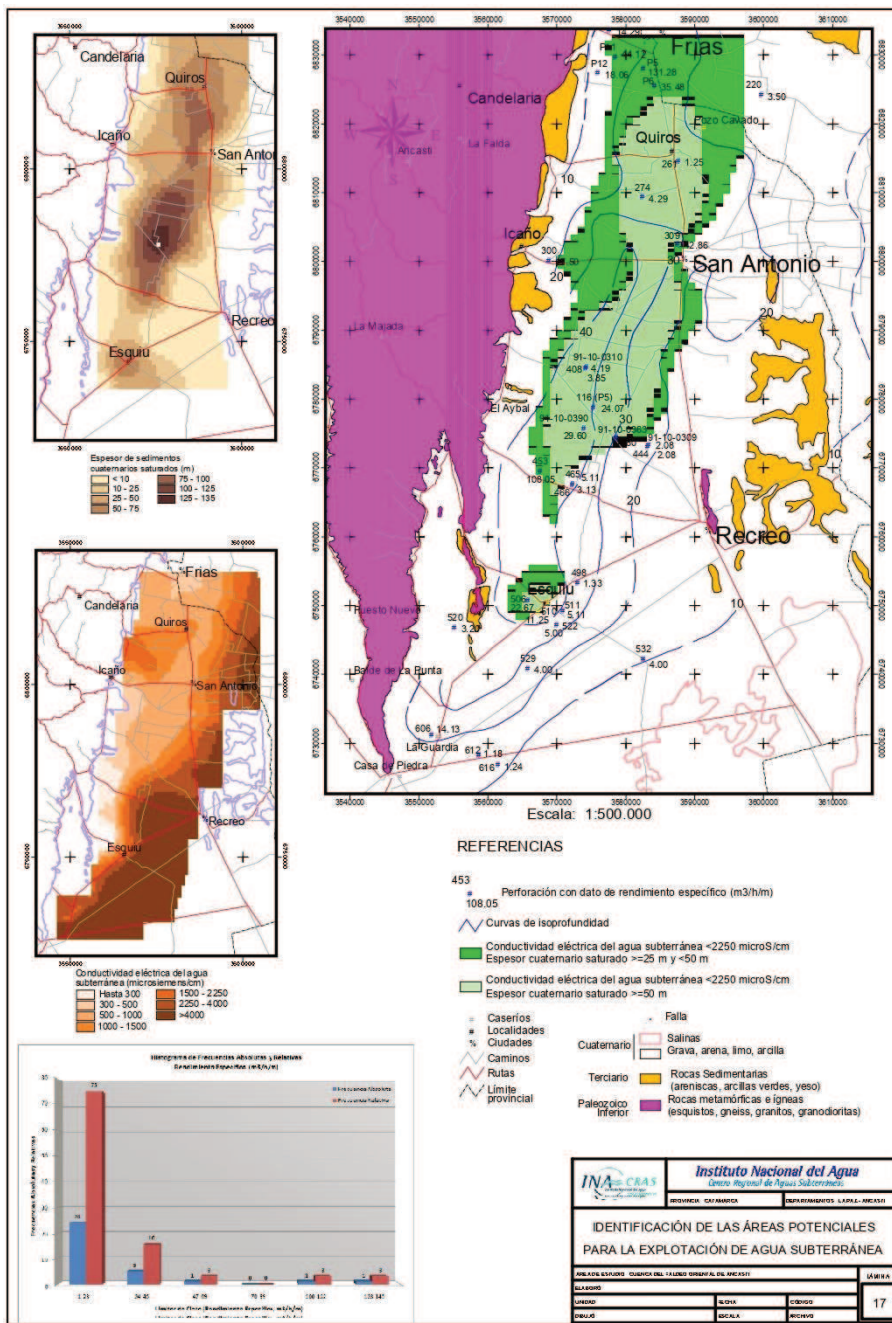


Figura III.11: áreas potenciales para la explotación de agua subterránea.

Fuente: Bucich et al. (2011).

