

## **Vulnerabilidad y riesgo hidroambiental en sistemas hidrológicos de llanura ante escenarios de cambio climático: aplicación al sistema “Las Encadenadas” sur de la provincia de Santa Fe.**

Magalí V. Soria  
UTN Facultad Regional Venado Tuerto  
msoria@frvt.utn.edu.ar

Este trabajo de tesis doctoral tiene como objetivo estudiar la dinámica hídrica de sistemas hidrológicos de llanura mediante la conceptualización de los procesos relevantes involucrados y la simulación hidrológica correspondiente; incorporando la incertidumbre asociada a diferentes escenarios de Cambio Climático. Corresponde mencionar que, durante los cuatro años ya transcurridos de tesis, se han logrado importantes avances como ser: acondicionamiento de un modelo digital de elevación, delimitación del área de estudio conforme unidades hidrológicas, caracterización del sector conforme tipología y usos del suelo y caracterización climática, entre otras. En la actualidad, se está finalizando con la instancia de calibración de la simulación hidrológica/hidráulica del sistema, mediante imágenes satelitales radar aplicando técnicas de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (inédito), para proseguir con la etapa de incorporación de cambio climático. Acorde a los resultados obtenidos hasta el momento, se espera lograr un análisis minucioso del comportamiento del sistema en cuestión.

**Palabras clave:** Hidrología de llanura, Modelización, Teledetección, Sistemas de Información Geográfica.

## **Vulnerability and hydro-environmental risk in plain hydrological systems in the face of climate change scenarios: application to the "Las Encadenadas" system in the south of Santa Fe province.**

The objective of this doctoral thesis is to study the hydrological dynamics of plain hydrological systems through the conceptualization of the relevant processes involved and the corresponding hydrological simulation; incorporating the uncertainty associated to different scenarios of Climate Change. It is worth mentioning that, during the four years of thesis, important advances have been achieved such as: conditioning of a digital model of elevation, delimitation of the area of study according to hydrological units, characterization of the sector according to typology and land use and climatic

characterization, among others. At present, the calibration of the hydrological/hydraulic simulation of the system is being finalized, using radar satellite images and applying Remote Sensing and Geographic Information Systems techniques (unpublished), to continue with the stage of incorporating climate change. According to the results obtained so far, it is expected to achieve a detailed analysis of the behavior of the system in question.

**Keywords:** Plain Hydrology, Modeling, Remote Sensing, Geographic Information Systems.

**Universidad Nacional de Rosario**  
**Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura**



Tesis Doctoral

**Amenaza en el Riesgo Hídrico  
en Sistemas Hidrológicos de Llanura  
Ante Escenarios de Cambio Climático:  
Aplicación al Sistema Hidrológico “Las Encadenadas”  
Sur de la Provincia de Santa Fe**

Msc. Inga. Magalí Valeria Soria

Director: Dr. Ing. Pedro Abel Basile

Co-Director: Dr. Ing. Gerardo Adrián Riccardi

*Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,  
en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de*

**Doctora en Ingeniería**

Noviembre de 2022

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de postgrado en ninguna otra Universidad o Institución.



Magali V. Soria

## Agradecimientos

A mi Director y Codirector, Pedro y Gerardo, por su excelente predisposición siempre, para brindarme sus conocimientos y su tiempo; y guiarme en esta etapa tan importante para mí.

A mis padres, Susana y Roberto, por apoyarme y enseñarme a perseverar.

A Leo, mi compañero, por facilitarme todo en esta última etapa, para que pueda culminar.

A los ex SCTyP-FRVT, Luis y Héctor, por incentivar y ayudarme para que hiciese el Doctorado; y al actual, Leandro, por guiarme desde UTN-FRVT.

A Alfredo, Daniel D. y Jorge, por apoyarme y confiar en mí para la obtención de la beca cofinanciada.

A los docentes de UTN-FRVT Daniel A., Ricardo, y Fernando, por transmitirme su entusiasmo por la Hidrología y los SIG.

A toda mi familia y amigos, por creer en mí, siempre.

## **RESUMEN**

En la presente Tesis se estudia la amenaza asociada a diversos escenarios de cambio climático (CC), en el riesgo hídrico del sistema hidrológico (SH) no típico Las Encadenadas, ubicado al sur de la provincia de Santa Fe; conteniendo herramientas y metodologías que permiten ser replicables para otro tipo de sistema hidrológico de llanura.

Debido a que el sistema no se encuentra muy estudiado, hubo que realizar la caracterización del mismo, con el objeto de comprender el comportamiento de este frente a eventos conocidos y, posteriormente, pronosticar su desenvolvimiento frente a eventos futuros acrecentados por cambio climático. Las herramientas y metodologías utilizadas para la obtención y manipulación de la información característica del sistema hidrológico fueron principalmente de la rama de la geomática; tanto por la inexistencia de información, la cual hubo que generar, como así también por la precisión y confiabilidad de trabajar con dichas herramientas. En lo que respecta a las representaciones del comportamiento del sistema, se trabajó con un modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado, resultando el más adecuado para sistemas hidrológicos de llanura. Como principales resultados del trabajo, fue lograda la cuantificación y mapeo de superficies de agua y caudales presentes en el SH, la permanencia del agua superficial y la cercanía de la misma a ejidos urbanos y redes viales, para recurrencias con y sin consideración del efecto por CC. Para las condiciones más desalentadoras: recurrencia de 100 años, suelo cuasi-saturado y Coef. de CC de 1.30; se obtuvo una superficie de 64,514 ha ocupadas con agua (19.92% de la superficie total del sistema) y caudales pico del orden de los 320 m<sup>3</sup>/s en la sección de cierre de la cuenca, un escurrimiento del agua presente del 11.6% en las primeras 24 h y del 51.2% pasadas las 193 h; con un total de 202 tramos de vías de comunicación (viales y ferroviarias) con agua en sus proximidades, 26 de los cuales presentan una longitud superior a los 1.4 km. Además, se obtuvo una nueva delimitación del sistema, la cual contempla superficies que aportan al mismo frente a eventos a partir de los 100 años de recurrencia; y se realizaron mejoras, para el área de estudio, en la zonificación y regulación del uso del suelo en áreas inundables en sistemas hídricos de la provincia de Santa Fe, de acuerdo con ley N° 11,730 en referencias a la definición de áreas con Riesgo Hídrico.

**Palabras Clave:** sistemas hidrológicos de llanura, modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado, herramientas geomáticas, Las Encadenadas, Amenaza, Cambio Climático.

## **ABSTRACT**

In this Thesis, the threat in the hydraulic risk associated with various climate change (CC) scenarios of the non-typical hydrological system (SH) called "Las Encadenadas", located in the southern part of Santa Fe province, is studied. The various tools and methodologies applied in this Thesis can be replicated in another types of flatlands hydrological systems. Due to the fact that this hydrological system is not well studied, it was necessary to characterize it in order to understand its behavior by studying past known events and, subsequently, predict its hydrological response triggered by future events increased by climate change. The tools and methodologies used to obtain and manipulate the characteristic information of the hydrological system were mainly from the branch of geomatics; both because of the lack of information, which had to be generated, as well as because of the precision and reliability of working with these tools. Regarding the representations of the behavior of the system, a distributed and physically based hydrological-hydraulic model was used, being the most suitable for flatlands hydrological systems. The main results of the work are the quantification and mapping of areal extent with surface water and flows present in the watershed, the determination of duration of areal extent of surface water and its proximity to urban sites and road networks, for different rainfall return periods, with and without consideration climate change effect. For the most discouraging conditions: 100-year rainfall return period, near-saturated soil condition and coefficient CC equal to 1.30; a surface of 64,514 ha occupied with water (19.92 % of the total watershed area) and peak flows of the order of 320 m<sup>3</sup>/s in the closing section of the watershed, were determined. In addition, a runoff of the present water of 11.6 % in the first 24 hours and 51.2 % after 193 hours; with a total of 202 reaches of communication routes (roads and railways) with water in their vicinity, 26 of which are longer than 1.4 km, were observed. Moreover, a new delimitation of the "Las Encadenadas" system was obtained, which contemplates areas that contribute to its hydrological response due to rainfall events with 100 years return period. Also improvements were made, for the study area, in the zoning and regulation of land use in flood-prone areas in the Santa Fe province, in accordance with Law N° 11,730 referred to the definition of areas with Hydraulic Risk.

**Key words:** flatlands hydrological systems, distributed and physically based hydrologic-hydraulic model, geomatic tools, Las Encadenadas, Change Climate, Threat.

## **CONTENIDOS**

<b>1. INTRODUCCIÓN A LA TESIS.....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS .....	15
<b>2. MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>16</b>
2.1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS HIDROLÓGICOS DE LLANURA.....	16
2.1.1 <i>Introducción</i> .....	16
2.1.2 <i>Descripción morfológica</i> .....	17
2.1.3 <i>Funcionamiento hidrológico</i> .....	17
2.1.4 <i>Perturbaciones antrópicas</i> .....	19
2.1.5 <i>Formas de representación</i> .....	19
2.1.5.1. Modelos hidrológicos-hidráulicos.....	19
2.1.5.2 Insumos de los modelos hidrológicos-hidráulicos .....	21
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LLANURA LAS ENCADENADAS .....	22
2.2.1 <i>Ubicación</i> .....	22
2.2.2 <i>Clima</i> .....	23
2.2.3 <i>Rasgos geomorfológicos</i> .....	24
2.2.4 <i>Tipología de suelos</i> .....	25
2.2.5 <i>Vegetación</i> .....	26
2.3 CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS SH: RIESGOS HIDROAMBIENTALES .....	28
2.3.1 <i>Concepciones sobre cambio climático</i> .....	28
2.3.2 <i>Riesgo, vulnerabilidad y mitigación</i> .....	31
2.3.2.1. Concepciones.....	31
2.3.2.2 Comunicación del riesgo.....	33
2.3.2.3 Gestión del riesgo .....	34
2.3.3 <i>Impacto del cambio climático en los SH</i> .....	35
2.3.4 <i>Menciones del IPCC sobre cambio climático en SH</i> .....	36
<b>3. ANTECEDENTES DE LA TESIS .....</b>	<b>39</b>

<b>4. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>43</b>
4.1 CONSTITUCIÓN DEL MODELO VMMHH 1.0 Y CALIBRACIÓN / VALIDACIÓN. ....	44
4.1.1 <i>Constitución del Modelo VMMHH 1.0.....</i>	<i>44</i>
4.1.1.1 Información geomorfológica .....	45
4.1.1.1.1 Corrección altimétrica del DEM .....	45
4.1.1.1.2 Generación de batimetrías .....	49
4.1.1.1.3 Delimitación marginal del SH de estudio .....	60
4.1.1.1.4 Discretización del DEM corregido .....	63
4.1.1.1.5 Determinación de rangos numéricos componentes de las subcuencas .....	64
4.1.1.2 Información hidrológica.....	64
4.1.1.2.1 Creación de unidades de respuesta hidrológica (HRU).....	65
4.1.1.2.2 Información climatológica.....	69
4.1.1.2.3 Obtención de variables del ciclo hidrológico .....	72
4.1.1.2.4 Estimación de Números de Curva CN .....	75
4.1.1.3 Información sobre canalizaciones.....	77
4.1.1.4 Información sobre alturas iniciales.....	79
4.1.1.4.1 Tratamiento de imágenes satelitales radar .....	79
4.1.1.4.2 Extracción de información de agua en superficie .....	82
4.1.1.4.3 Manipulación de información de agua en superficie.....	84
4.1.2 <i>Calibración / validación del modelo VMMHH 1.0.....</i>	<i>86</i>
4.1.2.1 Selección de eventos para la simulación del SH .....	87
4.1.2.2 Simulación de eventos climatológicos antecedentes .....	88
4.1.2.2.1 Ingreso de información altimétrica.....	89
4.1.2.2.2 Adjudicación de Número de Curva CN.....	89
4.1.2.2.3 Especificación de coeficientes de rugosidad de Manning.....	89
4.1.2.2.4 Condición de borde.....	90
4.1.2.2.5 Asignación de precipitaciones.....	91
4.1.2.2.6 Procesamiento y simulación .....	93
4.1.2.3 Validación de las simulaciones. ....	93
4.2 APLICACIÓN DE VMMHH 1.0 EN EVENTOS EXTREMOS ANTE CAMBIO CLIMÁTICO.....	104
4.2.1 <i>Definición /determinación de recurrencias de lluvia/ caudales/ hietogramas. ....</i>	<i>104</i>
4.2.1.1 Determinación de lluvias para diferentes recurrencias.....	104
4.2.1.2 Hietogramas de lluvia para distintas recurrencias considerando cambio climático.....	108
4.2.2 <i>Simulación del comportamiento del SH frente a eventos climáticos de diversas</i>	
<i>recurrencias considerando cambio climático.....</i>	<i>110</i>
4.2.2.1 Recurrencia de veinticinco años .....	112
4.2.2.2 Recurrencia de cincuenta años.....	116

4.2.2.3 Recurrencia de cien años .....	120
4.2.3 Determinación / análisis de permanencia de agua en superficie. ....	126
4.2.4 Discusión sobre delimitación del SH .....	130
4.2.5 Identificación de zonas con amenaza, Construcción de Mapas y Contrastación con áreas de Riesgo Hídrico según Ley 11730. ....	132
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>157</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>161</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>176</b>
<b>ANEXO B .....</b>	<b>189</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>245</b>
<b>ANEXO D .....</b>	<b>248</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>251</b>
<b>ANEXO F.....</b>	<b>258</b>
<b>ANEXO G .....</b>	<b>261</b>
<b>ANEXO H .....</b>	<b>266</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Ubicación geográfica del SH Las Encadenadas.....	23
Figura 2: Ubicación de región Pampeana (Kröhling y Brunetto, 2013).....	25
Figura 3: Perfil estratigráfico de suelos del SH Las Encadenadas (primeros 2 m).....	26
Figura 4: Vegetación autóctona de la región: De izq. a der.: Stipa, Distichlis Spicata y Salicornia. Imágenes ilustrativas de las especies descritas por Ragonese (1941).....	27
Figura 5: Cultivos de la región. De izquierda a derecha, soja y trigo. ....	28
Figura 6: (a) cambios en precipitación, (b) cambios en humedad del suelo, (c) cambios en escorrentía y (d) cambios en evaporación.....	37
Figura 7: Sentido de escurrimiento de aguas pluviales en Venado Tuerto y alrededores según Evarsa. ....	40
Figura 8: Ubicación de lagunas caracterizadas, pertenecientes al SH Las Encadenadas. ....	42
Figura 9: Escenas DEM que comprenden el SH Las Encadenadas.....	46
Figura 10: Comparación de DEM sin relleno de depresiones (izquierda) con respecto a DEM corregido (derecha). ....	47
Figura 11: DEM sin filtro de paso bajo (izquierda) versus DEM con filtro de paso bajo de ventana móvil (derecha). ....	48
Figura 12: Gráfico de dispersión de puntos altimétricos IGN versus puntos altimétricos SRTM corregidos.....	49
Figura 13: Delimitación de lagunas pertenecientes y circundantes a la tentativa delimitación del SH Las Encadenadas. ....	51
Figura 14: Comparativa entre imagen clasificada agua- no agua en formato ráster y máscara de agua en formato vectorial.....	54
Figura 15: Máscara de agua identificada por laguna. ....	55
Figura 16: Valores altimétricos de los vértices de la superficie de la laguna N°43 para la fecha: 28 de marzo de 2011.....	56
Figura 17: Valores altimétricos de los vértices de la superficie de la laguna N°43 para la fecha: 23 de enero de 2017.....	56
Figura 18: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°43.....	58
Figura 19: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°43.....	58
Figura 20: DEM corregido sin batimetría en la zona de la laguna N°43.....	59
Figura 21: DEM corregido con batimetría en la zona de la laguna N°43.....	59
Figura 22: Vectorización de delimitación de SH Las Encadenadas generada por el INA. (Geraldí, Piccolo, & Perillo, 2010) .....	61
Figura 23: Georreferenciación y vectorización de delimitación de SH Las Encadenadas generada por el Ministerio de Infraestructura y Transporte (S.F.) .....	61
Figura 24: Delimitación lograda del SH. ....	62
Figura 25: Comparativa de delimitaciones para el SH de estudio.....	63
Figura 26: Mapa de usos del suelo para el área de estudio.....	66
Figura 27: Mapa de tipos de suelos para el área de estudio. ....	67
Figura 28: Subcuencas del SH de estudio.....	68
Figura 29: Precipitaciones anuales de Villa Cañas (VC) y Venado Tuerto (VT).....	70
Figura 30: Dobles acumulaciones para las estaciones VT y VC. ....	71
Figura 31: Precipitación media mensual en SH Las Encadenadas, serie 1989-2017.....	73
Figura 32: Percolación media mensual en SH Las Encadenadas. ....	74
Figura 33: Evapotranspiración media mensual real y potencial en SH Las Encadenadas. ....	74

Figura 34: Humedad media mensual del suelo en SH Las Encadenadas.....	74
Figura 35: Escorrentía media mensual en SH Las Encadenadas.....	75
Figura 36: Mapa de CN normales (condición II) para las subcuencas del SH Las Encadenadas. ....	77
Figura 37: Recorte de escenas del satélite radar Sentinel 1B del área del SH Las Encadenadas. ....	80
Figura 38: Comparativa de recorte de imagen Sentinel 1B calibrada (superior) frente a imagen calibrada y con multilooking (inferior). ....	81
Figura 39: Histograma de imagen Sentinel 1B del área de estudio, 10 de octubre de 2016, banda VV. ....	82
Figura 40: Imagen Sentinel 1B del área de estudio, 10 de octubre de 2016, categorizada en agua-no agua. ....	82
Figura 41: Superposición de recortes de escenas Sentinel 1B clasificadas en Agua – No agua.....	84
Figura 42: valores altimétricos máximos y P90 para el área de la laguna N°15.....	85
Figura 43: Valores de CN normales para las simulaciones de estudio. ....	89
Figura 44: Curva Q (m <sup>3</sup> /s) vs H (m).....	90
Figura 45: Subcuencas contempladas por los registros de lluvias en SH Las Encadenadas. ....	91
Figura 46: Hietogramas para la simulación N°1, día 1 = 21 de diciembre.....	92
Figura 47: Hietogramas para la simulación N°2, día 1 = 10 de octubre. ....	92
Figura 48: Curvas de porcentaje de coincidencia entre simulaciones y máscaras de agua respecto tirantes iniciales a ser considerados agua.....	95
Figura 49: Mapa de contraste de respuestas de Evento 1, para la fecha 02 de enero de 2017. ....	96
Figura 50: Mapa de contraste de respuestas de Evento 1, para la fecha 14 de enero de 2017. ....	96
Figura 51: Mapa de contraste de respuestas de Evento 2, para la fecha 22 de octubre de 2016. ....	97
Figura 52: Hidrograma en el punto de cierre obtenido de la simulación del Evento N°1.....	97
Figura 53: Hidrograma en el punto de cierre obtenido de la simulación del Evento N°2.....	98
Figura 54: Mapa de canalizaciones seleccionadas para su incorporación a las simulaciones. ....	99
Figura 55: Hidrogramas del SH para diferentes rugosidades de Manning.....	100
Figura 56: Mapa de contraste de respuestas de Evento 1, con canalizaciones y rugosidades ajustadas, para la fecha 02 de enero de 2017.....	101
Figura 57: Mapa de contraste de respuestas de Evento 1, con canalizaciones y rugosidades ajustadas, para la fecha 14 de enero de 2017.....	102
Figura 58: Mapa de contraste de respuestas de Evento 2, con canalizaciones y rugosidades ajustadas, para la fecha 22 de octubre de 2016.....	102
Figura 59: Hidrograma en punto de cierre obtenido de la simulación calibrada del Evento N°1.....	103
Figura 60: Hidrograma en punto de cierre obtenido de la simulación calibrada del Evento N°2.....	103
Figura 61: Probabilidad de excedencia para precipitaciones D = 120 h para la estación Venado Tuerto. ....	106
Figura 62: Probabilidad de excedencia para precipitaciones D = 120 h, para la estación Villa Cañás. ....	106
Figura 63: Curvas P-D-R para la estación Venado Tuerto. ....	107
Figura 64: Curvas P-D-R para la estación Villa Cañás. ....	107
Figura 65: Hietograma con R=25 años para las estaciones Venado tuerto y Villa Cañás.....	108
Figura 66: Hietograma con R=50 años para las estaciones Venado tuerto y Villa Cañás.....	108
Figura 67: Hietograma con R=100 años para las estaciones Venado tuerto y Villa Cañás. ....	109
Figura 68: Variación de la superficie cubierta por agua para R=25 años y CN de suelo normales, de acuerdo con los diferentes escenarios de cambio climático.....	113
Figura 69: Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 25 años, conforme diferentes coeficientes de cambio climático. ....	113

Figura 70: Variación de la superficie cubierta por agua para R=25 años y CN de suelo cuasi saturado, de acuerdo con los diferentes escenarios de cambio climático. ....	115
Figura 71: Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 25 años con condiciones de suelo cuasi-saturado, conforme diferentes Coef. de CC. ....	115
Figura 72: Variación de la superficie cubierta por agua para R=50 años y CN de suelo normales, de acuerdo con diferentes escenarios de cambio climático. ....	117
Figura 73: Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 50 años con condiciones de suelo normales, conforme diferentes coeficientes de cambio climático. ....	117
Figura 74: Variación de la superficie cubierta por agua para R=50 años y CN de suelo cuasi saturado, de acuerdo con los diferentes escenarios de cambio climático. ....	119
Figura 75: Variación de la superficie cubierta por agua para R=50 años y CN de suelo cuasi saturado, de acuerdo con los diferentes escenarios de cambio climático. ....	119
Figura 76: Variación de la superficie cubierta por agua para R=100 años y CN de suelo normales, de acuerdo con los diferentes escenarios de cambio climático. ....	122
Figura 77: Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 100 años con condiciones de suelo normales, conforme diferentes coeficientes de cambio climático. ....	122
Figura 78: Variación de la superficie cubierta por agua para R=100 años y CN de suelo cuasi saturado, de acuerdo con los diferentes escenarios de cambio climático. ....	123
Figura 79: Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 100 años con condiciones de suelo cuasi-saturado, conforme diferentes coeficientes de cambio climático. ....	123
Figura 80: Variación de superficie con agua para los diferentes escenarios de CC, conforme las dos condiciones de valor medio ponderado de humedad del suelo, y una recurrencia de 25 años. ....	125
Figura 81: Variación de superficie con agua para los diferentes escenarios de CC, conforme las dos condiciones de valor medio ponderado de humedad del suelo, y una recurrencia de 50 años. ....	125
Figura 82: Variación de superficie con agua para los diferentes escenarios de CC, conforme las dos condiciones de valor medio ponderado de humedad del suelo, y una recurrencia de 100 años. ....	126
Figura 83: Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 25 años, en condición de suelo cuasi-saturado sin considerar incremento de precipitación por cambio climático. ....	127
Figura 84: Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 25 años, en condición de suelo cuasi-saturado considerando un incremento de precipitación por cambio climático de 1.30. ....	128
Figura 85: Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 50 años, en condición de suelo cuasi-saturado sin considerar incremento de precipitación por cambio climático. ....	128
Figura 86: Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 50 años, en condición de suelo cuasi-saturado considerando un incremento de precipitación por cambio climático de 1.30. ....	129
Figura 87: Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 100 años, en condición de suelo cuasi-saturado sin considerar incremento de precipitación por cambio climático. ....	129
Figura 88: Mapa de permanencia de agua en superficie para una R=100 años, en condición de suelo cuasi-saturado considerando un incremento de precipitación por cambio climático de 1.30. ....	130
Figura 89: Mapa de validación de la delimitación del SH Las Encadenadas. ....	131
Figura 90: Mapa de trazados viales comprendidos en el SH Las Encadenadas. ....	133
Figura 91: Ejemplo de caracterización de agua circundante a la red vial para un sector de una Ruta Nacional. ...	133
Figura 92: Mapa de amenaza por agua circundante en redes viales, debido a eventos climáticos contemplando CC para una recurrencia de 25 años. ....	134
Figura 93: Cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 25 años, considerando CC. ....	134
Figura 94: Mapa de amenaza por agua circundante en redes viales, debido a eventos climáticos contemplando CC para una recurrencia de 50 años. ....	135