Cuenca Laguna Mar Chiquita (Cuenca Santa Rosa)

Esta cuenca abarca por completo el departamento de Santa Rosa, al norte de la Falda Oriental de Ancasti.

- **Recursos hídricos superficiales**

Al igual que la cuenca Falda Oriental de Ancasti, en la cuenca Santa Rosa no existen cursos de agua importantes, por lo cual el abastecimiento de agua en la zona sur y áreas urbanizadas se realiza mediante un sistema de canales que distribuyen el agua procedente de los diques La Cañada y Sumampa (Batistella et al., 2016; Torres et al., 2015).

En el Distrito Manantiales se encuentra la colonia Alijilán-Manantiales, que toma agua para riego del dique La Cañada, con una capacidad de embalse de 10 hm³; esta colonia cuenta con 2.335 hectáreas explotables de las cuales se aprovecha aproximadamente el 60 %, con cultivos industriales, forrajeros, y frutales (INA, 2010).

El dique Sumampa, por su parte, tiene una capacidad de 17 hm³ y provee agua a la colonia Los Altos, la cual posee una superficie explotable de 2.800 hectáreas, de las cuales se aprovecha un 25 %, distribuidos en cultivos hortícolas, industriales, forrajeros, y frutales (INA, 2010).

- **Recursos hídricos subterráneos.**

La dirección del flujo subterráneo en el departamento Santa Rosa es Suroeste-Noreste, localizándose la zona de mayor desarrollo de acuíferos explotables en el centro geográfico de la cuenca (Batistella et al., 2016; Segura et al., 2019). El área de recarga de la cuenca de agua subterránea del Valle de Santa Rosa se vincula a las sierras de El Alto – Ancasti y Guayamba, a partir de las precipitaciones pluviales que allí ocurren (Batistella et al., 2016), moviéndose subterráneamente en general hacia el noreste en dirección a las partes más bajas del valle de Santa Rosa, y egresando de éste hacia las provincias de Tucumán y Santiago del Estero (Torres et al., 2015).

La extracción de agua subterránea por bombeo de pozos, responde en general a la necesidad de riego complementario para las explotaciones agrícolas, donde el riego se realiza principalmente con sistema de aspersión a pivote central, aplicado con mayor densidad en el centro, centro-norte y noroeste del área (Batistella et al., 2016). El caudal extraído es de 200 m³/h promedio, llegando a un máximo de unos 370 m³/h, con una profundidad media de las perforaciones que ronda los 180 m (Batistella et al., 2016; Torres et al., 2015).

En cuanto a la profundidad del nivel estático del agua subterránea, en cercanías de las sierras del borde sur se dan profundidades menores a 10 m, en el sector noroeste se dan profundidades inferiores a los 30 m, y en el sector centro y centro–este se profundiza el nivel de agua subterránea hasta máximos de 80 m (Batistella et al., 2016).

En cuanto a la calidad del agua, de acuerdo a lo informado en Batistella et al. (2016), la conductividad eléctrica en la cuenca no supera los 1800 microS/cm, encontrándose los menores valores hacia la zona centroeste y noroeste, coincidentemente con la localización de los abanicos aluviales del Río San Francisco y Río de la Capellanía. De acuerdo a un estudio realizado por Torres et al. (2015) la salinidad total del agua subterránea en la cuenca no supera los 1000 μ S/cm, localizándose la zona de menor salinidad en el sector noroeste del área de estudio. En el mismo estudio, Torres et al. (2015) indican que la calidad de estas aguas para riego, de acuerdo a su conductividad eléctrica es de clase C2 y C3 (es decir que poseen una peligrosidad salina entre media y moderada según el criterio del laboratorio del Riverside), mientras que los valores de RAS clasifican a la mayoría de estas muestras entre S2 y S3 (peligrosidad sódica entre media y alta).

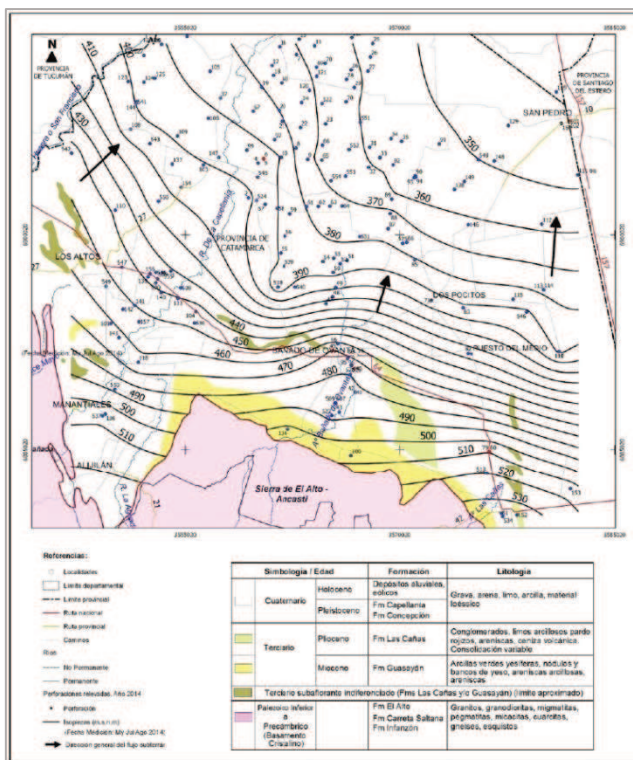


Figura III.12: mapa de isopiezas de la cuenca de Santa Rosa.

Fuente: Batistella et al. (2016)

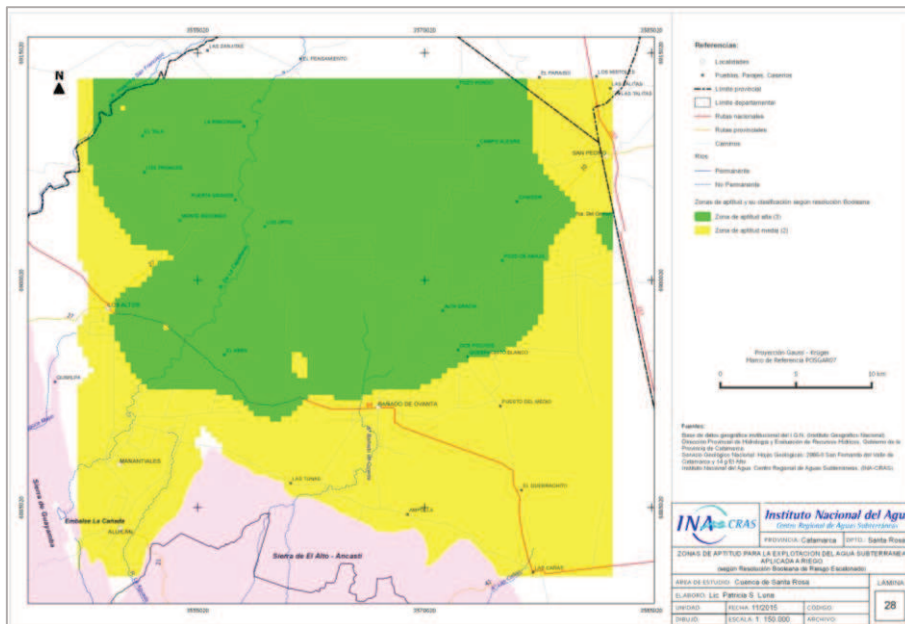


Figura III.13: mapa de aptitud para riego de los recursos hídricos subterráneos

Fuente: Torres et al. (2015)