Figura 95: Cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 50 años, considerando CC. ....	135
Figura 96: Mapa de amenaza por agua circundante en redes viales, debido a eventos climáticos contemplando CC para una recurrencia de 100 años.....	136
Figura 97: Cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 100 años, considerando CC. ....	136
Figura 98: Mapa de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC para una recurrencia de 25 años.....	137
Figura 99: Mapa de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC para una recurrencia de 50 años.....	138
Figura 100: Mapa de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC para una recurrencia de 100 años.....	139
Figura 101: Mapa de riesgo en redes viales contemplando CC para una recurrencia de 25 años. ....	140
Figura 102: Mapa de riesgo en redes viales contemplando CC para una recurrencia de 50 años. ....	141
Figura 103: Mapa de riesgo en redes viales contemplando CC para una recurrencia de 100 años. ....	141
Figura 104: Mapa de detección de sectores del SH con peligrosidad frente a eventos con CC conforme agua superficial, su permanencia, tirante y velocidad.....	142
Figura 105: Mapa de amenaza para la localidad de San Francisco, producto de eventos climáticos considerando CC. ....	143
Figura 106: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de San Francisco. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: Mapas del archivo de planos de la Ley 11730. ....	144
Figura 107: Mapa de amenaza para la localidad de Maggiolo, producto de eventos climáticos considerando CC. ....	145
Figura 108: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Maggiolo. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: Mapas del archivo de planos de la Ley 11730. ....	146
Figura 109: Mapa de amenaza para la localidad de Venado Tuerto, producto de eventos climáticos considerando CC. ....	147
Figura 110: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Venado Tuerto. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: Mapas del archivo de planos de la Ley 11730. ....	148
Figura 111: Mapa de amenaza para la localidad de San Eduardo, producto de eventos climáticos considerando CC. ....	149
Figura 112: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de San Eduardo. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: Mapas del archivo de planos de la Ley 11730. ....	150
Figura 113: Mapa de amenaza para la localidad de Santa Isabel, producto de eventos climáticos considerando CC. ....	151
Figura 114: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Santa Isabel. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: Mapas del archivo de planos de la Ley 11730. ....	152
Figura 115: Mapa de amenaza para la localidad de Villa Cañás, producto de eventos climáticos considerando CC. ....	153
Imagen 116: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Villa Cañás. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: Mapas del archivo de planos de la Ley 11730. ....	154
Figura 117: Mapa de amenaza para la localidad de Teodelina, producto de eventos climáticos considerando CC. ....	155
Figura 118: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Teodelina. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: Mapas del archivo de planos de la Ley 11730. ....	156

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Precipitaciones medias mensuales serie (1989-2017). Extraído de (Martín, 2014). .....	24
Tabla 2: Coeficientes de incrementos de Precipitaciones máximas de 5 días de duración. CMIP6-Coupled Model Intercomparison Project Fase 6(IPCC ARG6-WG1, 2021) Región: Sur-Este de América del Sur. ....	38
Tabla 3: Resumen de características del modelo de celdas constituido. ....	45
Tabla 4: Listado de imágenes satelitales utilizadas para la generación de batimetrías. ....	51
Tabla 5: Análisis estadístico valores altimétricos de borde de laguna N°43 .....	57
Tabla 6: Características de la composición de la subcuenca. ....	68
Tabla 7: Variables climáticas mensuales para simulación hidrológica. ....	72
Tabla 8: Número de Curva CN normales (condición II) para el SH Las Encadenadas. ....	76
Tabla 9: Resumen de lluvias para las estaciones VT y VC .....	93
Tabla 10: Simulaciones basadas en combinaciones de rugosidades de Manning .....	99
Tabla 11 Láminas de lluvias máximas anuales conforme distintas FDP, Venado Tuerto. ....	105
Tabla 12: Láminas de lluvias máximas anuales, conforme distintas FDP, Villa Cañas. ....	105
Tabla 13: Precipitaciones máximas de 5 días de duración en Estaciones: Venado Tuerto (VT) y Villa Cañas (VC), para distintas recurrencias (R), considerando situación sin cambio (Escenario ECC0) y con cambio climático (ECC1 a 4). ....	109
Tabla 14: Resumen de precipitaciones conforme distintas recurrencias, escenarios de CC y condiciones de humedad antecedentes de suelo. ....	111
Tabla 15: Variación de agua en superficie para una recurrencia de 25 años en condiciones de absorción de suelo normales, conforme escenarios de cambio climático. ....	112
Tabla 16: Resumen de volúmenes intervinientes para R=25 años, CN=normal. ....	112
Tabla 17: Variación de agua en superficie para una recurrencia de 25 años en condiciones de absorción de suelo cuasi saturado, conforme escenarios de cambio climático. ....	114
Tabla 18: Resumen de volúmenes intervinientes para R=25 años, CN=cuasi-saturado. ....	114
Tabla 19: Variación de agua en superficie para una recurrencia de 50 años en condiciones de absorción de suelo normal, conforme escenarios de cambio climático. ....	116
Tabla 20: Resumen de volúmenes intervinientes para R=50 años, CN=normal. ....	116
Tabla 21: Variación de agua en superficie para una recurrencia de 50 años en condiciones de absorción de suelo cuasi saturado, conforme escenarios de cambio climático. ....	118
Tabla 22: Resumen de volúmenes intervinientes para R=50 años, CN=cuasi saturado. ....	118
Tabla 23: Variación de agua en superficie para una recurrencia de 100 años en condiciones de absorción de suelo normal, conforme escenarios de cambio climático. ....	120
Tabla 24: Resumen de volúmenes intervinientes para R=100 años, CN=normal. ....	121
Tabla 25: Variación de agua en superficie para una recurrencia de 100 años en condiciones de absorción de suelo cuasi saturado, conforme escenarios de cambio climático. ....	122
Tabla 26: Resumen de volúmenes intervinientes para R=100 años, CN=cuasi saturado. ....	122
Tabla 27: Sup. con agua (ha) s/CC para CN normal y con CC para CN=95, para diferentes recurrencias. ....	126

## **1. INTRODUCCIÓN A LA TESIS**

En la presente Tesis se estudia la amenaza, asociada a diversos escenarios de cambio climático (de ahora en adelante CC); en el riesgo hídrico del sistema hidrológico no típico Las Encadenadas, ubicado al sur de la provincia de Santa Fe. Cabe destacar que, si bien se investiga de manera específica a un sistema hidrológico, de ahora en adelante SH, el mismo contiene herramientas y metodologías que permiten ser replicables para otro tipo de sistema hidrológico de llanura.

Debido a que el sistema hidrológico de interés no se encuentra muy estudiado, hubo que iniciar la Tesis caracterizando al mismo, con el objeto de comprender primeramente el comportamiento del éste frente a eventos conocidos, y posteriormente pronosticar su desenvolvimiento frente a eventos futuros acrecentados por CC.

Las herramientas y metodologías utilizadas para la obtención y manipulación de la información característica del SH, fueron principalmente de la rama de la geomática, tanto por la inexistencia de información, la cual hubo que generar, como así también por la precisión y confiabilidad de trabajar con dichas herramientas. En lo que respecta a las representaciones del comportamiento del SH, se trabajó con un modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado, resultando el más adecuado para SH de llanura.

### **1.1 OBJETIVOS**

El objetivo general es estudiar la dinámica hídrica de SH de llanura, mediante la conceptualización de los procesos relevantes involucrados y la simulación hidrológica correspondiente; incorporando la incertidumbre asociada a diferentes escenarios de CC.

En la Tesis se optó por simular la dinámica de los procesos de almacenamiento y escurrimiento superficial asociados a eventos de lluvias máximas de varios días de duración, similares a eventos de lluvia ya acontecidos en la zona de estudio, los cuales han puesto en emergencia diferentes vías de comunicación y poblaciones dentro de la cuenca.

Asimismo, se plantean como objetivos específicos, analizar el impacto para diversos escenarios de lluvia, determinando las zonas afectadas en términos de áreas anegadas y permanencias (caracterización de impacto de inundaciones) para el estado actual del clima y para hipotéticos estados futuros frente a la influencia del CC.

Algunos tópicos tales como almacenamiento, elaboración, análisis y recuperación de gran cantidad de información espacialmente distribuida, gestionada mediante SIG y su combinación con modelos hidrológicos son asimismo objetivos importantes de esta Tesis.

Se consideran además como objetivos importantes la transferencia al medio de metodologías de evaluación apropiadas para la planificación y gestión de los recursos hídricos de la región, haciendo por lo tanto hincapié en la aplicación del estudio en el SH Las Encadenadas, ubicado en el sur de la Provincia de Santa Fe.

## **1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

La Tesis se encuentra organizado en Capítulos, los cuales estructuran la redacción a fin de permitir una lectura más amena. En el Capítulo 1 es realizada una breve introducción a la Tesis, se especifican los objetivos a alcanzar por el mismo y además es incluido este Apartado, de descripción de la organización de la Tesis. En el Capítulo 2, es desarrollado el marco teórico, contemplando las generalidades de los SH de llanura, las particularidades del SH de estudio y los efectos del CC sobre éstos. En el Capítulo 3 se presentan los antecedentes, en el cual son citados los trabajos abocados al área de estudio, de mayor relevancia para esta Tesis. En el Capítulo 4 son explicitadas las metodologías y herramientas utilizadas, desde la preparación básica de la información para la simulación del SH, hasta la identificación de los sectores con amenaza/peligro frente a eventos climáticos afectados por CC, discusión sobre la delimitación del SH; y generación de Mapas de Amenaza en sitios del SH, además de la contrastación con áreas de riesgo hídrico según Ley 11,730. En el Capítulo 5 son presentadas las conclusiones de la Tesis, y en el Capítulo 6, la bibliografía. Para finalizar, se presentan diversos anexos, los cuales respaldan y/o interiorizan al lector sobre determinados temas que, por razones de espacio o coherencia, no fueron incluidos en su respectivo Capítulo.

## **2. MARCO CONCEPTUAL**

En este Capítulo, son detallados conceptos necesarios para comprender el mecanismo de la presente Tesis. El mismo se inicia describiendo el comportamiento general de los SH de llanura, los cuales poseen particularidades importantes y continúa con una caracterización del sistema de estudio, describiendo las componentes del mismo. Posterior a ello es realizado un análisis disgregado de CC, el cual indaga sobre los conceptos de riesgo, vulnerabilidad y mitigación; y finaliza con los impactos producto del cambio climático sobre los sistemas hidrológicos.

### **2.1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS HIDROLÓGICOS DE LLANURA**

Es realizada para una mejor comprensión, una introducción a los SH de llanura, describiendo la morfología característica de los mismos y su comportamiento hidrológico. Además, son presentadas las perturbaciones antrópicas sobre éstos y las formas en que los mismos pueden ser representados.

#### **2.1.1 INTRODUCCIÓN**

En la historia de la hidrología, la misma tuvo su gran crecimiento como ciencia a partir del año 1930, producto de diversas intervenciones en las cuencas, como ser, el control de inundaciones y la conservación de suelos, entre otras, las cuales comenzaron a demandar datos de mayor calidad para el diseño de sus obras. Por tal motivo, gran parte de los conceptos de hidrología que se conocen en la actualidad, datan de dicha fecha (Linsley et al., 1977).

Pero este auge, como suele ocurrir con determinadas ciencias, puso la atención de quienes la analizaban en un único tipo de sistemas, los actualmente llamados Sistemas Hidrológicos Típicos (SHT), ignorando la diversidad existente (Orsolini et al. , 2008).

Los SH de llanura, debido a sus particularidades, tienen un funcionamiento diferente de los procesos hidrológicos respecto de las cuencas con pendientes pronunciadas, con lo cual los modelos desarrollados para éstas son de difícil aplicación, y a veces, inadecuados para llanuras.

Recién en el año 1983, con la celebración del Coloquio de Olavarría, la UNESCO (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization) al incorporar a su programa la

hidrología de llanuras deja establecido que la hidrología no es Universal sino que debe adaptarse a cada paisaje (Fuschini Mejía, 1994).

Este reconocimiento a los Sistemas Hidrológicos de Llanura como Sistemas Hidrológicos No Típicos, de ahora en adelante SHNT (Caamaño Nelli et al., 1979), habilita la utilización de esquemas de representación y análisis acorde a sus necesidades, priorizando las componentes del ciclo hidrológico de carácter vertical y el análisis del flujo superficial en dos direcciones, como se verá en los Apartados consecutivos.

### **2.1.2 DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA**

Los SHNT son sistemas que no cuentan con una superficie tributaria definida de componentes lineales, organizados y jerarquizados, ni con una relación puntual, sino que prevalece la estructura de disipación (Fertanoni y Prendes, 1983).

Dichos sistemas tienen como rasgo distintivo la baja energía morfológica del terreno (Fuschini Mejía, 1994) encontrándose conformados por zonas bajas y depresiones, las cuales se interconectan naturalmente mediante cañadas y esteros.

El agua pluvial en este tipo de sistemas se moviliza muy lentamente sin encauzarse en forma de manto, incitada generalmente por la pendiente local (Paoli y Giacosa, 1983) hasta llegar a las depresiones naturales (lagunas y bajos temporarios), produciendo el anegamiento del sector.

Para eventos de recurrencias importantes, dichos espacios de amortiguación incrementan sus niveles hasta el desborde, anegando la zona aledaña y/o pudiendo conectarse con otras lagunas a través de los esteros y cañadas.

### **2.1.3 FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO**

En el ciclo hidrológico, la precipitación (P) es la variable que actúa en el sistema y en función de la cual interviene el resto. Como respuesta, un primer nivel de almacenamiento es compuesto por la cubierta vegetal (F), siendo una variable transitoria; y un segundo nivel de almacenamiento llamado superficial (S) compuesto por la precipitación efectiva (Pe) que llega al suelo, conformado por el agua necesaria para alcanzar el tirante hidráulico de escurrimiento y los volúmenes retenidos en cavidades. Un tercer nivel de almacenamiento, denominado humedad en el suelo (H), se compone por el agua que se introduce hacia el interior del suelo (I). El agua, al ingresar al suelo puede encontrarse con capas de alta

impermeabilidad, generando un escurrimiento paralelo al superficial, denominado flujo subsuperficial (Ass). Superada la capacidad de infiltración del suelo, se inicia el flujo superficial (As) y; en cuanto al agua que avanza en profundidad, aporta como recarga al cuarto nivel de almacenamiento, el freático (G). Por otra parte, las raíces de las plantas toman el agua del suelo y la transpiran, sumado a una evaporación del agua desde las capas superiores del suelo, se lo denomina evapotranspiración (ET) (Orsolini et al., 2008).

Estas cantidades de agua que circulan por el ciclo hidrológico se relacionan entre sí, de acuerdo con el principio de conservación de masas, debiendo existir un equilibrio entre entradas y salidas, el balance hidrológico. Para poder establecer el balance resulta necesario definir la unidad hidrogeológica (suele ser la cuenca) y el intervalo de tiempo; que puede ser cualquiera, desde el tiempo de duración de una tormenta hasta el año hidrológico medio (Orsolini et al., 2008).

Los fenómenos hidrológicos son los mismos tanto para zonas llanas como para zonas de relieve, pero las variables que lo componen asumen una importancia e interrelación diferentes en cada uno de éstos, siendo la principal diferencia el lapso en el cual actúan las mismas (Paoli y Giacosa, 1983).

Con respecto al balance para una tormenta para una cuenca hidrológicamente aislada (situaciones que se presentan en esta Tesis), por tratarse de un intervalo de tiempo corto, el planteo de la cuantificación de las variables del ciclo hidrológico se considera:

$$P = \Delta F + \Delta S + I + As \quad (1)$$

Es decir, el enfoque de la Tesis involucra los procesos de precipitación, interceptación en follaje y superficial, infiltración durante evento y escurrimiento superficial, procesos considerados predominantes durante un evento lluvioso y mayormente causantes de amenazas de inundación con el consiguiente riesgo hídrico.

Dicho esto, se remarca que esta Tesis no contempla la evaluación directa de procesos de evapotranspiración, exfiltración, recarga, escurrimiento subterráneo, ni tampoco almacenamiento de humedad de suelo ni almacenamiento subterráneo; siendo las mismas introducidas como condiciones iniciales y de borde para el correcto análisis por evento. Un ejemplo de simulación continua para sistemas de llanura, en la cual se contemplan estos procesos, puede verse en Zimmermann y Mecca (2010).

#### **2.1.4 PERTURBACIONES ANTRÓPICAS**

La instalación del hombre en las llanuras ha alterado el ciclo hidrológico de estos sistemas (Fuschini Mejía, 1994). Si bien la inundación es producida por precipitaciones considerables, también puede ser coproducida por la acción humana al alterar de diversas maneras el equilibrio del mismo.

Una modificación importante que el hombre produce en el paisaje (actualmente en muchos casos de manera incorrecta) es la sustitución de cobertura vegetal nativa por cultivos de cereales, oleaginosas, pasturas, etc. Los cambios en la vegetación natural por otras implantadas producen una gran fragilidad en los SHNT, recordando principalmente las componentes verticales del ciclo hidrológico, dentro de las cuales se encuentra la humedad del suelo y la evapotranspiración, dos componentes ligadas a la vegetación. Además, el tipo de técnica con el cual se siembran y se cosechan los cultivos, afecta el ciclo normal del agua precipitada, obteniendo en el peor de los casos la impermeabilización del suelo, lo cual genera más escorrentía directa.

Otro efecto importante para destacar es el producido por las conexiones mediante canalizaciones de lagunas y/o bajos temporarios, las cuales en muchos casos no son planificadas o son clandestinas. Estas acciones disminuyen las superficies de agua acumuladas, con lo cual generan una mayor escorrentía superficial y en un tiempo mucho menor al natural, produciendo el colapso del sistema aguas abajo.

Sumado a estas perturbaciones, en nuestra región se presenta una planificación escasa para la regulación de los excedentes hídricos superficiales, falta de ejecución de proyectos de obras, desconocimiento del comportamiento de los sistemas hídricos y falta de información hidrológica seriada, entre otros (Riccardi et al., 2008).

#### **2.1.5 FORMAS DE REPRESENTACIÓN**

##### **2.1.5.1. MODELOS HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS**

A modo de introducción, es definido el modelo hidrológico-hidráulico como un compendio de ecuaciones matemáticas ensambladas que representan las componentes del ciclo hidrológico y el comportamiento del flujo, aportando una esquematización simple para el análisis de diversos fenómenos (Singh y Woolhiser, 2002). Cabe destacar que estos modelos, no sólo aportan información sobre situaciones pasadas o actuales de los sistemas hidrológicos de

estudio, sino que además permiten predecir el comportamiento de los mismos frente a diversos eventos climáticos (Kruse y Zimmermann, 2002).

Conforme la escala temporal que abarca la simulación, los modelos pueden clasificarse como continuos o de eventos: los primeros funcionan tanto en los períodos de escorrentía superficial como en los que no, con el objeto de contabilizar continuamente la humedad del sistema hidrológico y establecer las condiciones iniciales en casos de escorrentía; y los segundos, al representar situaciones puntuales que pueden abarcar como mucho algunos días, suponen o determinan por otros medios los datos de entrada (Zimmermann, 2004).

En cuanto a la especificación espacial de parámetros, variables de estado, flujos de intercambio y variables de entrada y salida, los modelos pueden clasificarse como concentrados o distribuidos: los primeros utilizan valores promediados de las características del sistema hidrológico, impactando sobre el volumen de escorrentía; y los segundos contemplan variaciones espaciales en las entradas y salidas de datos como en los parámetros, calculándose los volúmenes de escorrentía para cada segmento (Zimmermann, 2004).

En cuanto a la descripción o representación de los procesos hidrológicos-hidráulicos, los modelos pueden clasificarse como conceptuales, empíricos o físicamente basados. Los primeros se construyen observando el comportamiento de un sistema, destacando los componentes más relevantes y los procesos que vinculan esos componentes, sin cuantificarlos, desarrollando posteriormente consideraciones teóricas con las cuales construir el modelo. Los segundos, son modelos numéricos basados en ecuaciones empíricas, que describen las observaciones cuantificadas, sin hipótesis. Los terceros, también son modelos matemáticos, pero utilizan ecuaciones basadas en leyes o hipótesis que provienen de la física (Elliott, 2010).

Con respecto a la historia del modelado de los SH, se estima que a partir de la década del sesenta surgió un auge en la simulación de los mismos; debido en gran parte a la observación de deficiencias de los métodos de estudio anteriores y a los avances tecnológicos, los cuales permitieron análisis más robustos (Stenta et al., 2010a).

Cabe destacar que las primeras simulaciones hidrológicas en los sistemas sólo alcanzaban la producción de información en los puntos de control y/o punto de cierre de los mismos, con lo cual la respuesta de las mismas eran volúmenes y caudales en dichas secciones puntuales. Con el correr de los años se fue manifestado que este tipo de modelaciones no eran

representativas de los SHNT, puesto que lo más importante en estos sistemas no es el análisis del flujo concentrado sino el análisis del flujo disperso en las áreas. Algunos trabajos próximos al área de estudio que demuestran dicha manifestación son (Stenta et al., 2010b) y (Scioli, 2009); por citar algunos.

A mediados de la década del ochenta, producto de esta necesidad de obtener información espacialmente distribuida, surgen los modelos hidrológicos a resoluciones de detalle. Debido a este auge, esta época puede citarse como la era del modelado espacial (Stenta et al., 2010).

Actualmente, se cuenta con modelos y estructuras de simulación que permiten analizar y obtener información de unidades espaciales pequeñas de los SHNT, de los procesos del ciclo hidrológico que intervienen en la transformación lluvia-caudal y la propagación del flujo, (Riccardi et al., 2002) permitiendo conocer el comportamiento de los SH en todo su interior, lo cual es información muy valiosa para el control de inundaciones en sistemas de estas características.

Con respecto a dichos avances tecnológicos en la región, el Departamento de Hidráulica y el Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM) de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario (UNR) trabaja desde hace más de dos décadas en el desarrollo, perfeccionamiento y adaptación de un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi 2D físicamente basado. Corresponde mencionar que dicho modelo es implementado en esta Tesis.

#### **2.1.5.2 INSUMOS DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS**

Conforme fueron avanzando las tecnologías de la modelación, éstas se readaptaron para consumir los productos tecnológicos de otros ámbitos y lograr simulaciones más representativas del área de análisis.

Uno de los insumos más importantes de las simulaciones, y particularmente en los SHNT, son los Modelos Digitales de Elevación (DEM), provenientes de la rama de la teledetección. Estos DEM, los cuales son a grandes rasgos mallas de puntos georreferenciados con valores altimétricos, brindan información altimétrica precisa con resoluciones espaciales muy diversas, las cuales pueden seleccionarse conforme la escala de trabajo definida. La adquisición de este tipo de insumos permite realizar análisis de flujos bidimensionales con un grado de detalle y precisión (Olaya Ferrero, 2004).

Otros de los insumos utilizados dentro de la rama de la teledetección son los productos de imágenes satelitales como ser coberturas terrestres y tipologías de suelos, los cuales contienen intrínsecamente información particular sobre cada tipología representada. Dichos productos intervienen en la simulación con el fin de estimar variables del ciclo hidrológico. Un estudio próximo al área de análisis que presenta estas técnicas se encuentra en Scuderi et al., (2008).

Además, son utilizadas imágenes satelitales con el objeto de qué, a través de diversas metodologías de análisis, sean transformadas en máscaras de agua; las cuales son empleadas en la calibración de las respuestas de simulación del agua espacialmente distribuida conforme el apoyo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). La implementación de estas metodologías específicas para esta Tesis, se encuentran en las publicaciones (Soria et al., 2018) y (Soria et al., 2019).

Aprovechando la mención de los SIG, resulta conveniente indicar que los mismos hacen un aporte muy importante en las modelizaciones en todas las etapas del proceso, desde la preparación de la información base hasta en la interpretación de los resultados de las simulaciones, demostrando ser el complemento ideal y divisando en la actualidad una conjunción de ambas ramas.

## **2.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LLANURA LAS ENCADENADAS**

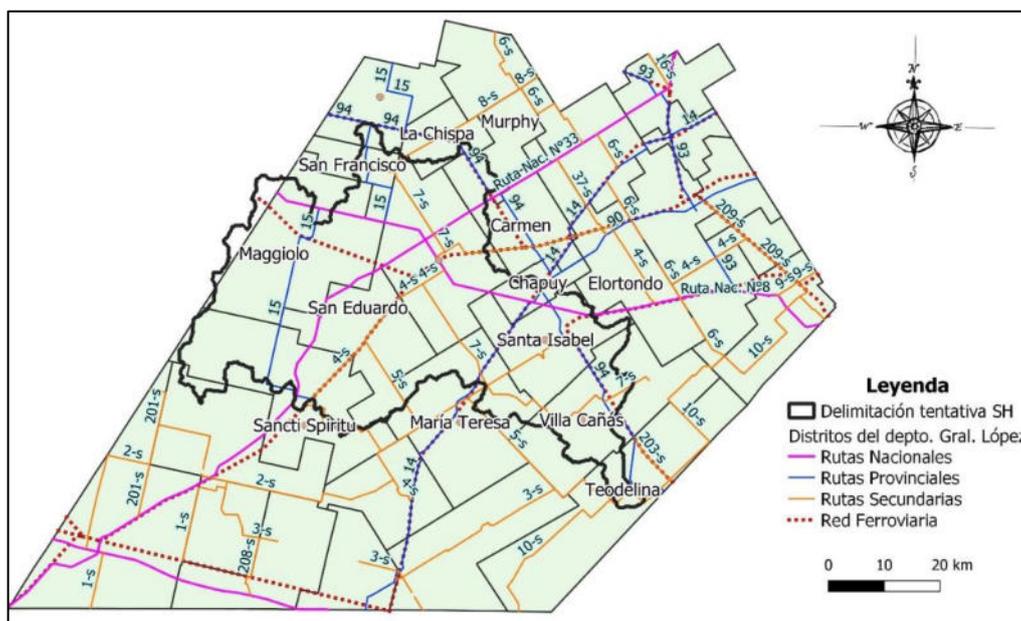
Se presenta una descripción del SH de estudio respecto su posicionamiento, el clima, la geomorfología de la región, la tipología de suelos presentes y la vegetación predominante, con motivo de contextualizar el mismo.