Referencias bibliográficas

- Batistella, R.; Ortega, I.; Morvillo, M.; & Luna, P. (2016). Caracterización Hidroquímica de la Cuenca de Santa Rosa con Métodos Multivariados y Predicción Espacial de Contaminantes. Tercer Encuentro de Investigadores En Formación En Recursos Hídricos. IFRH, 1–15. https://www.ina.gov.ar/ifrh-2016/trabajos/IFRH_2016_paper_124.pdf
- Bucich, N.; Savio, M.; Gianni, R. N.; Guimaraes, R.; & Luna, P. (2008). Estudio hidrogeológico Valle Central de Catamarca Informe Final. Departamentos: Capital, Fray Mamerto Esquiú, Capayán, Valle Viejo. Provincia de CATAMARCA. www.ina.gov.ar/cras@ina.gov.ar
- Bucich, N.; Torres, C.; García Perón, E.; Gianni, R.; & Luna, P. (2011). Estudio Hidrogeológico en la cuenca del Faldeo Oriental del Ancasti. www.ina.gov.ar/cras@ina.gov.ar
- Bucich, N.; Torres, C.; Gianni, R.; & García Perón, E. (2011). Estudio Hidrogeológico en la cuenca del Salar de Pipanaco. www.ina.gov.ar/cras@ina.gov.ar
- CONHIDRO. (2011). Línea de base ambiental de los recursos hídricos subterráneos área de influencia Recreo. https://liex.com.ar/informes/Informe_Liena_Base_Recreo_Oct_2018.pdf

- Demin, P. E. (2013). Caracterización preliminar de la calidad del agua en la cuenca superior del río Del Valle (Catamarca). *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 45(1), 53–61.
- Fernández-Turiel J.L.; Córdoba G. del V.; Gimeno D.; García-Vallès M.T.; Saavedra J., R. F. (2008). Calidad de las aguas superficiales y subterráneas del oeste de la Sierra de Calidad de las aguas superficiales y subterráneas del oeste de la Sierra de Ambato, Catamarca, Argentina. In U. de S. Martín (Ed.), *Las Fronteras de la Física y Química Ambiental en Ibero América: Ponencias completas del V Congreso Iberoamericano de física y química ambiental* (1st ed.).
- IDECAT (2023). Infraestructura de datos espaciales de la provincia de Catamarca. <https://nodoide.catamarca.gob.ar/>
- INA (2010). Relevamiento de la Disponibilidad de Recursos Hídricos Superficiales de: Cuenca Salar de Pipanaco Cuenca Abaucán - Colorado - Salado Cuencas Faldeo Oriental del Ancasti.
- Núñez-Aguilar, F. A.; & Álvarez de Toledo, J. M. (2004). *El Riego En La Provincia De Catamarca*.
- Paoli, H. P. (2003). Aprovechamiento de los recursos hídricos y tecnología de riego en el altiplano argentino. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-aprov_rh.pdf
- Ruiz, A.; & Tineo, A. (2014). Estudio hidrogeológico valle del río Santa María – Sector Catamarca.
- Segura, L.; Saracho, M.; Lobo, P.; & Leguizamón, M. (2019). Calidad química de los recursos hídricos subterráneos en las cuencas de la falda oriental de la sierra de Ancasti, Catamarca, Argentina. *Revista de Geología Aplicada a La Ingeniería y al Ambiente*, 43, 1–15. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7384133>
- Tálamo, E.; Rodríguez, M.; Bea, S.; Vives, L.; Mira, A.; García, R.; Moya Ruiz, F.; & Rocha, V. (2016). Modelo hidrogeológico del Salar de Pipanaco, provincias de Catamarca y La Rioja, Argentina. In R. García & E. Mariño (Eds.), *Calidad del Agua Subterránea: Actas IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. (pp. 87–94). Editorial Científica Universitaria UNCA. <https://digital.cic.gba.gob.ar/items/1093677e-3e27-4355-9064-759d30d03bfd>
- Torres, C. A. J.; Bucich, N. G.; Perón, E. G.; Gianni, R. N.; & Luna, P. S. (2013). Estudio Hidrogeológico en la Cuenca Abaucán – Colorado –Salado. Catamarca, Argentina. In E. de la U. N. de L. P. (EDULP) (Ed.), *Agua subterránea, recurso*

estratégico Tomo I (1st ed., pp. 170–177).
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/103434>

Torres, C. A. J.; García, E.; Gianni, R.; Luna, P.; Salvioli, G.; & Urnicia, J. (2015). Estudio hidrogeológico de la cuenca de Santa Rosa. Departamentos: Santa Rosa, EL Alto, Paclín y Ambato. Provincia de Catamarca. Informe final. www.ina.gov.ar/cras@ina.gov.ar