### **2.2.1 UBICACIÓN**

El SHNT Las Encadenadas se encuentra ubicado en Argentina, al sur de la provincia de Santa Fe, en el departamento General López (Figura 1). El mismo abarca completamente los distritos de San Eduardo y Venado Tuerto. A su vez, en menor proporción, comprende los distritos de: Maggiolo, Murphy, San Francisco, Cafferata, La Chispa, Carmen, Chapuy, Sancti Spíritu, María Teresa, Santa Isabel, Elortondo, Villa Cañás y Teodelina; tendiendo como punto de cierre del mismo esta última localidad.

Es atravesado por las rutas nacionales N°8 y N°33, las rutas provinciales N°: 14, 15 y 94, las rutas secundarias: 2-S, 3-S, 4-S, 5-S, 7-S Y 8-S; y las líneas San Martín y Mitre del ferrocarril.

Los límites hidrológicos del área de estudio de noreste a suroeste son: cuenca del río Carcaraña, cuenca del arroyo Saladillo, cuenca superior del arroyo Pavón, cuenca de la laguna de Melincué y cuenca del río Arrecifes. De Noroeste a Suroeste son: cuencas de lagunas endorreicas y cuenca del río Salado brazo sur (Giraut et al., 2008).



**Figura 1:** Ubicación geográfica del SH Las Encadenadas.

### **2.2.2 CLIMA**

El clima de la región de estudio es definido como templado húmedo con estación seca. Si bien esta definición parece contradictoria, responde a las estadísticas sobre las condiciones climáticas imperantes en esta zona: clima **C**(templado), **a** (húmedo) y **w** (invierno seco) (Martín, 2014).

A continuación, se presenta una breve descripción del comportamiento de algunas de las variables climáticas de la región, según (Martín, 2014).

- **Temperatura:** La temperatura media anual máxima y la media anual mínima para el área de estudio es de 22.9°C y 10.8°C, respectivamente. El principal factor de variación de la temperatura es el estacional.
- **Humedad:** La humedad media mensual es mínima para el mes de diciembre con 66% y máxima para el mes de junio con un valor de 81%. La humedad relativa media anual es del 73%.

- **Presión atmosférica:** La presión atmosférica media anual del área de estudio es de 999.6 Hpa. Uno de los factores más influyentes en esta variable es la temperatura.
- **Viento:** En esta zona, es normal una velocidad del viento de entre 12 y 15 km/h, registrándose en las tormentas más violentas de la región vientos de hasta 140 km/h. Los vientos que ocurren en la región son: pampero, viento del norte, sudestada, viento del río (viento del este) y viento del oeste.
- **Precipitaciones:** Las lluvias que se producen en esta zona pertenecen al régimen atlántico, dependiendo su magnitud en forma directa del transporte de humedad proveniente de dicho océano. Las precipitaciones medias mensuales de la región de estudio son mostradas en Tabla 1.

**Tabla 1:** Precipitaciones medias mensuales serie (1989-2017). Extraído de (Martín, 2014).

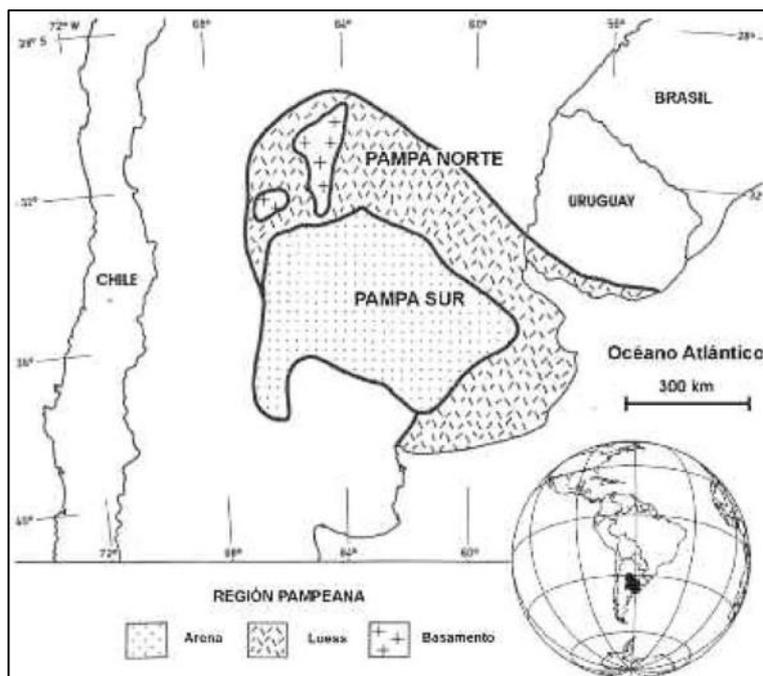
PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES												
MES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Pm(mm)	123	108.8	141.7	95.9	48.7	19.6	21.9	20.9	45.5	104.4	114.7	124.6

Además, se destaca que en esta zona se presentan dos principales tipos de tormentas: las de frente frío y las de calor o verano. Se producen en promedio 56 cambios de tiempo al año. Salvo contadas excepciones, las tormentas siempre se producen poco antes o durante el cambio de tiempo (Martín, 2014).

### **2.2.3 RASGOS GEOMORFOLÓGICOS**

El área de estudio pertenece a la región pampeana, siendo ésta una extensa llanura que cubre la región central de la Argentina con una superficie total de 600,000 km<sup>2</sup> y que exhibe una notable identidad, caracterizada por la marcada horizontalidad general del terreno, sedimentos eólicos en superficie, ecología de pradera o similar, y clima húmedo o subhúmedo subtropical. Dicho sistema es nuevo, formado durante el Estadío Isotópico 4 y adquiriendo sus características fundamentales durante el Estadío Isotópico, abarcando algo más del 3% del período Cuaternario (Iriondo, 2010).

Específicamente, el SH de estudio se sitúa en la Pampa Sur, como lo demuestra la Figura 2.



**Figura 2:** Ubicación de región Pampeana (Kröhling y Brunetto, 2013).

Este sector se caracteriza por su vinculación, durante el cuaternario, con procesos y sistemas geológicos situados al oeste de la cordillera Central y el piedemonte cordillerano.

La conexión más importante de la Pampa Sur con esas regiones es la gran cuenca hidrográfica del Bermejo–Desaguadero–Salado. Su red fluvial, en la actualidad, está casi desintegrada y es básicamente inactiva debido al clima seco de la región. Por el contrario, durante climas más húmedos del Cuaternario los cauces condujeron grandes caudales. Esta región también ha estado sujeta a lluvias de ceniza volcánica que aportaron volúmenes significativos de materiales a sus sedimentos (Iriondo, 2010).

#### **2.2.4 TIPOLOGÍA DE SUELOS**

El SH Las Encadenadas pertenece al Mar de Arena Pampeano (MAP), el cual forma en superficie un cuerpo irregular de 130,000 km<sup>2</sup> que cubre gran parte de la Pampa Sur. El mismo está compuesto en su mayor parte por arena muy fina, y muy fina-limosa, con minerales arcillosos dominados por el grupo de la illita; cubriendo limos endurecidos del Pleistoceno y Terciario en los sectores este y norte (Iriondo, 2010).

La parte superficial del suelo se extiende hasta los 20 cm (horizonte A), siendo de color gris muy oscuro y bien provisto de materia orgánica, de textura franco-limosa, con un 25% de arcillas y estructura en bloques medios, moderada. Le sigue una pequeña capa transicional hasta los 30 cm donde se encuentra un horizonte levemente más arcilloso (Bt) de unos 30 a

40 cm de espesor, de color pardo oscuro, de textura franco arcillo limosa (con un 30% de arcilla) y estructura en prismas, fuerte, con escasos barnices. En forma muy gradual se pasa al horizonte C que aparece entre los 100 y 120 cm siendo friable de color pardo, de textura franco-limosa, con 30 a 40% de arenas y 10% de arcilla. La capa freática se encuentra siempre a varios metros de profundidad (INTA, n.d.). A continuación, en Figura 3 se presenta el perfil estratigráfico de un sector del SH de estudio.



**Figura 3:** Perfil estratigráfico de suelos del SH Las Encadenadas (primeros 2 m).

### **2.2.5 VEGETACIÓN**

La vegetación del sur de Santa Fe, en esta Tesis, es clasificada en dos grupos con el objeto de una mejor caracterización: vegetación autóctona y cultivos, presentándose a continuación, la descripción de ambos.

- Vegetación autóctona: La región de Santa Fe a la cual pertenece el SH es denominada, según Ragonese (1941), como Región V: estepas con predominio de *Stipa* y asociaciones halófilas con *Salicornia* y *Distichlis Spicata* como dominantes.

Originariamente dicha región ha sido una estepa de gramíneas sin árboles, con excepción de algunos aislados en las márgenes de ciertos arroyos y lagunas.

Al presente, los cultivos de cereales, soja, etc. han alterado su aspecto primitivo. Además, se han introducido un sinnúmero de especies exóticas que se han diseminado profusamente, reemplazando a las especies indígenas. Sin embargo, en los terraplenes de las vías, en ciertos

campos de pastoreo y en las numerosas lagunas que existen en el sistema, se conservan aún restos de la vegetación nativa o autóctona.

Al contener un elevado porcentaje de carbonato de sodio las lagunas, las márgenes se presentan cubiertas casi exclusivamente por *Distichlis Spicata* y *Geófitia Viajera*. Dadas las condiciones edáficas extremas que deben soportar, son muy pocas las especies que pueden vivir en esta comunidad, casi únicamente plantas herbáceas, en su mayor parte graminiformes, que alcanzan de 13 a 20 cm de altura formando un conjunto muy uniforme sólo interrumpido a veces por matas de *Juncus Acutus* Var. *Leopoldii* o colonias de *Scirpus Americanus* Var. *Longebracteatus*. A continuación, en Figura 4 se presentan algunas de las especies de vegetación autóctona.



**Figura 4:** Vegetación autóctona de la región: De izq. a der.: *Stipa*, *Distichlis Spicata* y *Salicornia*. Imágenes ilustrativas de las especies descritas por Ragonese (1941).

- Cultivos: En la actualidad, la provincia de Santa Fe es una de las más significativas productoras agrícolas del país. El sector agrícola representa aproximadamente el 65% del ingreso bruto total generado por el sector rural provincial. A su vez, la contribución de General López que, salvo en sorgo, donde se vuelve más significativo el departamento San Martín, es el departamento con más área sembrada en las distintas actividades: soja, trigo, maíz y girasol (Giunta, 2002).

En el área de estudio, el cultivo predominante es soja de primera ocupando más del 70 % del área. La distribución de este cultivo está asociada a cuestiones económicas ligadas a su rentabilidad, baja inversión inicial y además por su simplicidad, en especial desde la difusión de los cultivares transgénicos (Arango et al., 2019).

Desde el punto de vista hidrológico, la práctica de monocultivo de esta oleaginosa genera una pérdida continua de la materia orgánica del suelo. Además, si bien la inclusión de gramíneas en la rotación permite recuperar los sectores densificados o compactados, generan grietas y canales que son los responsables de incrementar la velocidad de infiltración del agua (menor escurrimiento y evaporación). A continuación, se presenta la Figura 5 de algunos cultivos de la región.



**Figura 5:** Cultivos de la región. De izquierda a derecha, soja y trigo.

## **2.3 CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS SH: RIESGOS HIDROAMBIENTALES**

Son presentados conceptos sobre cambio climático, riesgo, vulnerabilidad y mitigación; los cuales permitirán comprender de una manera más amplia el objetivo de esta Tesis.

### **2.3.1 CONCEPCIONES SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO**

La definición de cambio climático provista por el artículo N°1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (IPCC, 2021c) expresa que cambio climático, es un cambio del clima adjudicado a la actividad humana que modifica las características de la composición de la atmósfera mundial y se acopla a la variabilidad normal del clima observada en períodos de tiempo comparables.

A modo de análisis de dicha definición, resulta propicio citar a Barros et al. (2005) quienes exponen que el otorgamiento del título de cambio climático a la actividad humana resulta luego de un arduo análisis sobre los cambios más importantes, originarios de procesos

naturales. Resumidamente manifiestan que, tanto las variaciones en la órbita de la tierra alrededor del sol como los procesos geológicos que modifican la geografía del planeta producen cambios importantes en el clima; pero éstos son del orden de los miles a millones de años, lo cual no resulta representativo de este cambio, el cual dio inicio hace menos de 300 años. Luego, presentan los factores radiación solar y actividad volcánica, los cuales si bien muestran un tiempo de afectación bastante inferior (decenios/siglos) no son representativos en cuanto a la magnitud de las variaciones observadas. Un último factor natural que podría estar involucrado es la variabilidad interna de la dinámica del sistema climático, es decir, cambios en las condiciones estadísticas de equilibrio sin aparente influencia externa. Dicho factor se descarta debido a que en las simulaciones climáticas éste no reproduce tendencias de temperatura tan acrecentadas como las ocurridas.

La Organización Meteorológica Mundial detalla que, a partir de la era preindustrial en 1750 hasta 2005, la concentración mundial de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en la atmósfera aumentaron un 35%, 148% y 18%, respectivamente; con lo cual manifiesta que las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles y alteraciones en las coberturas terrestres, son los que están cambiando la concentración de propiedades o de componentes atmosféricos de la superficie de la Tierra (Climate change and desertification, 2007).

En 1988, con la finalidad de evaluar íntegramente todos los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre CC; y brindar a los responsables de políticas las evaluaciones científicas y técnicas de más autoridad y objetividad, es creado el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el CC (IPCC, 2021c). Cabe destacar que tanto los informes, como los documentos técnicos y otros productos, son material de primera referencia a nivel mundial.

El Quinto informe resulta el más reciente de los informes emitidos y expone en su apartado de bases físicas, con un nivel de seguridad muy alto, que el 95 por ciento de la actividad humana es la causa predominante del calentamiento y que, en los últimos tres decenios, han sido progresivamente más cálidos que los anteriores al año 1850 (IPCC, 2013).

En Argentina, se presentan numerosos estudios que manifiestan la alteración que produce el CC en diferentes áreas. Los estudios a nivel país más relevantes quizás para este proyecto

sobre CC, dan cuenta de afectaciones en el clima, los sectores costeros y la actividad agropecuaria, entre otros.

En cuanto a la climatología, en Argentina se viene presentando debido al CC alteraciones en la temperatura, humedad y precipitaciones. Respecto a la temperatura, la misma ha manifestado cambios principalmente en uno de sus extremos, la temperatura mínima. Los cambios en las temperaturas en el país no se dan de forma homogénea, sino que en verano en el centro y norte del país se presentan aumentos en la temperatura mínima y disminuciones de la máxima, mientras que en la Patagonia sólo se presentan aumentos de la máxima (Barrucand y Rusticucci, 2007b). En cuanto a la humedad y nubosidad, se presentan cambios en el norte del país, con aumento de días húmedos y mayor frecuencia de días con cielo cubierto (Barrucand y Rusticucci, 2007a). Sobre las precipitaciones, ha disminuido la secuencia de días sin lluvia, principalmente en la zona oeste de Argentina (A Besalú Parkinson, 2007), hubo un aumento de la frecuencia hacia los valores de mayor precipitación en los meses cálidos, especialmente en el norte del país, (Serio y Martin, 2007) y un corrimiento de las isoyetas, ingresando el norte del país a la isoyeta de 400 mm y noreste a la de 550 mm (Hurtado et al., 2007).

Con respecto a los sectores costeros la situación es crítica, principalmente en las costas bajas como ser la Bahía de Samborombón (República Argentina, 2021a). Se presentan tendencias de ascenso del nivel del mar en puertos de Buenos Aires del orden de 1.4 mm/año (Kokot, 2007). Otra de las temáticas que se encuentra afectada por el CC en nuestro país es la producción agropecuaria. A consecuencia de los factores climáticos además de los económicos, se ha producido en nuestro país la expansión de la frontera agrícola, produciendo una marginalización de la ganadería hacia lugares con menores aptitudes de siembra, o la implementación de sistemas de engorde a corral (Fernández et al., 2007). Se destaca que, si bien esta actividad es afectada, la misma realiza una contribución importante al CC, encontrándose en nuestro país en el segundo lugar de mayores emisiones la fermentación entérica de ganado y en tercer lugar las emisiones de dióxido de nitrógeno desde suelos agrícolas (Taboada, 2007).

Cabe resaltar que Argentina ha asumido compromisos ante la comunidad internacional para disminuir el CC, firmando el tratado de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (República Argentina, 2021a). Como destacado, se encuentra la adopción del Protocolo de Kioto y la adopción del Acuerdo de París.

Actualmente es llevado a cabo un proceso de revisión de las Contribuciones de gases del país, el cual es coordinado a través del Gabinete Nacional de Cambio Climático (GNCC), con la participación de distintos sectores de la comunidad a través del Consejo Federal de Medio Ambiente (COFEMA) (República Argentina, 2021b).

### **2.3.2 RIESGO, VULNERABILIDAD Y MITIGACIÓN**

#### **2.3.2.1. CONCEPCIONES**

Algunas definiciones encontradas sobre riesgo explican que el mismo es un suceso con capacidad de modificar el territorio en su dinámica y funcionalidad en período de tiempo relativamente largo, con un alcance difuso (Zamparoni y Gonçalves, 2012), el cual permite la estructuración del futuro en tiempo presente, resultando una especie de activo personal que permite ser controlado y medido (Chacón Cancino y Postigo, 2012).

El concepto de riesgo y sus términos asociados han variado tanto en el tiempo como así también en las diversas perspectivas de las disciplinas que lo abordan (Cardona, 2001). Producto de esta variabilidad y diversidad en el concepto, surgen las complicaciones en el logro de una eficacia en la gestión del mismo.

Lavell (1997) presenta el riesgo de inundación como el producto de la interrelación de amenazas y vulnerabilidades es una construcción social, dinámica y cambiante, diferenciada en términos territoriales y sociales.

Ribera Masgrau (2004) propone una metodología donde la vulnerabilidad es reemplazada conceptualmente (dentro del componente humano) por la exposición más la susceptibilidad, a partir de la aplicación de la siguiente fórmula:

Riesgo hídrico = Amenaza x Vulnerabilidad (Exposición + Susceptibilidad) / Resiliencia.

En la actualidad, se observan dos formas en las cuales el riesgo se construye socialmente (Beltramino, 2018): la percepción social que asume al riesgo como real, que produce afectaciones; y la construcción social, en la cual prevalece el conocimiento y la incertidumbre, impactando sobre la relación del individuo con el ambiente. Van Der Linden (2015) expone que los factores cognitivos, socioculturales y experienciales representan gran parte de la variación de la percepción del riesgo del CC y que se presentan distinciones entre las percepciones sociales y personales.

Natenzon (2017) realiza un abordaje del riesgo, describiendo a los componentes del mismo de la siguiente manera: a la peligrosidad la define como una potencialidad que requiere de conocimientos sobre los aspectos físicos – naturales del proceso desencadenante, a la vulnerabilidad como producto de estructuras sociales que requieren conocer los aspectos socioeconómicos del estado antecedente de los grupos involucrados, a la exposición como el impacto material que demanda del conocimiento de aspectos territoriales y poblaciones; y a la incertidumbre, formando parte de las perspectivas/decisiones, necesitando conocer los aspectos políticos, imaginarios y representaciones de los grupos sociales involucrados.

El IPCC para su último informe de evaluación, realiza una definición de riesgo con el objeto de que el uso del concepto entre sus colaboradores sea completamente coherente, y permita una comunicación eficaz. Lo define como un potencial de consecuencias adversas para los sistemas humanos o ecológicos, aceptando la variedad de valores y metas asociadas a tales sistemas. Además, define que, en el marco de CC, el riesgo puede originarse de los impactos potenciales del CC como así también de las respuestas humanas al CC (Reisinger et al., 2020).

La vulnerabilidad, según Füssel y Klein (2006), es un concepto naciente en cuanto a la ciencia y las políticas climáticas, el cual durante el último tiempo fue desencadenando un proceso de desarrollo teórico y práctica de evaluación.

Una definición de vulnerabilidad al CC la enuncia como una función del carácter, magnitud e índice de la variación climática a la que se expone un sistema, su sensibilidad y resiliencia (CARE International, 2010). La misma acumula y presenta continuidad en el tiempo, respondiendo a la cultura y el nivel de desarrollo de las comunidades (Cardona, 2001).

Según Cardona (2001), no existe independencia entre amenaza y vulnerabilidad puesto que son mutuamente condicionantes pero remarca que, debido a que en muchos casos no es posible interponerse a la amenaza, son modificadas las condiciones de vulnerabilidad, centrándose las mismas en necesidades básicas de desarrollo. Las personas que se encuentran excluidas en los planos social, económico, político, etc. son sustancialmente vulnerables al CC como en ciertos casos a la adaptación y la mitigación (IPCC, 2014a).

López et al. (2019) utilizaron las siguientes dimensiones para describir la vulnerabilidad humana ante la amenaza de inundaciones por precipitaciones extremas; definiendo al riesgo como la probabilidad de que a una población le suceda algo dañino a partir de una amenaza o

peligro; y a la susceptibilidad como el grado de fragilidad interna de los sujetos, objetos o sistema para recibir el posible impacto del evento.

Las evaluaciones de vulnerabilidad son muy importantes en las investigaciones sobre las dimensiones humanas del CC, puesto que analizan quiénes y qué son sensibles al CC y el motivo, además de analizar las capacidades de adaptación (Ford et al., 2010). La evolución de dichas evaluaciones demuestra que existen las que consideran los múltiples efectos del CC en un sistema en particular hasta evaluaciones que recomiendan políticas de reducción de riesgos (Füssel y Klein, 2006).

En cuanto a mitigación, el IPCC en su quinto informe expone que la misma es una intervención del hombre con el objeto de reducir las fuentes de generación de gases de efecto invernadero o de incrementar los sumideros de dichos gases, (IPCC, 2014b) en el cual el bienestar humano debe ser primordial, resultando los enfoques de resiliencia y vulnerabilidad de relevancia directa (Larsen y Gunnarsson-Östling, 2009).

Se remarca lo de bienestar humano puesto que, las reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero, implican costos económicos y humanos (Arreguín Cortés y Rubio Gutierrez, 2014), los cuales varían entre los distintos países dependiendo del comportamiento, estilo de vida y cultura (IPCC, 2014b). Cabe destacar que, además de reducir la tasa y magnitud del calentamiento, la mitigación incrementa el plazo del que se dispone para la adaptación (IPCC, 2014a).

### **2.3.2.2 COMUNICACIÓN DEL RIESGO**

Según Lezama (2008) por más que un problema tenga una existencia física real, si no es percibido y asumido por la sociedad como tal, resulta socialmente irrelevante.

Existen dos formas preponderantes en las cuales el riesgo es construido socialmente según Beltramino (2018): una de percepción social que cree al riesgo como algo real que afecta a la población y por otro como una construcción social, como una representación diferente de las relaciones sociedad-naturaleza en la cual el conocimiento y la incertidumbre afectan la forma en que se relaciona la sociedad con el ambiente.

Algunos de los motivos por los cuales las personas no asumen conciencia sobre los riesgos producto del CC, según (González Gaudiano, 2012) son los siguientes: desconfianza de que sus acciones tengan efecto frente a un problema de causas tan complejas e intangibles, no es

percibido como una amenaza real, no se traslada la información de CC a la vida cotidiana salvo en pequeñas acciones puntuales, confusiones entre CC y otros problemas ambientales, etc.

Según (Meira Cartea et al., 2011) resulta acertado considerar los contextos socioculturales en los que la información es distribuida. Conforme esta premisa, Van Der Linden (2015) ha realizado un estudio sobre los determinantes de la percepción del riesgo de CC, en el cual obtuvieron como resultado que más del 70 por ciento de las variaciones en las percepciones del riesgo del CC responden a factores cognitivos, experienciales y socioculturales.

Actualmente, los medios de comunicación masivos contribuyen a la construcción social de la percepción (Ramirez, 2011) pero de manera incorrecta, respondiendo dichos discursos a agentes específicos, mostrándose poco eficaces, elaborando estructuras narrativas poco definidas a nivel formal y educativo; y en ocasiones distorsionadas (Piñuel Raigada, 2013). Cabe destacar que en Latinoamérica los discursos no se presentan en forma pura y consistente, como es el caso de países como Estados Unidos, en los cuales los intereses económicos de las industrias definen los mismos (González Gaudiano, 2012).

Por otro lado, resulta muy desalentador esperar que los medios incentiven sobre el consumo social responsable, puesto que la gran mayoría responden a pautas publicitarias comerciales. No obstante, resulta necesario que los riesgos sean informados para impulsar el control social de los mismos e impedir que se produzcan, ya que ocultar los riesgos los incrementa (Ramirez, 2011).

### **2.3.2.3 GESTIÓN DEL RIESGO**

La gestión del riesgo al CC consiste en reducir la vulnerabilidad y la exposición e incrementar la resiliencia, frente a los posibles daños de los fenómenos climáticos extremos (IPCC, 2012).

A nivel global, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) resulta ser el foro multilateral más trascendental en lo que concierne a afrontar el CC; contando el mismo con una participación casi mundial (United Nations Climate Change, 2021).

En Argentina, la entidad que se ocupa de las políticas de adaptación es la Dirección Nacional de Cambio Climático, dependiente de la Secretaría de Cambio Climático y Desarrollo Sustentable, de la Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación

(SAyDS). Esta dirección, trabaja interactuando con los diversos ministerios y sectores mediante el Gabinete Nacional de Cambio Climático (Ryan et al., 2018).

Para lograr una eficiente gestión del riesgo, resulta imperiosa la integración de conocimientos científicos, técnicos y locales, los cuales contribuyen a la reducción de riesgos de desastre y la adaptación (IPCC, 2012). En nuestro país, existe una masa considerable de investigaciones sobre CC, pero en bastante menor medida sobre vulnerabilidad y adaptación. Además, resulta importante resaltar que dichas investigaciones se encuentran concentradas, ya sea en los sectores productivos más importantes o por su cercanía a los centros de investigación (Ryan et al., 2018). Si bien hay un avance considerable en gestión, será necesario impulsar mediante diferentes mecanismos, las investigaciones sobre los impactos del CC en las diversas regiones de país, además de fomentar las investigaciones sobre CC que permitan una transferencia directa al medio, y desde una manera que resulte asimilable para los organismos de toma de decisiones.

### **2.3.3 IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS SH**

Distintas investigaciones en diversos países han demostrado el impacto que ocasiona el CC sobre régimen hidrológico; siendo los resultados de éstos muy variados: artículos publicados sobre el impacto del CC en los sistemas hidrológicos de México dan cuenta de que, con el aumento de la evaporación producto del calentamiento global, se presenta una tendencia a la sequedad (MartínezAustria e Irula Luzto , 2016); disminuyendo la disponibilidad de agua (Figuroa Gallegos, 2016) tanto para caudales altos como bajos (Velázquez et al., 2015) e incrementándose todo esto producto de la disminución de las precipitaciones (Montero Martínez et al., 2013). Efectos similares se presentan en España (Marcos Garcia y Pulido Velazquez, 2017), (Candela et al., 2015) y (Calbó et al., 2012); Portugal (Portela y Quintela, 2001), Península Ibérica (Barrera Escoda y Cunillera, 2011), Haití (Setegn y Donoso, 2017) y Litoral-Mesopotamia de Argentina (Pedraza et al., 2010).

En Estados Unidos (Orozco et al., 2018) Canadá (Bobba et al., 1997), Francia (Ruiz Villanueva et al., 2015) y sectores de Chile (Pizarro et al., 2013), se tiene que un leve aumento de la temperatura produce afectaciones fuertes en la escorrentía de alta montaña, generándose los flujos máximos producto del deshielo, en temporadas más tempranas. En el caso de Brasil (Schardong et al., 2014) y algunos sectores de Chile (Lagos et al., 2014) también se producen

incrementos en la escorrentía, pero en este caso producto principalmente del aumento de eventos de precipitaciones extremos.

Un panorama completo sobre los sistemas hidrológicos de Argentina de Barros y Camilloni, (2020) indica, que la parte subtropical que presentaba desde 1960 hasta 2000 aumento en las precipitaciones, disminuyó posteriormente a este crecimiento en muchas regiones del norte y centro del país, incluso en algunas zonas puntuales restituyendo el aumento del siglo pasado. Estas tendencias decrecientes también se presentaron en la cordillera de los Andes y norte de la Patagonia. Destaca además que, las tendencias en la precipitación no se distribuyeron equitativamente en el año, sino que principalmente para Argentina subtropical, las tendencias positivas en la precipitación anual se presentaron en verano y estaciones intermedias, mientras que en invierno presentaron hasta incluso tendencias negativas en el centro del país. También resalta que desde los años 60, se presentan precipitaciones más extensas y frecuentes, y una disminución de las precipitaciones más débiles.

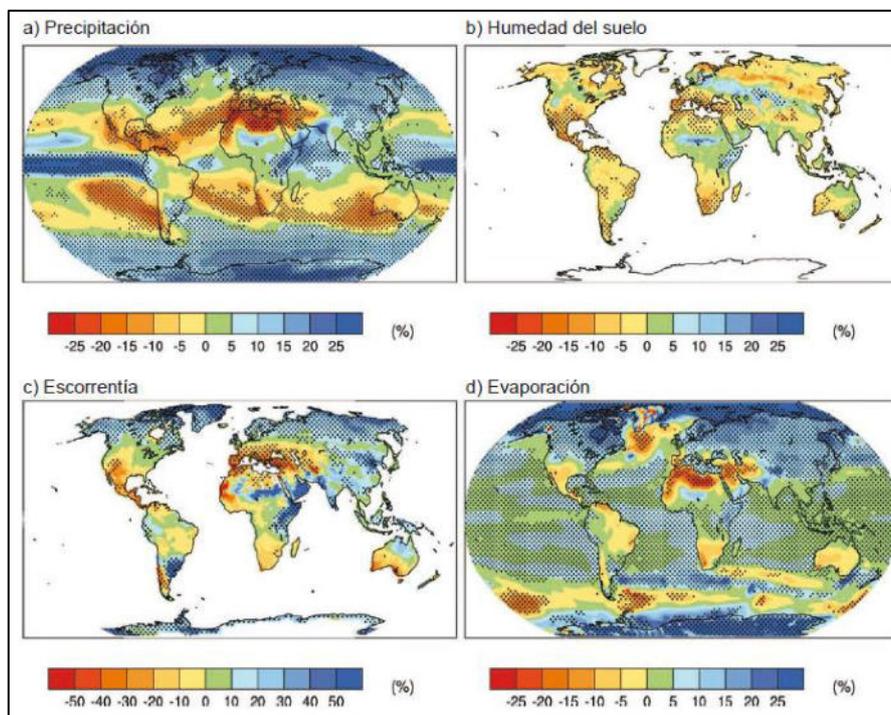
En cuanto a la cuenca del Plata, a la cual pertenece el SH de estudio, manifiesta que en el lapso de inicios de la década del 70 los caudales de diversos ríos aforados presentaron un incremento del 15% al 20%; no pudiendo ser atribuible directamente al incremento de lluvias en la región, puesto que no sólo se presentaron cambios en la precipitación sino también en los usos del suelo, que alteran otros factores como ser la escorrentía y la evaporación.

#### **2.3.4 MENCIONES DEL IPCC SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO EN SH**

En 2008, producto de la dispersión de la información del cuarto informe del IPCC referida sobre agua y CC, el IPCC se propone elaborar una publicación especial abordando esta temática. En dicha publicación, titulada "El cambio climático y el agua" (Bates et al., 2008) manifiestan que, el calentamiento climático observado, presenta coherencia con variaciones en ciertos componentes del ciclo y los sistemas hidrológicos. Además, señalan que, hasta el momento de elaboración del informe, no se presentaba una atribución concreta al incremento de las precipitaciones, debido a que éstas son influidas por la variabilidad natural en gran escala. Pero, lo que sí han observado a nivel mundial, es un aumento en la intensidad de las precipitaciones, principalmente en áreas tropicales y de latitudes altas.

Diversas proyecciones a nivel global plantean la futura presencia de esporádicas lluvias intensas y abundantes, con gran volumen de escorrentía, seguidos de largos períodos secos y aumento de la evaporación. Para acompañar dicho dictamen presentan, mediante el

promedio de un agregado de 15 modelos, los cambios en factores del ciclo hidrológico como ser: precipitación, humedad del suelo, escorrentía y evaporación a nivel mundial; mostrándose a continuación la Figura 6.



**Figura 6:** (a) cambios en precipitación, (b) cambios en humedad del suelo, (c) cambios en escorrentía y (d) cambios en evaporación.

Cabe destacar que, en la Figura 6 los cambios están dados en porcentaje y siendo el resultado del promedio de 15 modelos, para el período 2080-2099 respecto del período 1980-1999. En trama sombreada se presentan las coincidencias superiores al 80% de los modelos respecto al signo.

Algo que resaltan, y que ya pudo apreciarse en la Figura 6, son las discordancias entre los modelos, producto de la incertidumbre sobre las emisiones de gases futuras, la propia variabilidad interna del sistema y la propia incertidumbre de los modelos; destacando mayor coherencia a medida que se reduce la escala espacial.

Producto de dichas discrepancias, fue reunido el Grupo de trabajo sobre modelado acoplado del WCRP (World Climate Research Programme) asistiendo unos 20 grupos de modelado climático de todo el mundo, con motivo de alentar un nuevo conjunto de investigaciones coordinadas de modelos climáticos para el CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5). Entre los objetivos del CMIP5, se encuentra la evaluación de modelos de simulación

anteriores, la comprensión de los factores encargados de la disimilitud de los modelos y la proyección de escenarios futuros conforme escalas de tiempo a corto plazo (hasta 2035) y a largo plazo (hasta 2100 y superior).

Respecto a las proyecciones arrojadas por el CMIP5 para América del Sur, (Magrin et al., 2014) para una trayectoria de concentración representativa, de ahora en adelante RCP, en este caso 4.5 estipulan un aumento de entre 0.6°C y 2°C y para el escenario RCP8.5 de 2.2°C a 7°C. No obstante, se sigue haciendo hincapié en el abordaje de la variabilidad climática y la identificación de extremos, planteando mejorar la escasez de datos climáticos e incrementar estudios regionales.

En cuanto al Sexto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2021b), más específicamente en el aporte del Grupo de Trabajo 1, se aborda una comprensión física más actual de CC, recopilando los últimos avances en la ciencia del clima y combinando múltiples líneas de evidencia. Se ha incorporado además, con objeto brindar un análisis tanto espacial como temporal flexible ya sea de la información sobre el CC basada en datos como de los resultados de la evaluación, un Atlas interactivo. (IPCC, 2021a).

En el Atlas, para la región Sur-Este de América del Sur, se presentan los coeficientes de incrementos de precipitaciones máximas, de 5 días de duración, los cuales fueron adoptados en esta Tesis, mostrándose en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Coeficientes de incrementos de Precipitaciones máximas de 5 días de duración. CMIP6-Coupled Model Intercomparison Project Fase 6(IPCC ARG6-WG1, 2021) Región: Sur-Este de América del Sur.

Escenario	Warming (°C)	Coef. CC
ECC1	1.5	1.06
ECC2	2.0	1.10
ECC3	3.0	1.20
ECC4	4.0	1.30

### **3. ANTECEDENTES DE LA TESIS**

Para el sistema hidrológico de estudio, la información de carácter hidrológico-hidráulico resulta muy escasa y hasta a veces confusa. Como principal observación, se menciona que no existe una única delimitación del mismo, mostrándose variaciones entre las diversas entidades con incumbencias en el tema. Además, no se presentan estudios que analicen el comportamiento íntegro de éste. Con respecto a la información que se utiliza como insumo para el análisis de los sistemas hidrológicos, también resulta exigua y hasta en algunos casos, inexistente. No obstante ello, a continuación se comentan estudios de interés, los cuales, si bien analizan de forma parcial el área de incumbencia, resultan enriquecedores dada la información que brindan.

Un primer trabajo que resulta importante mencionar como antecedente de información significativo para esta Tesis es: “Proyecto ejecutivo de obras de evacuación laguna El Basural” (EVARSA, 1995). Dicho estudio fue realizado en el año 1995 solicitado por la Municipalidad de Venado Tuerto. Tal como su título lo indica, realiza el estudio de una laguna en particular, contemplando el área de aporte que llega a la misma y aguas abajo de ésta. Como referencia de ubicación con respecto a esta Tesis, es el análisis del sector central de la parte alta del sistema hidrológico.

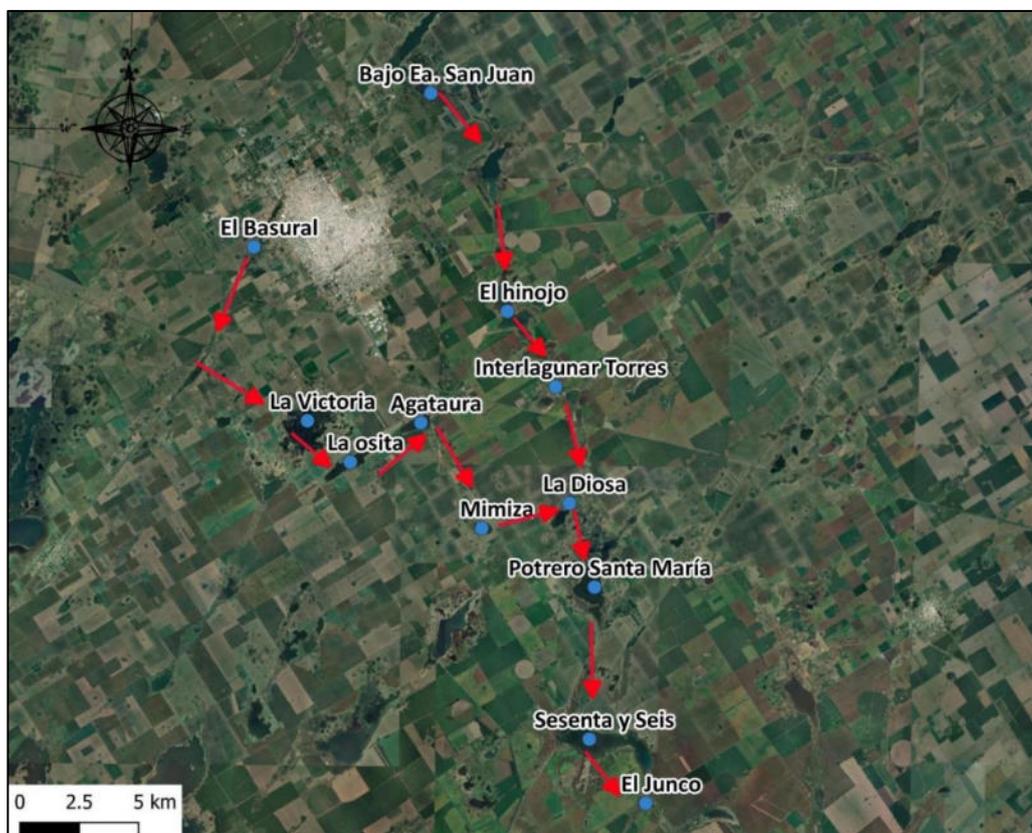
Como breve explicación del mismo, puede decirse que éste estudia la evacuación de los excedentes hídricos de la laguna El Basural, ubicada en Venado Tuerto – Santa Fe, mediante medidas estructurales y no estructurales, con el objeto de facilitar el drenaje de los excesos pluviales que desaguan en dicha laguna, sin trasladar efectos perjudiciales aguas abajo. El mismo, demuestra la eficiencia de conducir los excesos hídricos de la laguna El Basural hacia aguas abajo, mediante una canalización que inicia en dicha laguna interconectando las lagunas y bajos intermedios hasta finalizar en la laguna El Junco. A su vez, brinda herramientas para mejorar las condiciones de caminos comunales del sistema.

Los materiales que emplearon para el desarrollo del trabajo consistieron en cartas planimétricas del IGN hasta el año 1958, planialtimetría y perfiles longitudinales de canales y lagunas del área de estudio, mosaicos aerofotográficos en escala 1:50000 hasta el año 1967, imágenes satelitales en escala 1:250,000 y 1:500,000; y series del orden de 30 años de precipitaciones diarias de diversas localidades de la región.

En cuanto a las utilidades que el mismo brinda, se resalta la descripción del comportamiento del escurrimiento para su sector de estudio, la cual define dos líneas potenciales de drenaje: una con dirección semejante norte-sur, que conecta el bajo de la estancia San Juan, laguna El Hinojo, interlagunar Torres, laguna La Diosa, laguna Potrero Santa María y laguna Sesenta y Seis; y otra con dirección semejante noroeste- sureste, conectando las lagunas El Basural, La Victoria, La Osita, Agataura, Mimiza y La Diosa. En la Figura 7 se puede apreciar un mapa esquemático de dichos sentidos de escurrimiento.

Además, el informe realiza un importante estudio de caracterización de las lagunas intervinientes, el cual contempla un análisis batimétrico de las mismas y el comportamiento de éstas frente a diversos eventos climáticos, indicando la variación areal y altimétrica.

Se destaca que la información y los conceptos extraídos de dicho informe, son aplicados a la Tesis principalmente como información testigo para el material generado en esta Tesis mediante técnicas de Teledetección, Sistemas de Información Geográfica y simulaciones hidrológicas/hidráulicas.

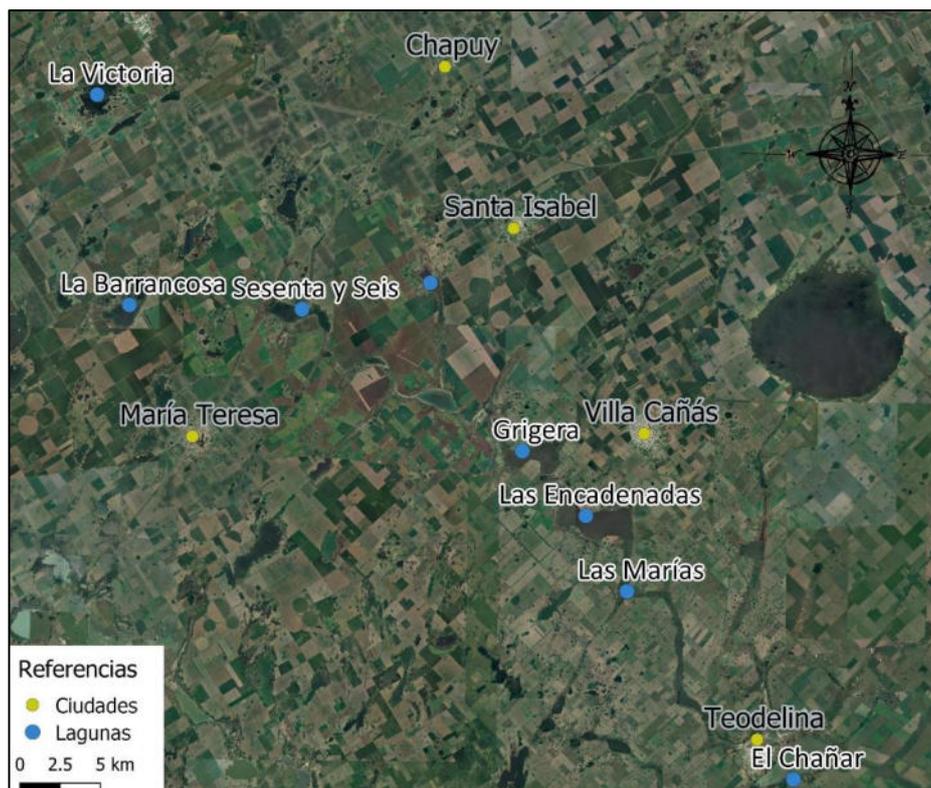


**Figura 7:** Sentido de escurrimiento de aguas pluviales en Venado Tuerto y alrededores según Evarsa.

Un segundo trabajo de interés para esta Tesis se titula "Estudio hidrológico-hidráulico y propuesta de obras para el control, regulación y gestión de los aportes a la laguna El Chañar" el cual fue realizado por el Instituto Nacional del Agua (INA), más precisamente por la dependencia Centro Regional Litoral (INA Centro Regional Litoral, 2016). Este trabajo, como su título lo indica, realiza un análisis y propuestas para el área que aporta agua precipitada mediante escurrimiento superficial a la Laguna El Chañar, ubicada en el distrito de Teodelina. Dicha área, forma parte de los sistemas hidrológicos Canal Alternativa Norte y Las Encadenadas, siendo esta última de interés para esta Tesis. Cabe destacar que, de esta área de interés, no es contemplado un sector de la parte alta debido a una canalización existente que desvía el agua precipitada hacia el canal San Urbano, el cual pertenece al sistema hidrológico Melincué.

Para la elaboración del mismo utilizaron cartografía del IGN en escala 1:50,000, relevamientos planialtimétricos y estudios de diagnóstico para el sector Alternativa Norte, imágenes satelitales Landsat y caudales y niveles medidos por la SSRH-INA, en puntos característicos de aporte a la laguna de interés. Además, se realizaron relevamientos topográficos en el cierre de cada sistema y un estudio batimétrico para la laguna El Chañar. Las simulaciones para el análisis del comportamiento de ambos sistemas se realizaron mediante el software libre HEC-HMS, considerando a las lagunas como reservorios y al escurrimiento superficial unidireccional, con la aproximación de onda cinemática para propagación de flujo.

La importancia que reviste el trabajo para esta Tesis principalmente se centra, tal como en el trabajo anterior, en la información sobre la capacidad de retención de las lagunas sobre el agua precipitada. El mismo, presenta relaciones altura-caudal para algunas de las lagunas de interés de esta Tesis: Las Encadenadas (laguna), Grigera, Runciman, La Barrancosa, La Victoria, Sesenta y Seis, El Aljibe y Las Marías; presentándose en la Figura 8, la ubicación de las mismas.



**Figura 8:** Ubicación de lagunas caracterizadas, pertenecientes al SH Las Encadenadas.

Además, otra información importante que también se emplea como referencia para esta Tesis son los caudales proyectados para recurrencias de 25 y 50 años, para este caso en la salida de las lagunas Las Marías, próximo al cierre de análisis.

Las disimilitudes entre el estudio de aportes a la laguna El Chañar y esta Tesis se centran en la forma de representación del sistema hidrológico: El trabajo de aportes a la laguna El Chañar representa a las lagunas como reservorios acotados y el escurrimiento superficial como unidireccional, gobernado por fuerzas de gravedad y fricción (onda cinemática), representando a las cañadas y bajos por los que fluye el agua e interconecta a las lagunas como canalizaciones. Además, considera las alcantarillas presentes en el sistema. El modelo hidrológico-hidráulico utilizado en esta tesis (ver Anexo A), representa el escurrimiento superficial en forma multidireccional, considerando las fuerzas de presión, gravedad y fricción en la ecuación dinámica (aproximación de onda difusiva para propagación de flujo), la cual es más apropiada para describir los procesos hidráulicos en sistemas hidrológicos de llanura.

#### **4. MATERIALES Y METODOLOGÍA**

En este Capítulo se presentan las metodologías y materiales utilizados para poder realizar la Tesis. El mismo, en principio, contiene la constitución del modelo para la simulación hidrológica/ hidráulica del SH (Apartado 4.1.1) la cual requiere principalmente de información geomorfológica (4.1.1.1), información hidrológica (4.1.1.2), información sobre canalizaciones (4.1.1.3) y de alturas iniciales de agua en la superficie (4.1.1.4). Posteriormente es realizada la calibración y validación del modelo (Apartado 4.1.2), a efectos de que sea representativo del comportamiento real del SH, seleccionando eventos ya acontecidos en el SH (4.1.2.1), efectuando la simulación de los mismos (4.1.2.2) y validando los resultados de dichas simulaciones conforme metodologías de Geomática (4.1.2.3). Para finalizar, es explotado el modelo para eventos de diversas recurrencias considerando CC (Apartado 4.2) y conforme los resultados obtenidos, son efectuados análisis de permanencia de agua en superficie (Apartado 4.2.3) y analizada la delimitación del SH. Con toda la información adquirida, son identificadas las zonas de amenaza, construidos Mapas de Amenaza y efectuada la contrastación con áreas de riesgo según Ley 11,730 (Apartado 4.2.4).

En lo que respecta a Materiales, a modo de resumen se indica que es empleada información básica para realizar la simulación hidrológica/hidráulica del sistema de estudio, como ser: DEM, mapas de tipologías y usos del suelo, imágenes satelitales, canalizaciones, alcantarillas intervinientes, registros históricos de lluvias, temperatura, viento, humedad, etc. Se destaca que dicha información es adquirida conforme métodos clásicos de recolección y mediante productos provenientes de la teledetección.

En cuanto a Metodología, son utilizadas herramientas de geomática, principalmente para la preparación de información espacial. En cuanto a la simulación hidráulica del sistema de estudio, es empleado el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0, cuya descripción se presenta en el Anexo A.

La estructura de este Capítulo, como pudo apreciarse recientemente, se presenta organizada en 2 grandes Apartados, a modo de generar una organización que exprese la secuencia, explicitando los materiales utilizados y brindando una disposición conforme las distintas metodologías utilizadas. Debido a ello, los dos grandes Apartados que se exhiben son: Constitución del modelo VMMHH 1.0 y calibración/validación (Apartado 4.1) y Aplicación del VMMHH 1.0 en eventos extremos ante cambio climático (Apartado 4.2).

A continuación, se presentan desarrollados los Apartados mencionados recientemente.

## **4.1 CONSTITUCIÓN DEL MODELO VMMHH 1.0 Y CALIBRACIÓN / VALIDACIÓN**

### **4.1.1 CONSTITUCIÓN DEL MODELO VMMHH 1.0**

El VMMHH 1.0 está compuesto por un modelo hidrológico- hidráulico (Riccardi, 2001) y una plataforma computacional (Stenta et al. 2005).

La modelización del SH, se encuentra constituida por elementos del tipo Valle y Río, los cuales representan en este caso, porciones de planicies y canalizaciones/cañadas presentes en el mismo. Además, son presentadas las diferentes vinculaciones entre los elementos.