Vigo, M. (2010). Recursos Hídricos. In Propuestas para el Diseño Urbano Bioambiental en Zonas Cálidas Semiáridas. Caso Área del Gran Catamarca. Tomo I (Editorial, pp. 978–987). [http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicacione on line/DIGITESIS/marta vigo/pdf/I.1introduccion.pdf](http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20online/DIGITESIS/marta%20vigo/pdf/I.1introduccion.pdf)

ANEXO IIIb

MAPAS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS POR CUENCAS

En este anexo se presentan las salidas cartográficas de los recursos hídricos distribuidos por cuenca. Se puede observar a la izquierda la distribución espacial de los recursos hídricos superficiales clasificados según su tipo (recursos permanentes, recursos no permanentes, recursos salinos y/o sódicos, recursos con obras de riego deterioradas, y no disponibles), y a la derecha los recursos hídricos subterráneos clasificados según su disponibilidad (disponible/no disponible), para cada una de las cuencas hidrográficas de la provincia de Catamarca.

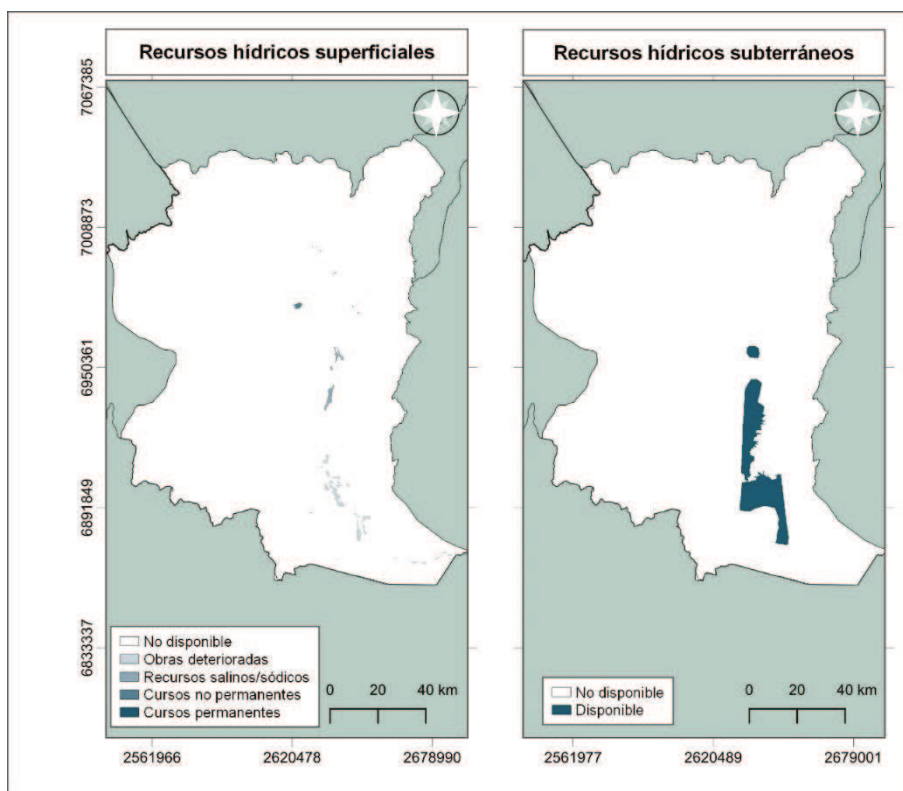


Figura III.14: disponibilidad de recursos hídricos cuenca río Abaucán-Colorado.