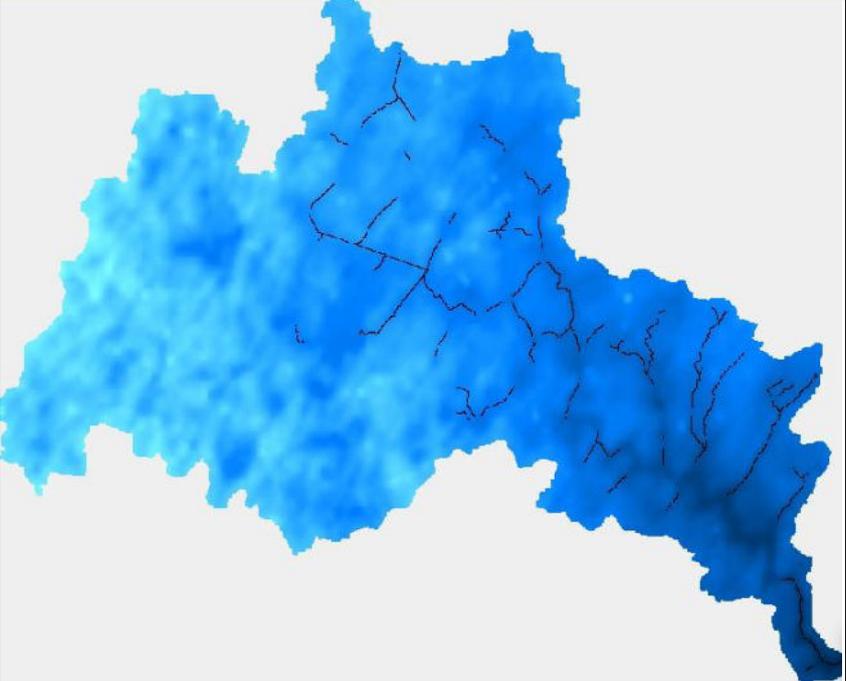
Cada uno de los elementos que componen el SH deben contener información característica del área que representan, en el caso de elementos del tipo Valle, deberán contener información como ser: coordenadas, altura del terreno y coeficiente de rugosidad de Manning. En cuanto a los elementos de tipo Río, deberán contener, además de la información requerida para elementos Valle, ancho de base, talud y profundidad del canal. Conjuntamente, con la finalidad de representar situaciones semejantes a la realidad, los elementos pueden contener alturas iniciales de agua, cuando así lo requiera la representación del evento.

Otro factor para considerar en la modelización es el contenido humedad inicial en los elementos. En el modelo hidrológico-hidráulico de elementos, al definir el CN al inicio de una tormenta real o de proyecto, se está definiendo el complejo suelo-vegetación más una aproximación a la humedad antecedente en cada elemento de discretización. Si bien en el modelo la señal de entrada es la lluvia neta, esta variable se deduce a partir de la precipitación total y el CN calculado inicialmente a partir de una condición media (CN II) y luego llevada a una condición real (CN entre condición I (seca) y III (saturada)) que representa la humedad inicial antecedente para un evento.

En este Apartado, se presenta el acondicionamiento de la información recolectada necesaria para la modelización del sistema. El mismo se presenta subdividido conforme cuatro Apartados: información geomorfológica (Apartado 4.1.1.1), información hidrológica (Apartado 4.1.1.2), información sobre canalizaciones (Apartado 4.1.1.3) e información sobre alturas iniciales (Apartado 4.1.1.4).

A continuación, se expone en Tabla 3 un resumen de las características del modelo de celdas constituido.

**Tabla 3:** Resumen de características del modelo de celdas constituido.

Características del modelo	Visualización del modelo en el software VMMHH 1.0
Cantidad de elementos	
323,795	
Cantidad de elementos Valle	
320,287	
Cantidad de elementos Río	
3,508	
Vinculaciones Valle-valle	
634,475	
Vinculaciones Valle-Río	
7,046	
Vinculaciones Río-Río	
3,492	

#### **4.1.1.1 INFORMACIÓN GEOMORFOLÓGICA**

En lo que respecta a la determinación morfológica, la misma fue dividida para una mejor definición en cinco grandes grupos, a saber: de la corrección altimétrica del DEM (Apartado 4.1.1.1.1), de la generación de batimetrías (Apartado 4.1.1.1.2), delimitación marginal del SH de estudio (Apartado 4.1.1.1.3), discretización del DEM corregido (Apartado 4.1.1.1.4) y Determinación de rangos numéricos componentes de las subcuencas (Apartado 4.1.1.1.5).

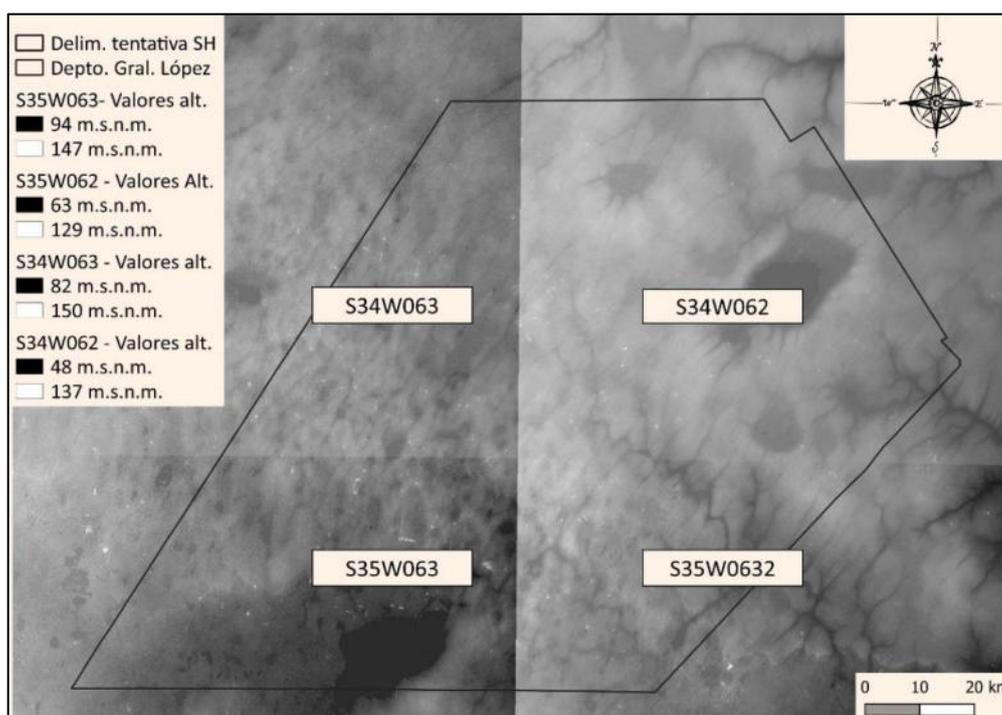
##### **4.1.1.1.1 Corrección altimétrica del DEM**

Para realizar las correcciones altimétricas al DEM, son empleados los siguientes materiales:

- **Modelo Digital de Elevación:** Es utilizado el DEM obtenido por la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Model) de 90 m de resolución espacial. Debido a que la zona de estudio posee una extensión considerable, son manipuladas cuatro escenas del DEM-SRTM, las cuales lo contienen en su totalidad: S34W062, S34W063, S35W062 y S35W063.

- Puntos acotados IGN: Es empleada la capa de puntos en formato shape proveniente del Instituto Geográfico Nacional (IGN), la cual presenta valores altimétricos precisos, referenciados sobre el nivel del mar, para el área de estudio.
- Software QGIS: Este software es un SIG de código abierto licenciado bajo GNU (General Public License). El mismo ofrece muchas funcionalidades SIG comunes proporcionado por las características principales y complementos. A su vez, ofrece herramientas que se adaptan a necesidades especiales con la arquitectura de complemento extensible y bibliotecas que se pueden utilizar para crear complementos (QGIS, 2021).
- Software GRASS GIS: Este software es un paquete de SIG gratuito y de código abierto utilizado para la gestión y el análisis de datos geospaciales, el procesamiento de imágenes, la producción de gráficos y mapas, el modelado espacial y visualización (GRASS, 2019).

En cuanto a la metodología, debido a que el modelo puede presentar ciertas diferencias con la altimetría real del terreno, se realizan diferentes correcciones al mismo. Para iniciar con dichas correcciones, es efectuada la unión de las cuatro escenas del DEM-SRTM. El procedimiento es realizado mediante el software QGIS, utilizando las herramientas para formato ráster, dentro del paquete de herramientas varias (Miscelánea), ejecutando la orden de Construir ráster virtual. En la Figura 9 se pueden observar las cuatro escenas de SRTM unidas, abarcando el área tentativa de aporte del SH Las Encadenadas.



**Figura 9:** Escenas DEM que comprenden el SH Las Encadenadas.

Luego de realizada esta nueva capa ráster de las cuatro escenas unidas, la misma es exportada al software GRASS-GIS para aplicar correcciones con herramientas específicas para DEM's.

La primera operación de correcciones altimétricas realizada al modelo es Relleno de vacíos y depresiones: Las falsas depresiones encontradas en el DEM son principalmente causadas por mediciones erróneas y carencia de densidad de puntos de muestra en la superficie del terreno. Puesto que estas depresiones afectan la simulación del flujo de agua sobre la superficie del terreno, es necesario corregirlas. Para ello se utilizó la herramienta `r.fill.dir` la cual se encuentra en la pestaña ráster, dentro del grupo de modelado hidrológico.

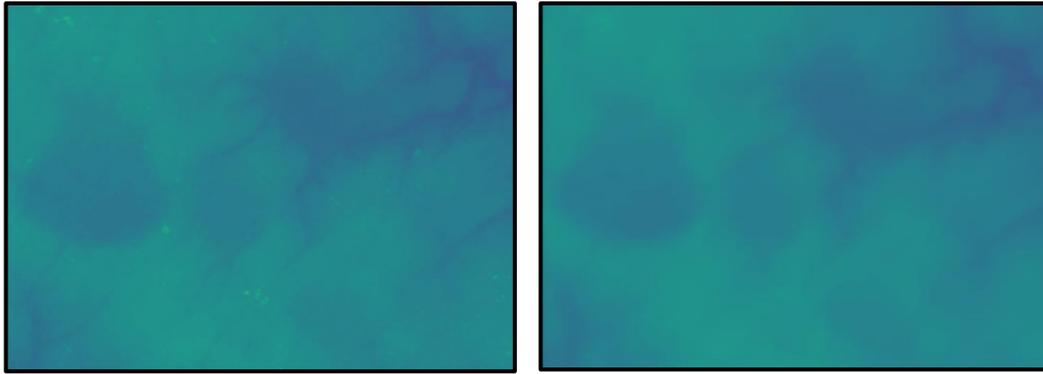
Pueden observarse, en Figura 10, las diferencias entre el modelo sin relleno de vacíos y el modelo con relleno de vacíos de un sector del área de estudio.



**Figura 10:** Comparación de DEM sin relleno de depresiones (izquierda) con respecto a DEM corregido (derecha).

Otra de las operaciones realizadas, sobre el modelo con las correcciones de relleno de vacíos, fue aplicar un filtro de paso bajo de ventana móvil. Estos filtros son útiles cuando se supone que el ráster tiene gran cantidad de ruido y se quiere eliminar. En este caso se utilizó para resaltar la información correspondiente a escala de terreno, eliminando la variabilidad asociada a los tipos de cubierta presentes y uniformizando su respuesta. El comando ejecutado fue `r.neighbors` situado dentro de las herramientas ráster, en el grupo de análisis de vecindario. Se utilizó un tamaño de vecindario de 11 y se indicó que el análisis se realice sobre el promedio del vecindario.

En la Figura 11 se aprecia la diferencia entre el DEM sin suavizar y el DEM con filtro de paso bajo de un sector del área de estudio.

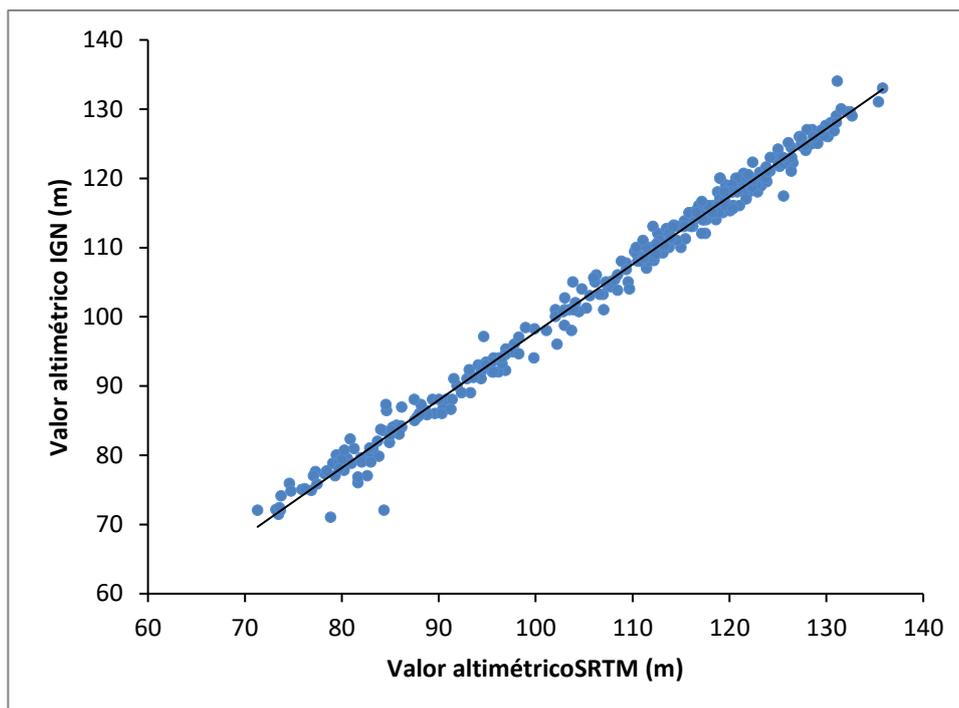


**Figura 11:** DEM sin filtro de paso bajo (izquierda) versus DEM con filtro de paso bajo de ventana móvil (derecha).

Luego de estas correcciones, con motivo de corroborar la validez de los valores altimétricos del modelo, fue realizado un análisis de regresión lineal simple para puntos seleccionados del DEM, los cuales se contrastaron con puntos acotados provistos por el Instituto Geográfico Nacional -IGN con objeto de identificar una relación entre las variables. Para ello, el modelo SRTM corregido fue exportado al software QGIS y mediante la herramienta Point Sampling Tool, en las mismas coordenadas de los valores altimétricos del IGN (capa vectorial punto) se extrajeron los valores altimétricos del DEM, creándose una nueva capa con 336 puntos.

Seguidamente, fue realizada la intersección de ambas capas (puntos IGN y puntos SRTM) con el objeto de lograr ambos valores altimétricos de cada punto en una misma tabla de atributos. Luego, se exportaron dichos pares de valores a Excel para realizar con ellos un gráfico de dispersión con la finalidad de advertir algún tipo de tendencia o de relación.

En la Figura 12 puede observarse que el producto de dicho contraste presenta una marcada relación lineal entre ambas variables.



**Figura 12:** Gráfico de dispersión de puntos altimétricos IGN versus puntos altimétricos SRTM corregidos.

La correlación obtenida entre los 336 pares de valores del modelo SRTM y del IGN fue formidable, con un valor  $R^2=0.99$ , un error porcentual del sesgo de 0.001 y una desviación de la raíz media cuadrada de 1.61, lo cual indica que la corrección es acertada. La ecuación de ajuste del modelo SRTM corregido es la siguiente, realizando la aplicación de la misma mediante la herramienta Calculadora ráster.

$$y=0.9799 \cdot X\_SRTM-0.2197 \quad (2)$$

Finalizadas las correcciones altimétricas, debido a que el DEM poseía un sistema convencional que es empleado para la representación de la cartografía a nivel mundial (EPSG:4,326 - WGS 84), el mismo fue proyectado a coordenadas planas (para la zona de estudio se utilizó WGS 84 – UTM zona 20-S, codificación: EPSG 32,720) con el objeto de trabajar con coordenadas precisas y unificar el sistema con los mapas de suelos y usos del suelo. A su vez, éste fue resampleado a píxeles de 100 m x 100 m, mediante calculadora ráster en QGIS, puesto que el software QSWAT+, con el cual se va a trabajar más adelante, se ejecuta con mosaicos de iguales valores en x e y.

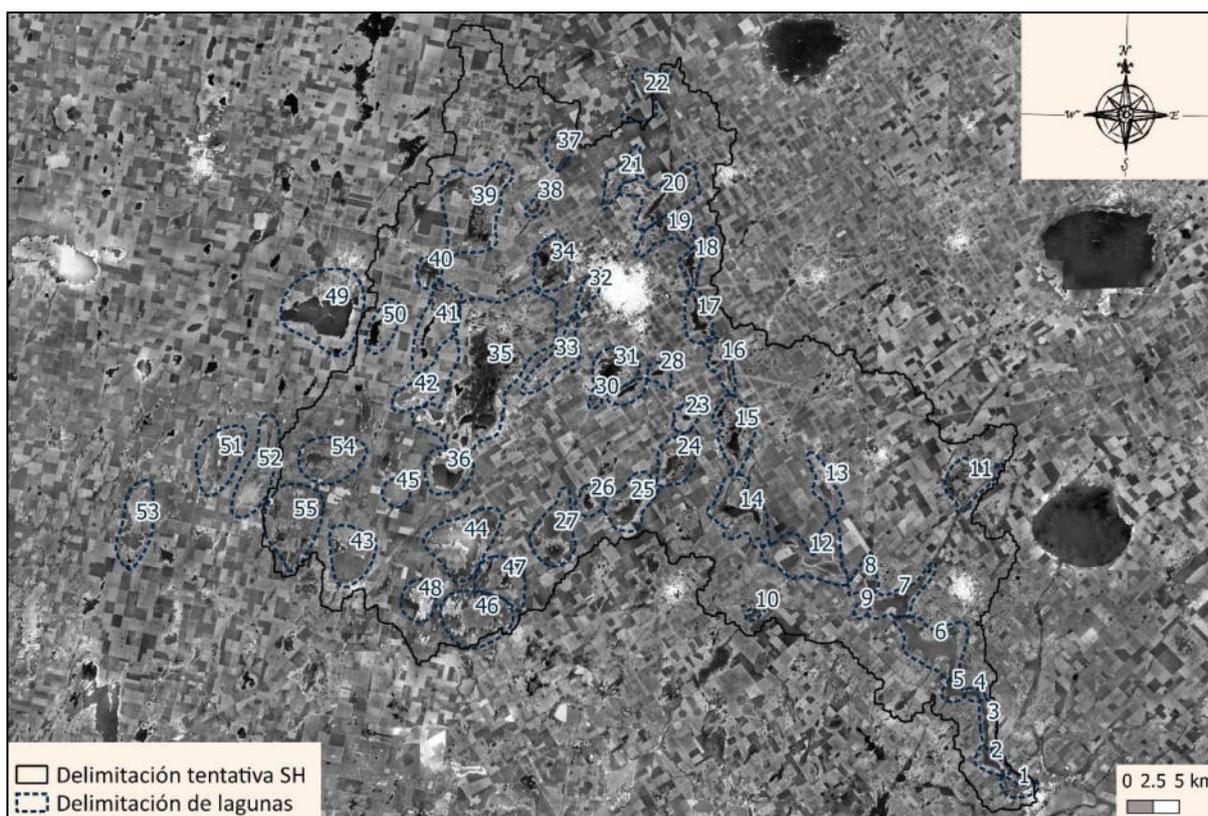
#### **4.1.1.1.2 Generación de batimetrías**

Para realizar una interpretación batimétrica marginal del sistema de estudio, y que la misma resulte funcional a la simulación hidrológica, son empleados los siguientes recursos:

- Imágenes satelitales Landsat: Es utilizado un registro histórico de imágenes pertenecientes a los satélites Landsat 5- sensor TM y Landsat 8-sensor OLI. Dicho registro inicia en el año 1989 hasta el año 2018 inclusive. Las escenas utilizadas, las cuales abarcan el área de estudio, son las pertenecientes a Path-Row 227-083 y 227-084, las cuales fueron obtenidas del sitio <https://earthexplorer.usgs.gov>.
- Software ENVI 4.8: Es un software empleado para el procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales. Ofrece una gama de herramientas y flujos de trabajo automatizados. Soporta imágenes obtenidas de numerosos tipos de satélites y proporciona herramientas de pre-proceso automático que permiten obtener información fácil y rápida, a través de sencillos flujos de trabajo. Puede desplegar grandes conjuntos de datos y metadatos, comparar visualmente cada una de las imágenes, crear representaciones 3D, generar gráficos de dispersión, explorar firmas espectrales y más (SIGSA, 2021).
- Software QGIS: Ya fue descrito en el Apartado 4.1.1.1.1.
- Software R: Es un lenguaje para el análisis estadístico y gráfico. Es un ambiente de programación formado por un conjunto de herramientas muy flexibles que pueden ampliarse fácilmente. Además, es gratuito y de código abierto (Máxima Formación, 2021).
- DEM ajustado: Citado en el Apartado 4.1.1.1.1.
- Información batimétrica proveniente de EVARSA (1995).

En cuanto a la metodología, la misma se inicia con la identificación de las lagunas pertenecientes o circundantes al SH de estudio, posteriormente se trabaja con imágenes satelitales de diferentes fechas para ver el comportamiento de las mismas con el paso del tiempo y extraer en forma de máscaras de agua sus geometrías. Para finalizar, se contrastan dichas máscaras con información altimétrica del DEM, logrando de tal manera una batimetría marginal de las lagunas (Soria et al., 2017). Cabe destacar que para las lagunas presentes en el estudio de EVARSA (1995) (ver apartado 3) se pudo además cotejar la información de manera visual con los relevamientos topobatimétricos presentes en el mismo. de A continuación, se presenta de manera más detallada la metodología empleada.

Las lagunas seleccionadas para realizar el estudio batimétrico marginal fueron elegidas conforme pertenencia o cercanía a la delimitación actual del SH, puesto que en esta instancia no se tiene una delimitación concluyente del SH, pudiendo lagunas cercanas aportar agua pluvial al mismo. En la Figura 13 pueden apreciarse enumeradas las superficies que contemplan a las lagunas seleccionadas.



**Figura 13:** Delimitación de lagunas pertenecientes y circundantes a la tentativa delimitación del SH Las Encadenadas.

Paso siguiente, son utilizadas imágenes satelitales, las cuales fueron descriptas al inicio de este Apartado, con el objeto de analizar el comportamiento areal de las lagunas. En la Tabla 4, se presenta el detalle de imágenes escogidas para realizar el estudio batimétrico.

**Tabla 4:** Listado de imágenes satelitales utilizadas para la generación de batimetrías.

Fecha	Satélite	Path-Row	Fecha	Satélite	Path-Row
28-Feb-01	L5-TM	227-082	16-Sep-98	L5-TM	227-084
14-Ene-02	L5-TM	227-083	19-Jul-00	L5-TM	227-084
1-Nov-03	L5-TM	227-083	5-Sep-00	L5-TM	227-084
8-Mar-04	L5-TM	227-083	28-Feb-01	L5-TM	227-084
18-Oct-04	L5-TM	227-083	20-Jun-01	L5-TM	227-084
11-Mar-05	L5-TM	227-083	8-Sep-01	L5-TM	227-084
6-Nov-05	L5-TM	227-083	14-Ene-02	L5-TM	227-084
25-Ene-06	L5-TM	227-083	4-Ene-04	L5-TM	227-084

Continuación de **Tabla 4:** Listado de imágenes satelitales utilizadas para la generación de batimetrías.

Fecha	Satélite	Path-Row	Fecha	Satélite	Path-Row
8-Oct-06	L5-TM	227-083	18-Oct-04	L5-TM	227-084
13-Feb-07	L5-TM	227-083	11-Mar-05	L5-TM	227-084
29-Oct-08	L5-TM	227-083	15-Abr-06	L5-TM	227-084
19-Oct-10	L5-TM	227-083	8-Oct-06	L5-TM	227-084
22-Dic-10	L5-TM	227-083	17-Mar-07	L5-TM	227-084
21-Jun-13	L8-OLI	227-083	16-Feb-08	L5-TM	227-084
9-Sep-13	L8-OLI	227-083	14-Nov-08	L5-TM	227-084
12-Nov-13	L8-OLI	227-083	6-Mar-09	L5-TM	227-084
20-Mar-14	L8-OLI	227-083	28-Ago-09	L5-TM	227-084
7-Mar-15	L8-OLI	227-083	20-Ene-10	L5-TM	227-084
21-Ene-16	L8-OLI	227-083	22-Dic-10	L5-TM	227-084
23-Ene-17	L8-OLI	227-083	28-Mar-11	L5-TM	227-084
8-May-91	L5-TM	227-083	23-Ene-17	L8-OLI	227-085
27-Jun-92	L5-TM	227-083	12-Mar-17	L8-OLI	227-086
30-Jun-93	L5-TM	227-083	31-Mar-18	L8-OLI	227-087
25-Jun-97	L5-TM	227-083			

Debido a la utilidad que le son dadas en esta Tesis a las imágenes adquiridas, es necesario realizar sobre ellas ciertos procedimientos mediante el software ENVI, los cuales son detallados a continuación.

Inicialmente, los valores de niveles digitales de las imágenes son transformados a valores de radiancia con la finalidad de obtener resultados más precisos al realizar los índices normalizados. Luego, las imágenes son corregidas geoméricamente con el soporte de dos imágenes satelitales de coordenadas precisas brindada por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

Posterior a las correcciones, son realizados índices normalizados de vegetación (NDVI), de humedad de suelos (NDMI) y de diferencia de agua modificado (MNDWI) con el objeto de destacar las coberturas más relevantes del área de estudio y discriminarlas, resultando de dicho análisis la extracción precisa de las coberturas de agua presentes (CONAE, 2016).

- *Índice normalizado de la diferencia de humedad:*

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (3)$$

donde NIR: banda situada en la longitud de onda del infrarrojo cercano, SWIR: banda situada en la longitud de onda del infrarrojo de onda corta.

- *Índice de vegetación diferencial normalizado:*

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (4)$$

donde R: banda situada en la longitud de rojo visible.

- *Índice de la diferencia de agua normalizado, modificado.*

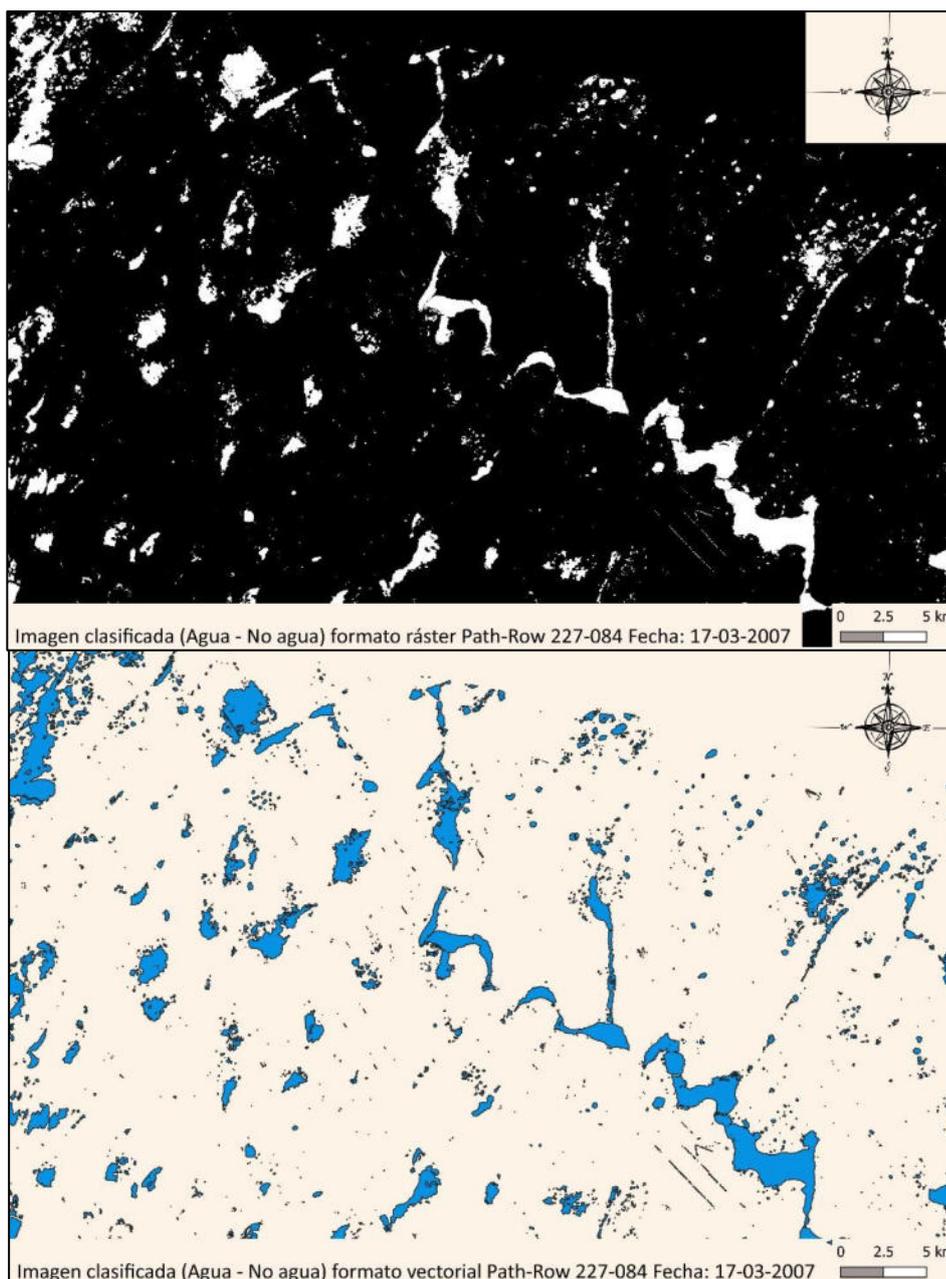
$$MNDWI = \frac{G - SWIR}{G + SWIR} \quad (5)$$

donde G: banda situada en la longitud de onda verde visible.

Seguidamente, para la obtención de las máscaras de agua es realizada una clasificación no supervisada para cada una de las imágenes seleccionadas, estableciendo un rango de obtención de clases de 30 a 50, un máximo de iteraciones de 6 y un mínimo de píxeles por clase de 30. Luego de obtenidas, es realizada una supervisión y reclasificación de las mismas, basada en los índices elaborados, logrando imágenes clasificadas en agua y no- agua.

Con el afán de adquirir un mejor manejo de las imágenes clasificadas en agua-no agua, dicha información es manipulada con el software QGIS. Las imágenes clasificadas, de formato ráster, son convertidas a formato vectorial y es eliminada la clase no agua. Estos productos son las denominadas máscaras de agua las cuales, incumbe insistir, contienen a las lagunas de estudio y demuestran el comportamiento de las mismas en las distintas fechas seleccionadas.

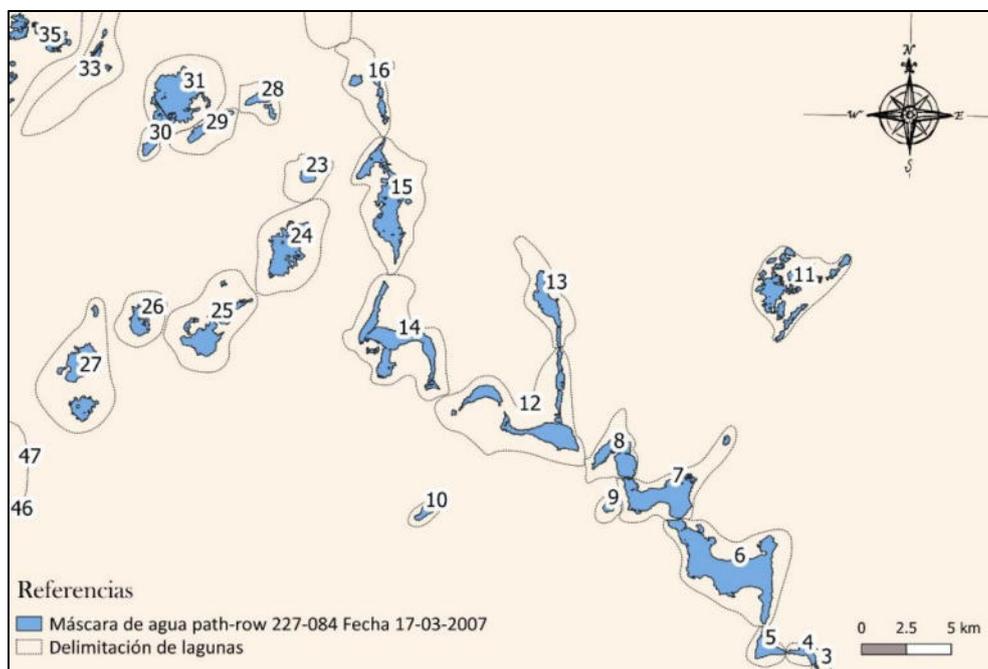
En la Figura 14 se puede apreciar una ejemplificación, en este caso de la imagen clasificada en agua-no agua (formato ráster) de la fecha 17/03/07 Path Row 227-084 y la misma convertida en máscara de agua (formato vectorial).



**Figura 14:** Comparativa entre imagen clasificada agua- no agua en formato ráster y máscara de agua en formato vectorial.

A continuación, son interceptadas cada una de las máscaras con la capa de delimitación de lagunas mostrada en la Figura 13, con motivo de generar una identificación por laguna en las superficies de las máscaras de agua. Seguidamente es calculada el área para cada superficie de agua dentro del entorno de delimitación de las lagunas y son eliminadas las áreas menores a 5 ha. Dicha convención es aplicada puesto que posteriormente esas pequeñas áreas, inconexas a las lagunas pero si pertenecientes al área delimitada, pueden propiciar desvíos en

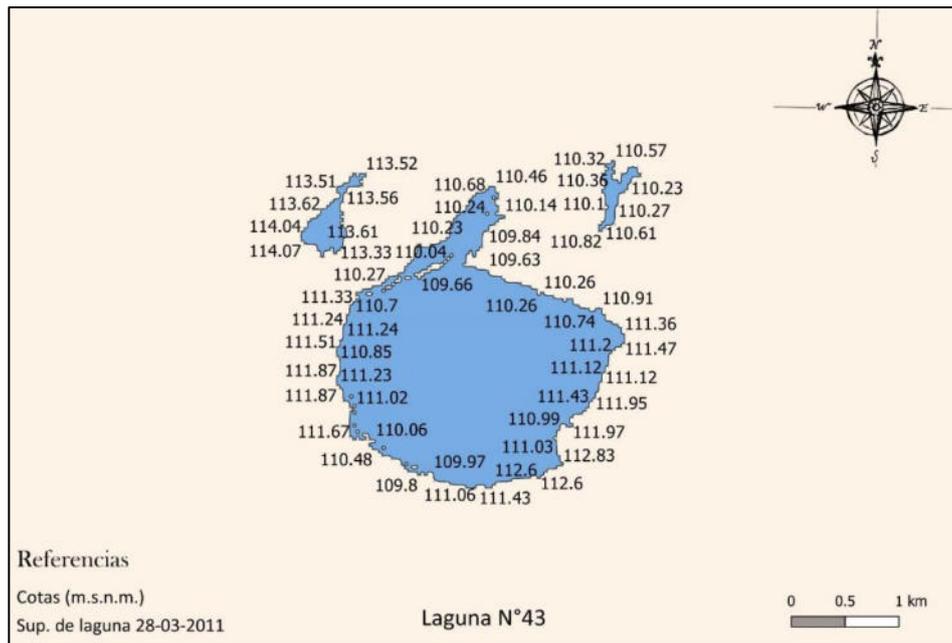
los resultados de las batimetrías. En la Figura 15 se presenta la máscara de agua para la fecha 17/03/2007 de path- row 227-084 identificada por lagunas.



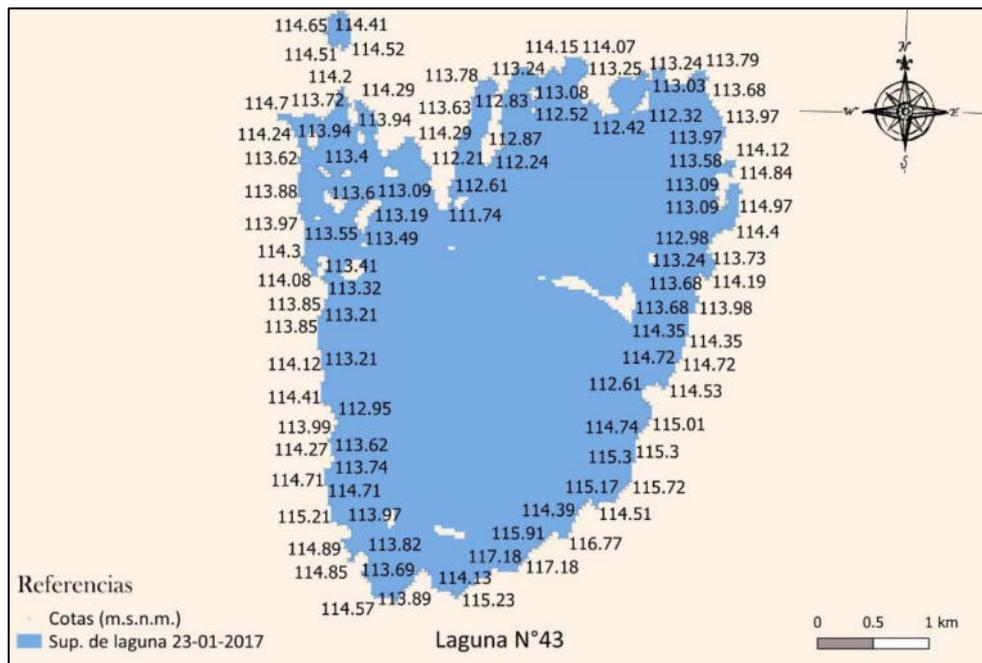
**Figura 15:** Máscara de agua identificada por laguna.

Una vez realizada la identificación por lagunas en cada máscara, es realizada la extracción de los vértices que integran el perímetro de cada laguna en cada una de las máscaras, representados mediante una capa punto. Posteriormente estos puntos interceptan al DEM con la finalidad de extraer los valores altimétricos del perímetro de cada laguna para cada máscara. Lo que se logra con esta metodología es obtener la cota del pelo de agua de cada una de las lagunas en las distintas fechas. En las Figuras 16 y 17, se ilustra dicha explicación.

Debido a que, como se observa en las Figuras 16 y 17, los valores altimétricos no son idénticos en todo el perímetro, y puesto que no hay mediciones in situ del área de expansión de las lagunas de estudio, es realizado un método simple de resolución y validación de la veracidad de la información altimétrica del perímetro de las lagunas para las diferentes fechas. Dicho método radica en analizar la consistencia de los valores altimétricos de los vértices del perímetro (muestra) conforme un análisis estadístico de los datos, tomando como válidos o descartando la información conforme los resultados arrojados.



**Figura 16:** Valores altimétricos de los vértices de la superficie de la laguna N°43 para la fecha: 28 de marzo de 2011.



**Figura 17:** Valores altimétricos de los vértices de la superficie de la laguna N°43 para la fecha: 23 de enero de 2017.

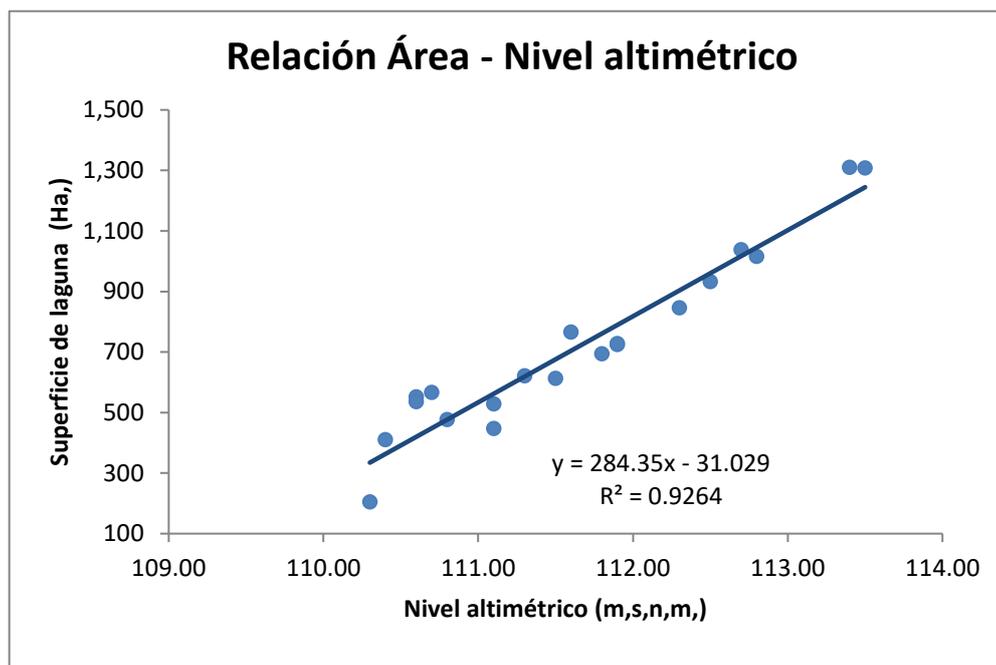
En Tabla 5 se muestra, a modo de ejemplo, el análisis estadístico de los valores altimétricos de borde de la laguna N°43 para las diferentes fechas analizadas.

**Tabla 5:** Análisis estadístico valores altimétricos de borde de laguna N°43

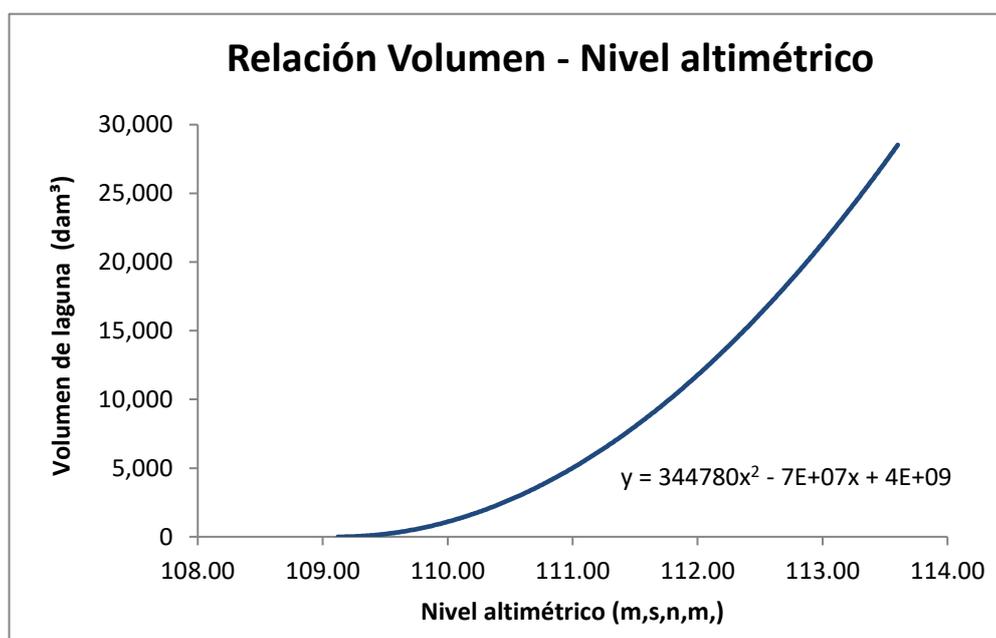
N°	Fecha	Cota Mín.	1° Cuartil	Mediana	Media	3° Cuartil	Cota Máx.	Desvío Est.	Varianza	N° Muestra	Área
43	28/02/01	110.0	111.4	112.10	112.30	113.2	116.0	1.08	1.16	765	845.6
43	8/9/01	109.6	111.8	112.80	112.70	113.6	116.7	1.27	1.61	948	1,037.5
43	6/3/09	109.5	109.5	109.80	110.30	110.6	114.0	1.15	1.31	603	204.2
43	28/03/11	109.6	110.2	110.70	111.10	111.4	114.10	1.23	1.52	555	447.1
43	30/06/93	109.6	110.5	111.00	111.50	112.6	114.1	1.33	1.78	720	613.0
43	8/05/91	109.6	110.1	110.70	110.70	111.2	113.3	0.75	0.56	1,393	566.2
43	17/03/07	109.7	111.0	111.60	111.90	112.7	116.0	1.23	1.52	655	724.5
43	8/10/06	109.5	109.9	110.40	110.60	110.9	114.0	0.94	0.88	1,645	551.6
43	04/01/04	110.0	111.9	112.80	112.80	113.6	116.4	1.15	1.33	903	1,015.8
43	27/06/92	109.6	110.1	110.50	110.80	111.1	114.1	1.10	1.22	1,153	476.3
43	15/04/06	109.7	111.0	111.60	111.80	112.6	115.9	1.22	1.50	682	693.4
43	29/08/09	109.8	110.8	111.50	111.60	112.3	115.0	1.06	1.13	864	765.8
43	25/06/97	109.5	110.0	110.30	110.40	110.7	112.8	0.57	0.32	874	410.0
43	22/12/10	109.6	110.4	110.90	111.10	111.6	114.0	1.05	1.10	535	528.1
43	19/07/00	109.5	109.6	110.20	110.60	111.1	115.3	1.18	1.40	3,899	535.1
43	16/02/08	109.6	110.6	111.00	111.30	111.8	114.4	1.04	1.08	625	620.6
43	11/3/05	109.7	111.7	112.60	112.50	113.4	116.0	1.11	1.23	957	932.6
43	5/9/00	109.7	111.0	111.7	111.9	112.8	115.3	1.21	1.47	737	727.7
43	23/01/17	110.1	113.0	113.6	113.5	114.2	117.2	1.24	1.54	906	1,308.1
43	12/3/17	110.0	113.0	113.6	113.4	114.2	117.2	1.22	1.49	923	1,309.5

Posterior a ello, con los valores altimétricos de bordes validados y aceptados de las distintas fechas, se efectúa la relación valor altimétrico – área de cada laguna con el objeto de analizar la coherencia entre los pares de valores, y obtener la ecuación de ajuste.

En las Figuras 18 y 19, se pueden apreciar las relaciones nivel altimétrico-área y nivel altimétrico- volumen para la laguna N°43.



**Figura 18:** Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°43.



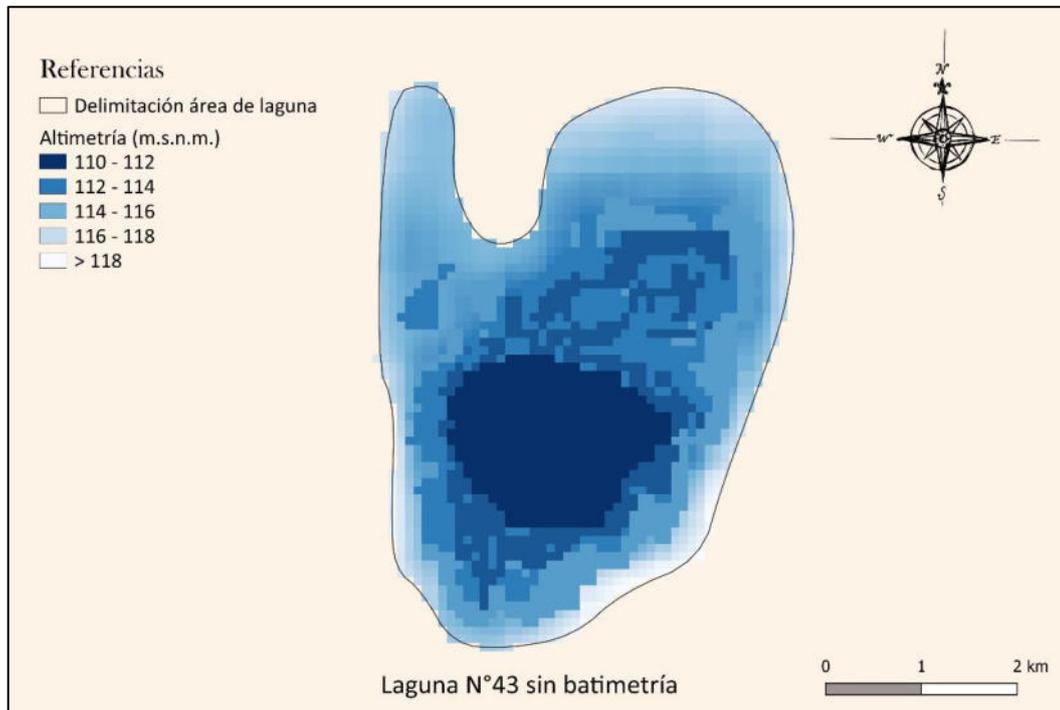
**Figura 19:** Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°43.

Cabe destacar que, en el Anexo B, se presentan las gráficas de relación nivel altimétrico-área y nivel altimétrico- volumen, para cada una de las lagunas estudiadas.

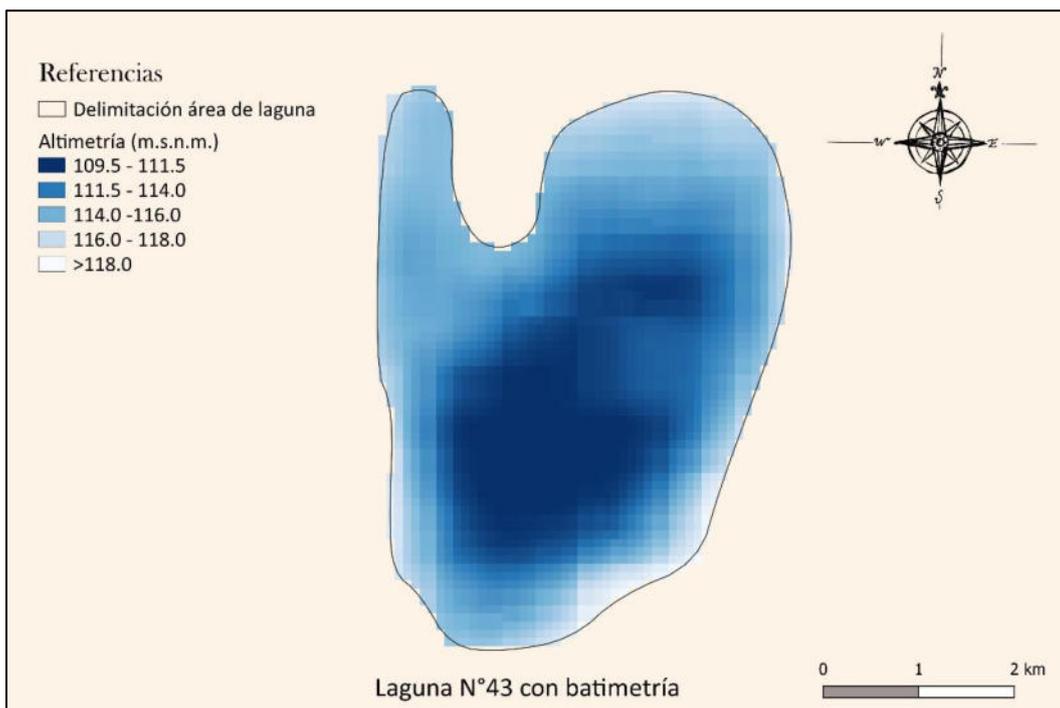
Retomando con la metodología, con todas las batimetrías analizadas, se procede a realizar la aplicación de las mismas al DEM corregido. Para ello, se confeccionan máscaras (con

diferentes rangos de batimetría, dependiendo de la laguna) con la forma y el área estudiados, y mediante intercepción se asignan dichos valores batimétricos al DEM.