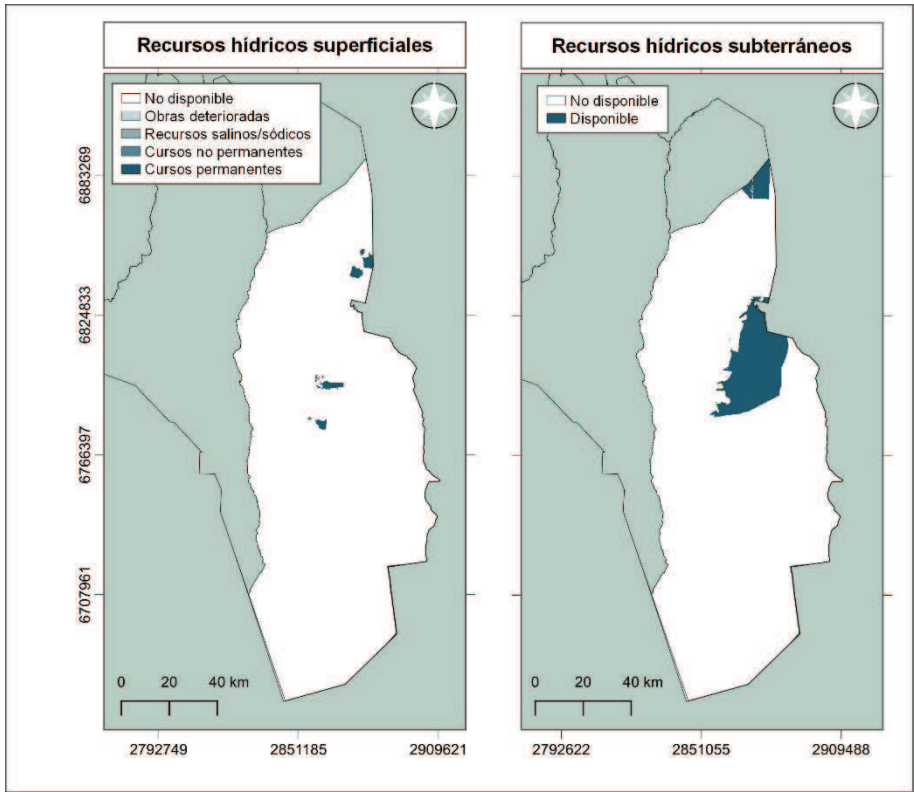


Figura III.15: disponibilidad de recursos hídricos cuenca Falda Oriental de Ancasti.

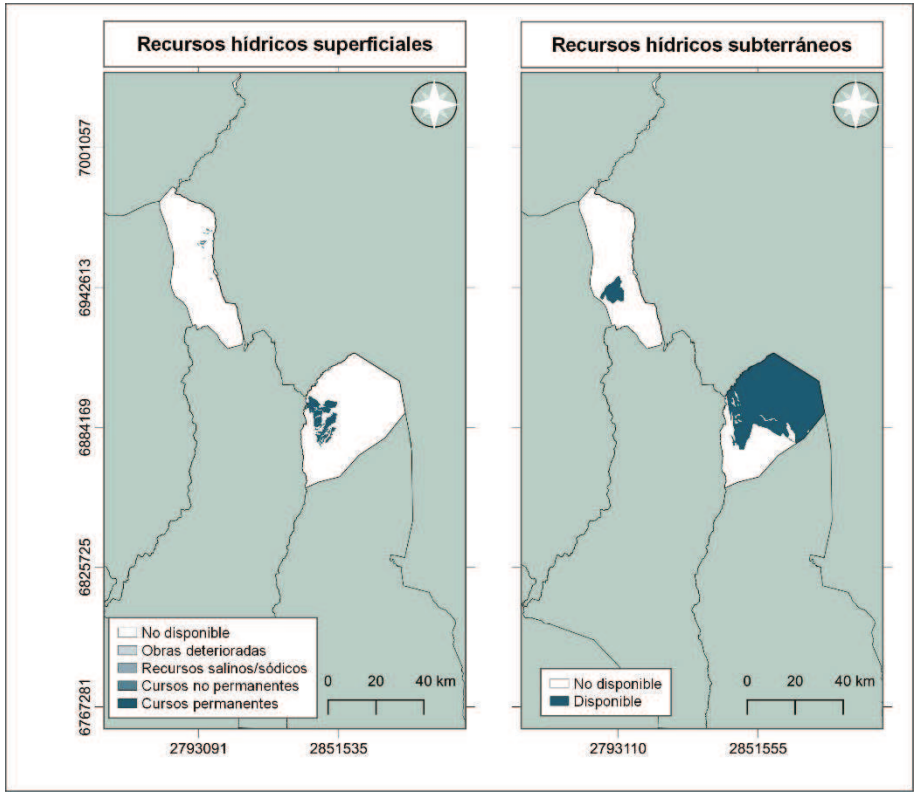


Figura III.16: disponibilidad de recursos hídricos cuenca Santa Rosa.

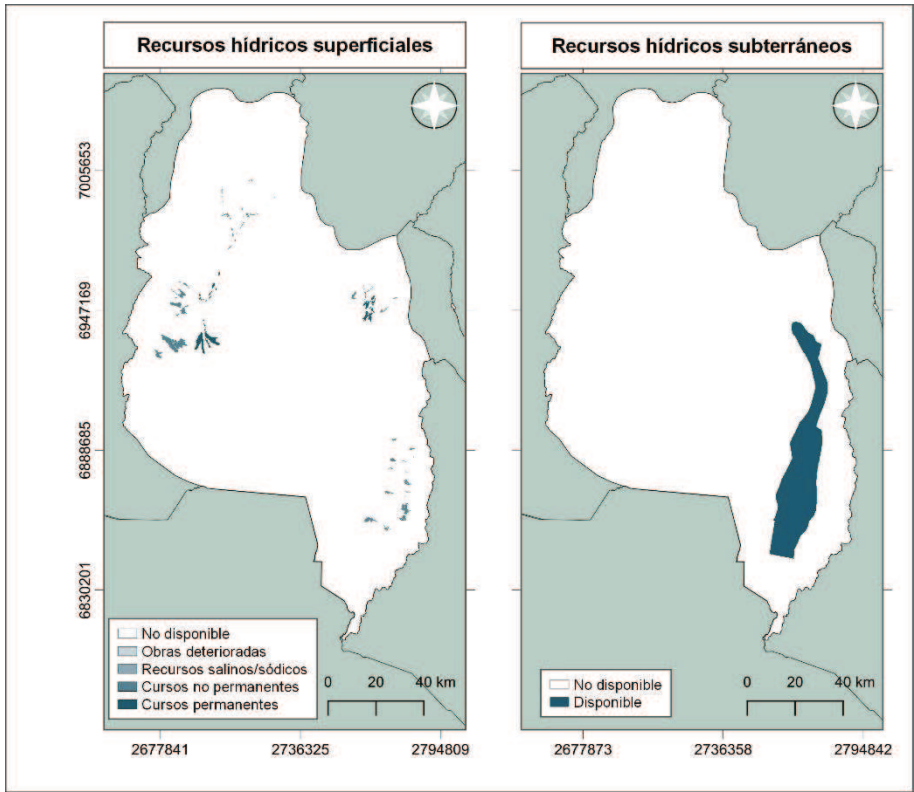


Figura III.17: disponibilidad de recursos hídricos cuenca Salar de Pipanaco.