En las Figuras 20 y 21, se presenta el DEM sin batimetrías y el DEM final con las batimetrías insertas.



**Figura 20:** DEM corregido sin batimetría en la zona de la laguna N°43.



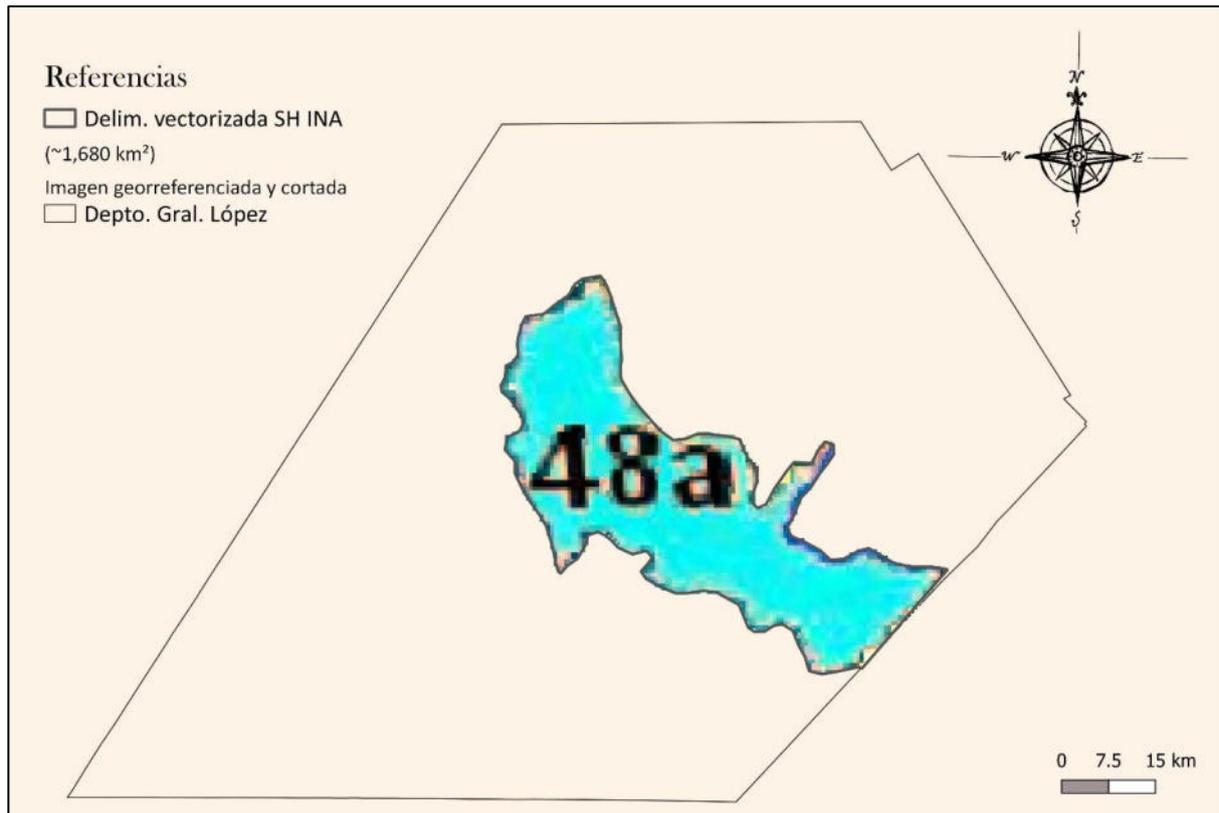
**Figura 21:** DEM corregido con batimetría en la zona de la laguna N°43.

#### **4.1.1.1.3 Delimitación marginal del SH de estudio**

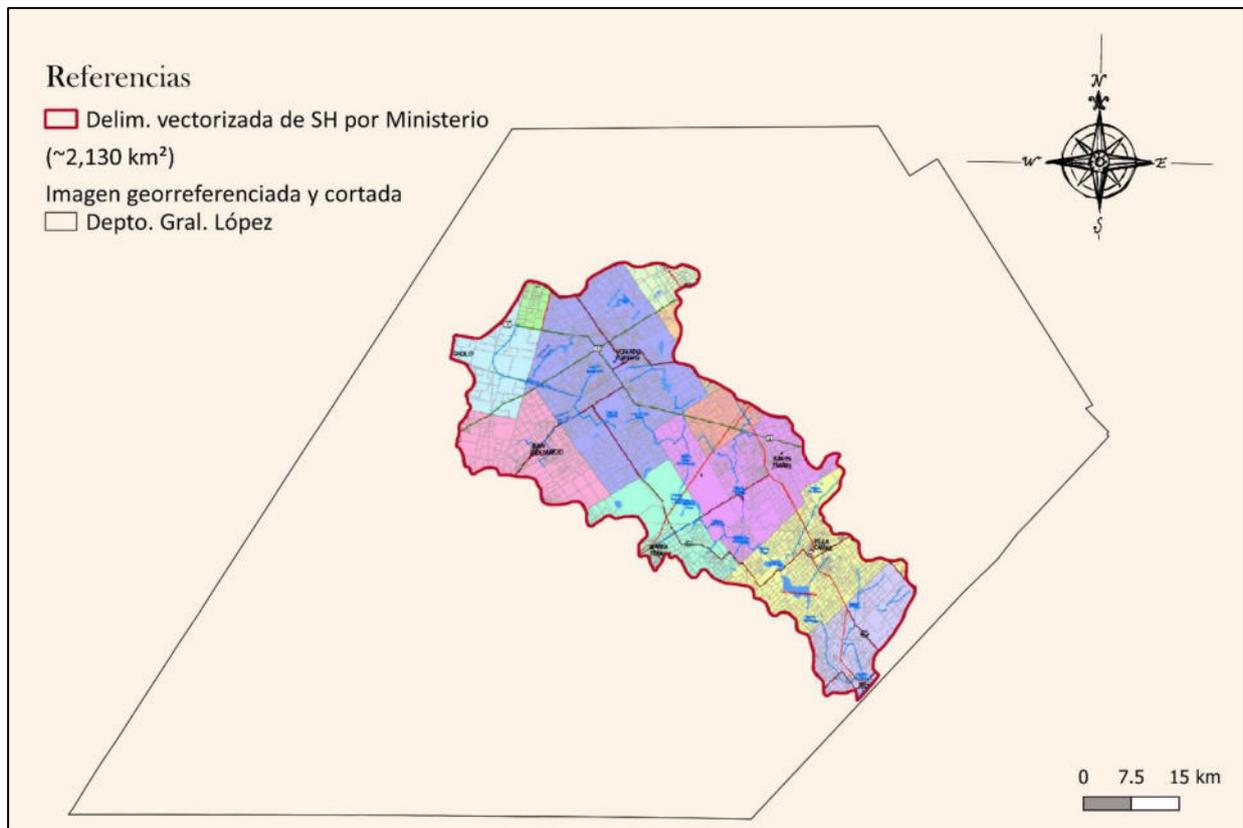
Para realizar la delimitación del sistema de estudio son utilizadas las siguientes herramientas y materiales:

- Mapa de delimitación del SH del Instituto Nacional del Agua -INA: Dicha delimitación se presenta en formato pdf y es extraída del trabajo realizado por (Giraut et al., 2008).
- Mapa de delimitación del SH del Ministerio de Infraestructura y Transporte, Secretaría de Recursos Hídricos, Subsecretaría Operativa, Dirección Provincial de Coordinación de Comité de Cuencas, Dirección General de Comité de Cuencas y Talleres. Dicho material también se presenta en formato pdf.
- Capa delimitación de SH Las Encadenadas (Soria, 2019).
- QSWAT+, complemento, el cual es una herramienta de evaluación de suelo y agua para el manejo de cuencas; la interface para QGIS es QSWAT+ siendo la última versión QSWAT+ 1.2.0 la cual fue lanzada el 5 de Julio de 2019 (SWAT Soil y Water Assessment Tool, 2019). Este complemento requiere para su implementación, de una diversidad de información como ser: datos espaciales de suelo, relieve, uso de suelo, cobertura de suelo, datos de elevación y climatológicos; creando así un nuevo archivo con la estructura y organización dada por SWAT+, que originalmente viene con la base de datos para Estados Unidos (Gidahatari, 2016).
- DEM: Es manipulado el DEM calibrado y modificado conforme el estudio de batimetrías como material de ingreso al software.

En cuanto a la metodología, inicialmente al disponer de dos delimitaciones del SH que se encontraban en formato pdf, fue empleado el software QGIS para realizar la georreferenciación de las mismas y posteriormente el trazado en formato vectorial. En las Figuras 22 y 23, pueden observarse dichas delimitaciones ubicadas en el espacio y vectorizadas.

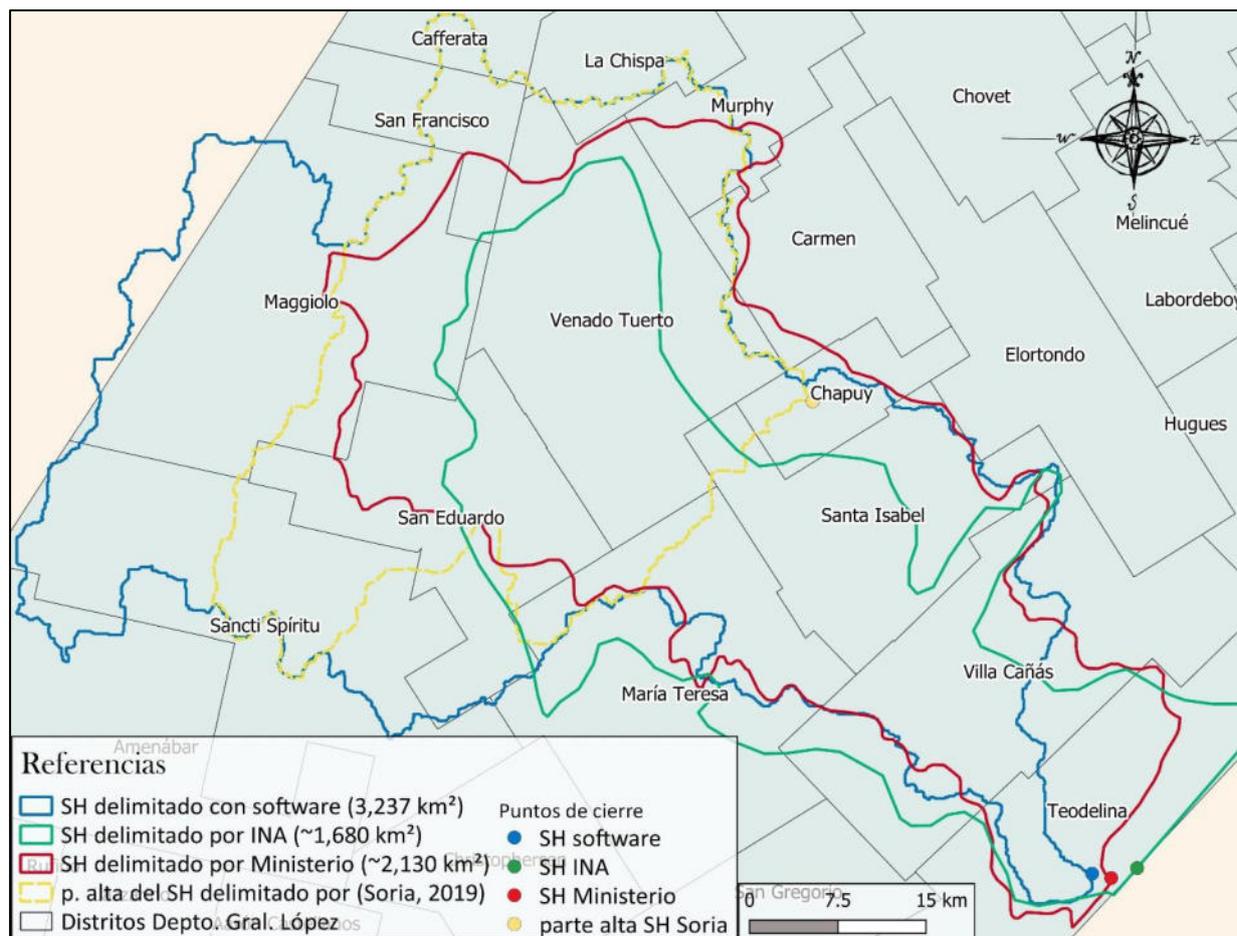


**Figura 22:** Vectorización de delimitación de SH Las Encadenadas generada por el INA. (Geraldí, Piccolo, & Perillo, 2010)



**Figura 23:** Georreferenciación y vectorización de delimitación de SH Las Encadenadas generada por el Ministerio de Infraestructura y Transporte (S.F.)





**Figura 25:** Comparativa de delimitaciones para el SH de estudio.

#### 4.1.1.1.4 Discretización del DEM corregido

El software de simulaciones hidrológico-hidráulicas necesita como información de ingreso valores altimétricos puntuales representativos del SH, los cuales deben estar equidistantes en sus dos direcciones del plano.

Puesto que hasta el momento se venía trabajando con el DEM, el cual es en formato ráster, se debió realizar la discretización de dicha información conforme los lineamientos del software de simulaciones.

Para ello, se realizó en el software de SIG, la confección de una capa punto, a la cual le fue generada un mallado regular de 100 m de distancia entre puntos, condicionada a que la misma tome las dimensiones del ráster y que inicie la inserción de los puntos a un corrimiento de 50m desde el vértice superior, con el fin de que los puntos sean coincidentes con el baricentro de los píxeles del ráster.

Una vez logrado el mallado de puntos, mediante una herramienta de intersección, fueron extraídos los valores altimétricos del DEM, por la capa vectorial de puntos. Con esta

discretización, sumado a la identificación de coordenadas de cada uno de los puntos, fueron exportados a un archivo de texto simple (.csv) para la lectura del el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado.

#### **4.1.1.1.5 Determinación de rangos numéricos componentes de las subcuencas**

El modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0 (Ver Anexo A), permite la caracterización mediante categorías de distintos sectores de la cuenca, tanto para diferenciar características del suelo y cobertura, como para distinguir el impacto de los eventos climáticos en distintas áreas. Para esta Tesis, las categorías fueron adoptadas como representación de las distintas subcuencas presentes en el SH.

Debido a que la numeración de los elementos de la discretización del SH están dados conforme su aparición en el plano, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo; y que, las subcuencas presentan formas irregulares conforme su naturaleza hidrológica, hubo que realizar un reconocimiento de los valores identificatorios de elementos presentes en cada una de las subcuencas y agruparlos en rangos conforme su correlatividad.

Para realizar esta labor fueron usados los softwares Microsoft Excel y Notepad++, puesto que debieron emplearse diversas sentencias condicionantes y herramientas para manipulación masiva de datos. Debido a la limitante sobre la cantidad de caracteres presentes en cada categoría, debió ser empleada más de una subdivisión de categorías para cada subcuenca. Lograda la discretización, fueron obtenidas 67 categorías en representación de las 21 subcuencas, a las cuales como se mencionó al principio, le serán otorgadas características distintivas de suelo y cobertura del mismo, como así también diferentes valores de precipitación.

#### **4.1.1.2 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA**

La preparación de la información hidrológica se divide en cuatro grandes bloques, a saber: Unidades de respuesta hidrológica (Apartado 4.1.1.2.1), Información climatológica (Apartado 4.1.1.2.2), Obtención de variables del ciclo hidrológico (Apartado 4.1.1.2.3) y Estimación de Números de Curva CN (Apartado 4.1.1.2.4).

En el Apartado 4.1.1.2.1, son obtenidas las divisiones en subcuencas, resultado de la tipología de suelos presentes en el área de estudio, el uso que se le da al mismo y la altimetría del terreno.

En el Apartado 4.1.1.2.2, se ubica geográficamente y se prepara la información climatológica, la cual se presenta, a excepción de la información pluviométrica, de carácter mensual, debiendo ser transformada a diaria para poder efectuar la simulación hidrológica. En cuanto a la información pluviométrica, la misma es recabada de la estación meteorológica ubicada en Venado Tuerto, perteneciente al SMN, y de una Estación particular de la localidad de Villa Cañas, siendo ambas ciudades pertenecientes al área de estudio.

En el Apartado 4.1.1.2.3, son obtenidos mediante simulación hidrológica los valores de cada una de las variables del ciclo hidrológico para el período de análisis.

Para finalizar, en el Apartado 4.1.1.2.4, son estimados los valores de Número de Curva en condición media para cada uno de los meses, en cada una de las subcuencas.

#### **4.1.1.2.1 Creación de unidades de respuesta hidrológica (HRU)**

Las unidades de respuesta hidrológica, de ahora en adelante HRU's, son divisiones en las subcuencas las cuales tienen una combinación particular de suelo, uso del suelo y pendiente. Estas unidades se generan para definir mejor a la subcuenca y lograr diversificar zonas diferentes dentro de la misma. Cabe aclarar que, las HRU y posteriormente las subcuencas son identificadas meramente a los efectos de diferenciar los distintos tipos de suelos, usos y pendientes; no así para la modelación del escurrimiento superficial, ya que el modelo implementado en esta Tesis no necesita que se delimiten HRU's o subcuencas para representar la dinámica del escurrimiento.

Aclarado esto, para la creación de las HRU's, son utilizados los siguientes materiales y herramientas:

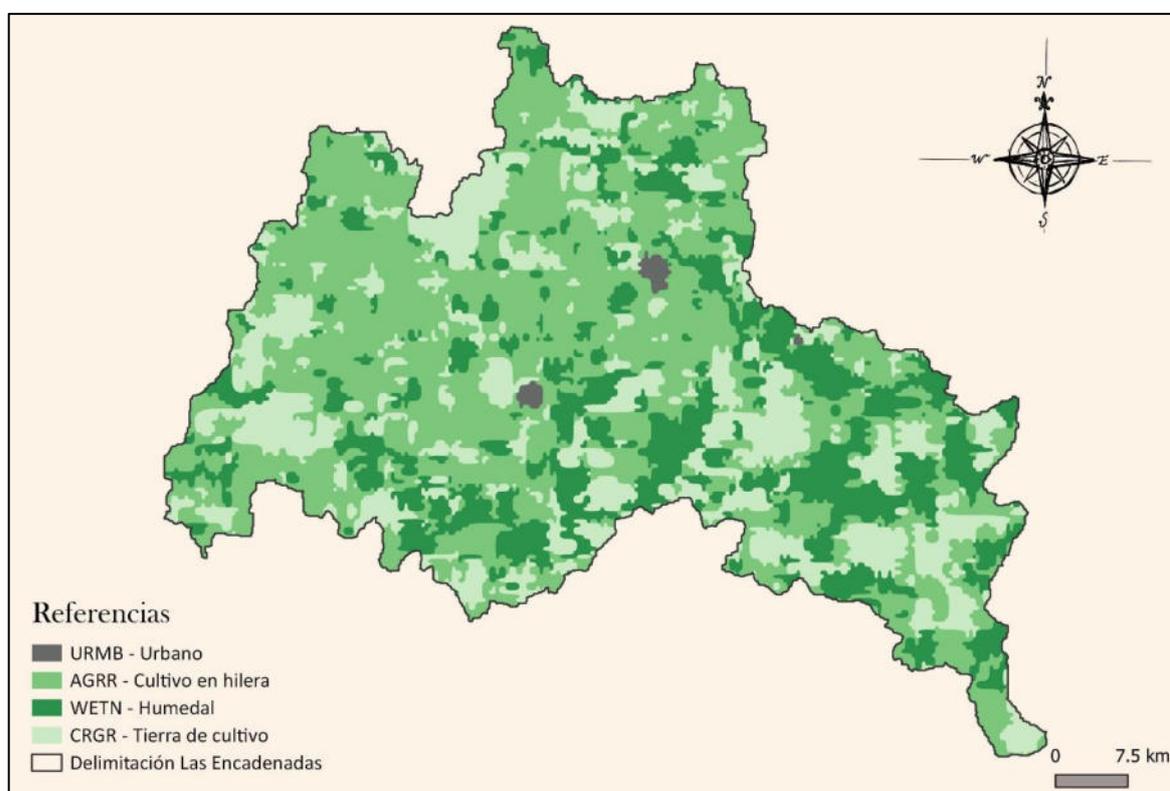
- Mapa de usos del suelo: El mapa de usos del suelo utilizado es Land Cover de MODIS (Friedl et al., 2010). El mismo fue descargado de la página <https://search.earthdata.nasa.gov/search>, mediante la selección del área de interés. El producto específico utilizado de MODIS fue "Tipo de cubierta terrestre anual L3 global" el cual brinda una resolución espacial de 500 m.
- Mapa de tipología de suelos: El mapa de tipología de suelos elegido para el área de estudio es el confeccionado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (Espindola et al., 2014). El mismo contiene una base de datos completa con información georreferenciada de calidad a nivel país para su aplicación en el modelo SWAT+.
- Software QSWAT: Ya fue descrito con anterioridad.

En lo que respecta a la metodología empleada para el mapa de usos de suelo, para un mejor manejo de la información, dicho mapa de formato ráster es recortado a un área aproximada de interés, re proyectado al sistema de coordenadas del proyecto (EPSG: 32,720) y resampleado a píxeles de 100 m por 100 m.

Para realizar el vínculo entre el mapa de usos del suelo y la base de datos del software, resulta necesario modificar la codificación de usos del suelo situada en la base de datos del proyecto, puesto que para realizar la simulación se utilizaron las tablas de búsqueda de los mapas (global\_soils y global\_landuses) las cuales se encuentran preparadas y almacenadas en la base de datos del software QSWAT+.

Para finalizar la creación de los HRU's, desde el aspecto de usos del suelo, es establecido que en cada subcuenca exista una única tipología de uso del suelo, la cual sea de área predominante en la misma.

En la Figura 26, se presentan los usos del suelo modificados, a utilizar en la simulación hidrológica.

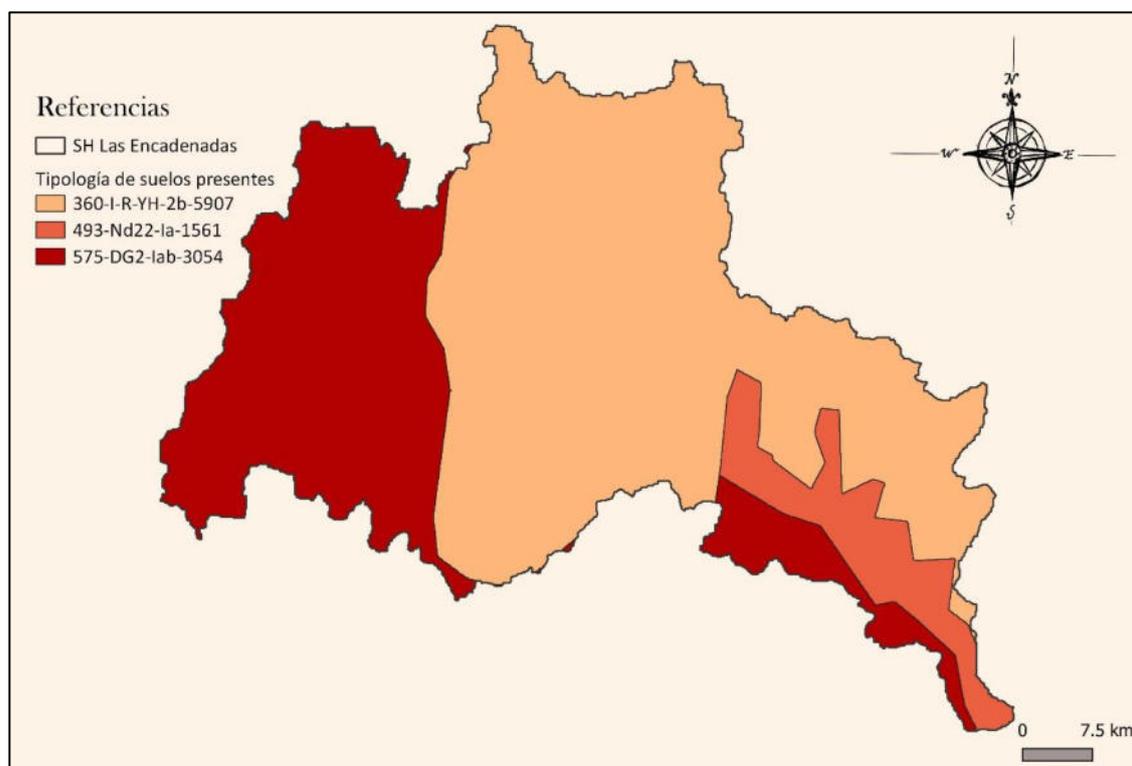


**Figura 26:** Mapa de usos del suelo para el área de estudio.

Con respecto a la tipología de suelos, como fue mencionado al principio de este Apartado, es utilizado el mapa desarrollado por el INTA.