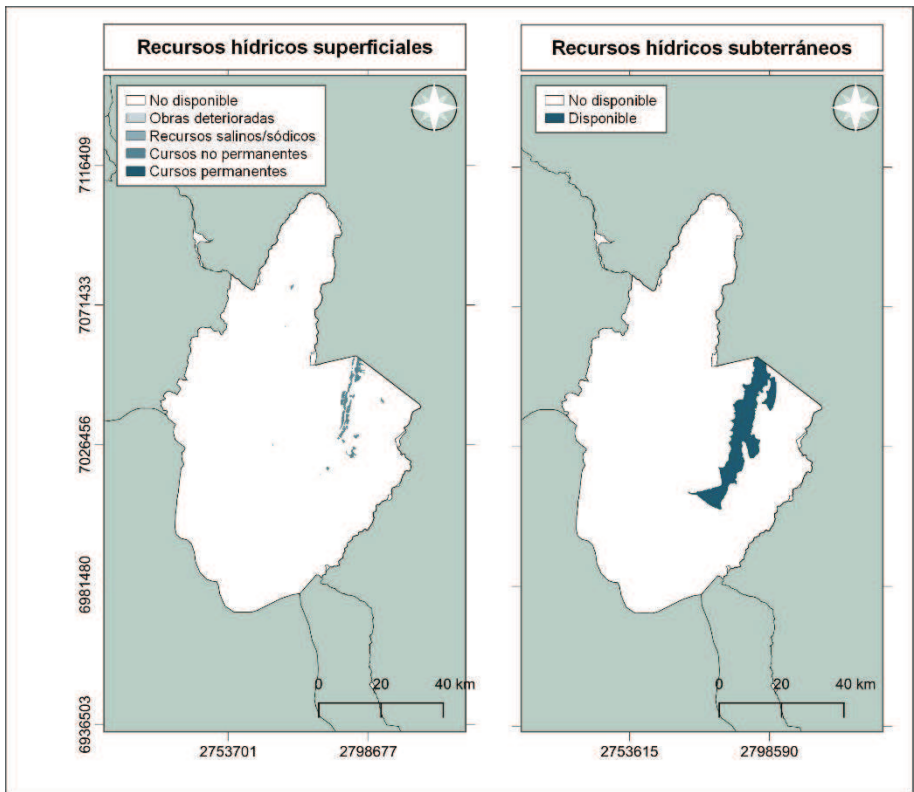


Figura III.18: disponibilidad de recursos hídricos cuenca Río Santa María.

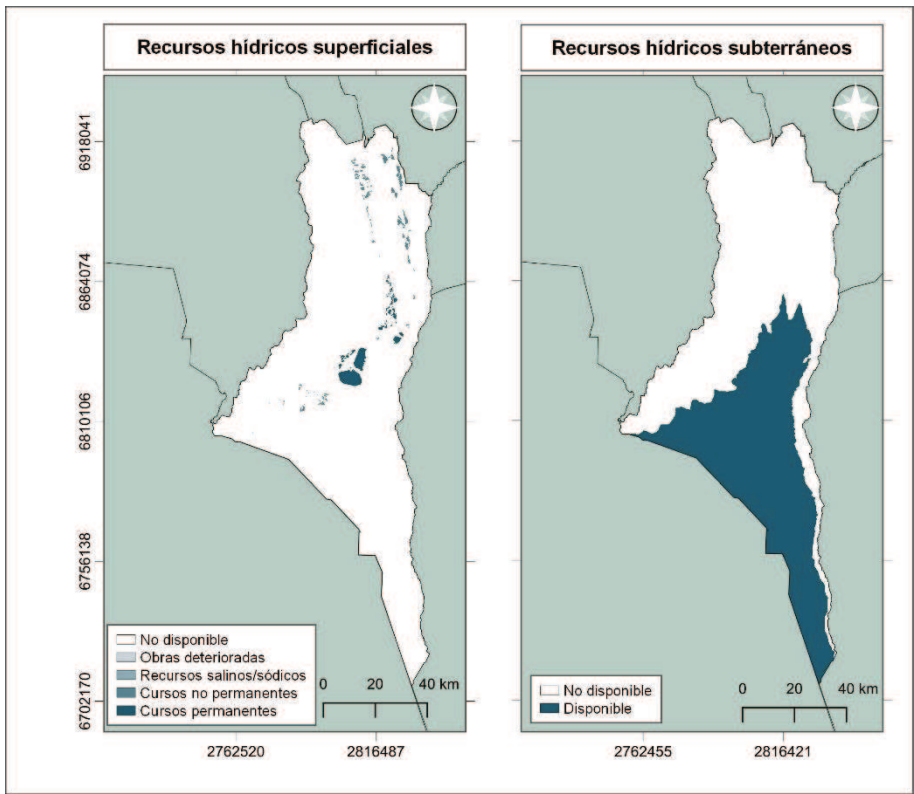


Figura III.19: disponibilidad de recursos hídricos cuenca Valle Central.