Para que el mismo pueda ser utilizado mediante el software es transformado a formato ráster y, al igual que el mapa de usos del suelo, son realizadas reconversiones de escala de pixel (también a 100 m x 100 m) y reproyección de coordenadas.

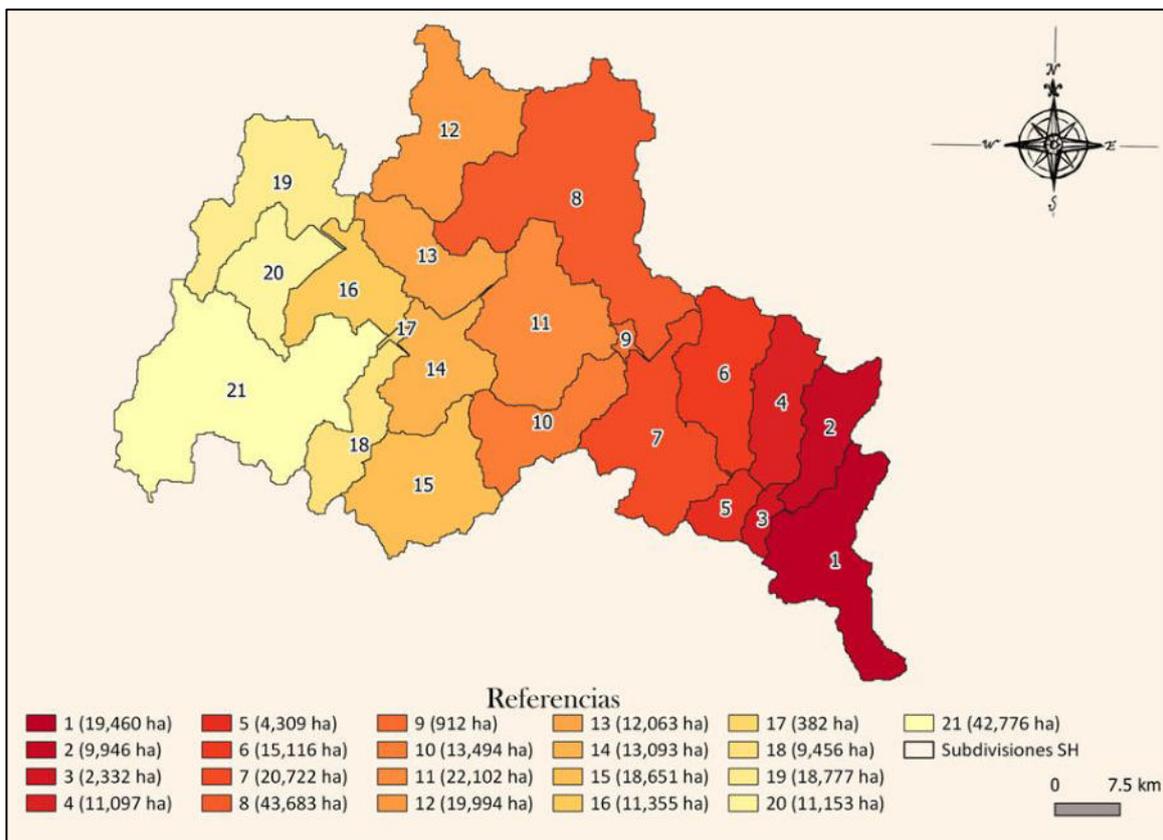
Además, debido a que la nomenclatura de suelos del INTA no coincide con las nomenclaturas de suelos alistadas en la base de datos del programa (FAO\_soils, Global\_soils, etc.), deben ser renombradas las categorías del INTA. Al ser muchas las variables que definen a un suelo (30 en este caso), y puesto que no son infinitas las tipologías de suelo de la base de datos, se establece el renombramiento de suelos conforme a la aproximación de las siguientes variables: grupo hidrológico del suelo (HYDGRP), porcentaje de contenido de arcilla en peso (CLAY), porcentaje de contenido de limo en peso (SILT) y porcentaje de contenido de arena en peso (SAND), siendo las mismas las primordiales para esta Tesis. En Figura 27, se presentan los tipos de suelos modificados, a utilizar en la simulación hidrológica.



**Figura 27:** Mapa de tipos de suelos para el área de estudio.

Cabe destacar que la descripción de cada una de las tipologías presentes en el área de estudio se encuentra en el Anexo C.

Luego de caracterizada el área de estudio conforme estos dos aspectos, y con el aporte del DEM, son confeccionadas las subcuencas, las cuales poseen características distintivas propias, como fue mencionado anteriormente. En la Figura 28 se aprecia el área de estudio demarcada en subcuencas y en la Tabla 6 las características de cada subcuenca.



**Figura 28:** Subcuencas del SH de estudio.

**Tabla 6:** Características de la composición de la subcuenca.

Subcuenca N°	Área (ha)	USOS DEL SUELO (%)				TIPOS DE SUELO (%)		
		URMD	AGRR	WETN	CRGR	I-R-Yh-2b-5907	Nd22-1a-1561	Dg2-1ab-3054
1	19,460	0.00	42.84	30.28	26.88	28.46	21.14	50.40
2	9,946	0.00	22.82	34.30	42.88	91.17	0.00	8.83
3	2,332	0.00	22.67	38.28	39.05	0.00	30.09	69.91
4	11,097	0.00	27.17	42.08	30.75	87.90	0.00	12.10
5	4,309	0.00	13.83	36.77	49.40	0.00	67.75	32.25
6	15,116	0.00	37.86	42.78	19.36	82.13	0.00	17.87
7	20,722	0.00	24.68	30.03	45.29	36.32	34.66	29.02
8	43,683	0.73	53.27	24.40	21.60	99.65	0.00	0.35
9	912	1.43	10.86	24.67	63.04	99.34	0.00	0.66
10	13,494	0.26	13.37	42.31	44.06	100.00	0.00	0.00
11	22,102	2.67	53.87	25.37	18.09	100.00	0.00	0.00
12	19,994	0.00	64.90	6.80	28.30	96.50	0.00	3.50

Continuación de **Tabla 6**: Características de la composición de la subcuenca.

Subcuenca N°	Área (ha)	USOS DEL SUELO (%)				TIPOS DE SUELO (%)		
		URMD	AGRR	WETN	CRGR	I-R-Yh-2b-5907	Nd22-1a-1561	Dg2-1ab-3054
13	12,603	0.00	62.46	10.37	27.17	91.07	8.93	0.00
14	13,093	4.73	55.18	19.87	20.22	99.83	0.17	0.00
15	18,651	0.00	40.21	35.09	24.70	88.20	0.00	11.80
16	11,355	0.00	69.88	12.44	17.68	32.41	67.59	0.00
17	382	0.00	71.99	0.00	28.01	94.50	5.50	0.00
18	9,456	0.00	46.57	27.42	26.01	15.52	84.48	0.00
19	18,777	0.00	70.74	10.11	19.15	0.00	100.00	0.00
20	11,153	0.00	75.27	5.66	19.07	0.00	100.00	0.00
21	42,776	0.60	48.24	18.67	32.49	0.21	99.79	0.00

#### **4.1.1.2 Información climatológica**

La información climatológica tratada en este Apartado es desarrollada, en principio, para la obtención de los valores de las variables del ciclo hidrológico presentes en el SH de estudio, lo cual sirve a posteriori para la simulación hidrológica-hidráulica del SH frente a diversos eventos, en el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado.

La información de análisis es dividida en dos grandes bloques, a saber: información pluviométrica e información climatológica restante (temperatura, humedad, etc).

Los materiales y herramientas implementados para el análisis climatológico son los siguientes:

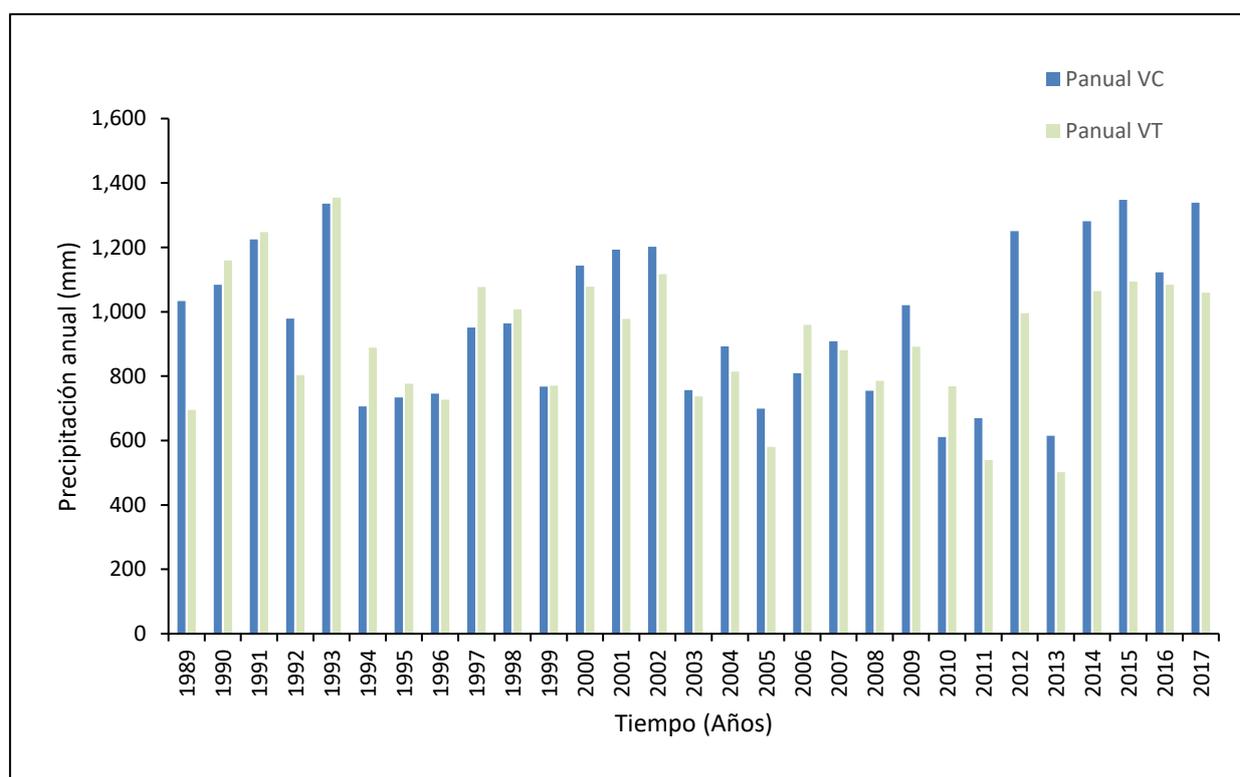
- Registro pluviométrico de la Ciudad de Venado Tuerto: El mismo pertenece a la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ubicada en el aeródromo Tomás B. Kenny de la Ciudad de Venado Tuerto. Dicho registro es de carácter diario y abarca un período de 29 años (desde 1989 hasta 2017 inclusive).
- Registro pluviométrico de la Ciudad de Villa Cañas: Dicho registro pertenece a la Estación particular de Rubén Ferrario. El mismo comprende un período de información equivalente al de la estación de Venado Tuerto y también es de carácter diaria la lectura.
- Información climatológica restante: Esta información es integrada por temperaturas máximas mensuales (°C), temperaturas mínimas mensuales (°C), humedad relativa mensual (%), velocidad diaria promedio del viento en el mes (m/s) y radiación solar diaria por mes (MJ/m<sup>2</sup>/día).

La misma fue extraída en gran parte del libro “Meteorología Regional: El clima en la Pampa Húmeda” (Martín, 2014) de Ricardo Martín. Este libro posee gran parte de la información detallada arriba para la Ciudad de Venado Tuerto. La información faltante, radiación solar, fue extraída del “Atlas de energía solar de la República Argentina” (Grossi et al., 2007).

- Software Microsoft Excel: Para el tratamiento estadístico de la información.
- Información pluviométrica

Debido a que la información pluviométrica de la localidad de Villa Cañas es proveniente de una estación particular, no adquiriendo rigor de información oficial, debe efectuarse un análisis de consistencia (Basile, 2008).

Previo al análisis mencionado, es realizada una inspección visual de los datos, a través de la Figura 29. Como puede observarse, las precipitaciones anuales presentan un patrón de comportamiento similar en ambas estaciones.

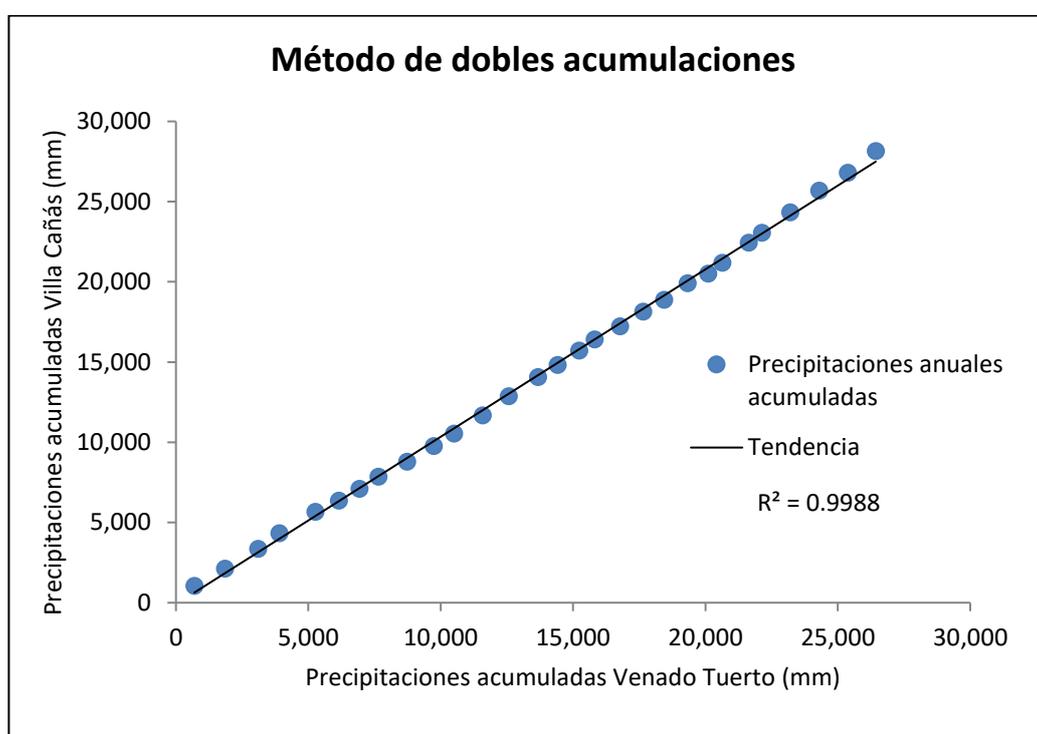


**Figura 29:** Precipitaciones anuales de Villa Cañas (VC) y Venado Tuerto (VT).

En cuanto a la consistencia de los datos, es utilizado el método de dobles acumulaciones, el cual consiste en comparar para un determinado período de tiempo mediante un par de ejes coordinados los valores acumulados de precipitaciones de una estación de confianza (eje X)

contra los valores de precipitaciones acumuladas de la estación de estudio (eje Y). En este caso, la estación de confianza es VT y la estación de estudio es VC. Cabe destacar que resulta apropiado utilizar a la estación VT, como estación de referencia, puesto que ambas pertenecen a una misma región pluviométrica (Zucarelli et al., 2019).

A continuación, en la Figura 30, se presenta el gráfico de contraste de ambas estaciones, manifestando una marcada proporcionalidad entre ambas, no observándose ningún tipo de quiebre significativo y con un valor de  $R^2=0.9988$ , lo cual se traduce en una efectiva consistencia de los datos de la estación VC.



**Figura 30:** Dobles acumulaciones para las estaciones VT y VC.

- Información climatológica restante

Dicha información, presentada en gran parte como histórica mensual, es transformada y codificada conforme los requisitos de lectura del software QSWAT+, utilizado en el Apartado 4.1.1.2.3.

Las variables a transformar son:

- Registro de temperaturas: Fueron transformados a temperaturas máximas medias diarias para cada mes (tmp\_max\_ave, °C), mínimas medias diarias para cada mes (tmp\_min\_ave, °C), desviación estándar de la temperatura máxima

diaria en el mes (tmp\_max\_sd, °C), desviación estándar de la temperatura mínima diaria en el mes (tmp\_min\_sd, °C),

- Radiación solar: Se utilizaron los valores medios mensuales tal como fueron adquiridos en el material detallado al inicio de este Apartado, previa reconversión de unidades. (slr\_ave, MJ/m<sup>2</sup>/día)
- Humedad relativa: Se transformaron a valores medios mensuales de humedad relativa (dew\_ave, fracción).
- Viento: Se utilizaron los valores medios mensuales (wnd\_ave, m/s) presentes en el libro de Ricardo Martín.

En la Tabla 7, pueden observarse los valores para cada mes de las variables explicitadas.

**Tabla 7:** Variables climáticas mensuales para simulación hidrológica.

mes	tmp_max_ave	tmp_min_ave	tmp_max_sd	tmp_min_sd	slr_ave	dew_ave	wnd_ave
1	30.70	17.70	1.61	1.17	23.38	0.501	3.22
2	29.00	15.80	1.68	1.23	21.58	0.561	3.22
3	26.80	13.90	1.60	1.41	17.99	0.658	3.25
4	22.70	10.20	1.49	1.25	12.59	0.742	3.30
5	18.90	7.21	1.62	1.48	8.99	0.581	3.20
6	15.10	4.27	1.41	1.53	7.19	0.556	3.34
7	15.10	3.49	1.64	1.72	7.19	0.466	3.61
8	17.60	4.42	1.71	1.28	10.79	0.448	4.00
9	20.30	6.67	1.44	1.13	14.39	0.417	4.11
10	23.40	10.10	1.70	1.13	17.99	0.596	4.03
11	27.00	12.90	1.61	1.35	21.58	0.473	4.17
12	29.80	15.40	4.15	1.35	23.38	0.360	3.81

Resulta conveniente mencionar que las temperaturas y la radiación solar son ajustadas al simular condiciones secas y lluviosas, con el objeto de que los valores generados a largo plazo, al promediarse, concuerden con los ingresados de entrada. Lo mismo ocurre con la humedad relativa, con el fin de justificar efectos de día húmedo y seco (Uribe, 2010).

#### **4.1.1.2.3 Obtención de variables del ciclo hidrológico**

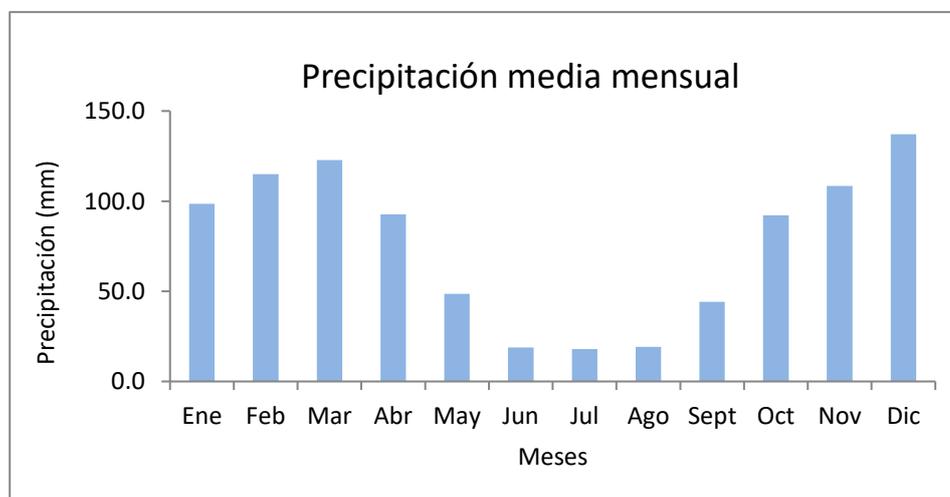
Con la información acondicionada en los Apartados anteriores, DEM, HRU's e información climatológica, es realizada la obtención de los valores promedio mensuales de las variables del ciclo hidrológico presentes en el SH de estudio.

El software empleado para la obtención de los valores promedio de las variables es QSWAT+, el cual ya fue descrito en secciones anteriores. QSWAT+ simula al ciclo hidrológico basándose en la ecuación de equilibrio del agua, la cual ya fue presentada en el apartado 2.1.3. Para la infiltración, considera que la tasa inicial depende del contenido de agua en la superficie terrestre y la final a la conductividad hidráulica saturada de la tierra. Para determinar la humedad del suelo, utiliza una técnica que predice el flujo por cada capa de tierra en la zona principal; ocurriendo la filtración cuando se excede la capacidad de espacio de una capa de tierra y no se presenta saturada la siguiente inferior. Para la evapotranspiración, computa por separado la evaporación de plantas y suelos, utilizando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua para evaporación de agua en el suelo; y simulando como una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área de hoja a la transpiración de la planta. Para la evapotranspiración potencial, presenta tres métodos opcionales para la estimación; Hargreaves, Priestley-Taylor y Penman-Monteith (empleando este último para el cálculo). En cuanto a la simulación de la escorrentía, utiliza una modificación del método de Número Curva del SCS (Uribe, 2010).

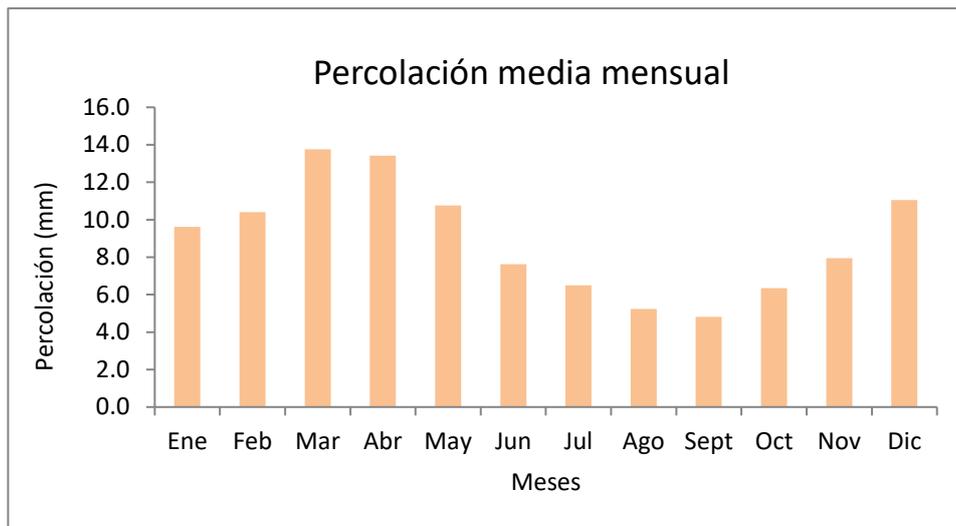
En cuanto a la calibración del balance, fue considerado el primer año de datos (1989) de simulación como calibración.

La obtención de las variables del ciclo hidrológico, no sólo son importantes para la caracterización del SH, sino que también son fuentes de ingreso a las simulaciones hidrológicas-hidráulicas de eventos puntuales realizadas más adelante.

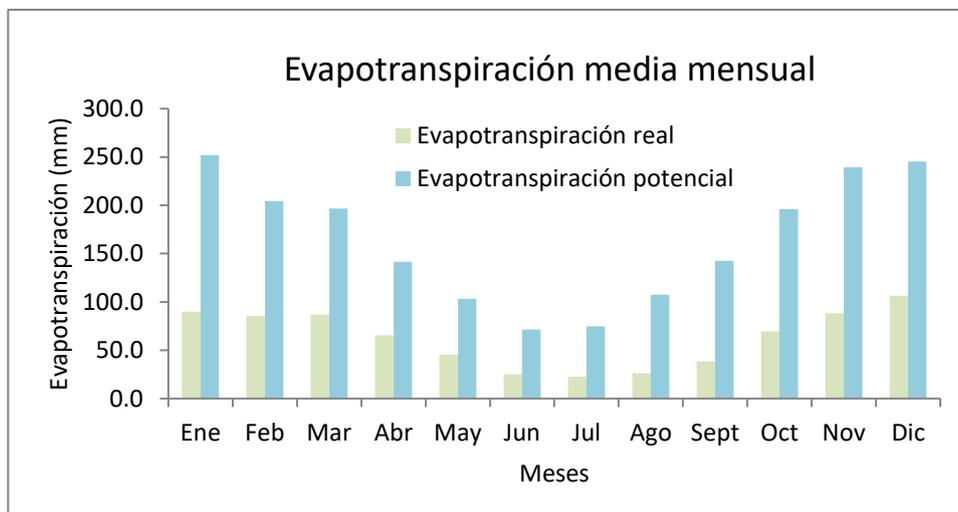
En las Figuras 31 a 35, se presentan los valores promedio mensuales para cada una de las variables del ciclo hidrológico presentes en el SH de estudio.



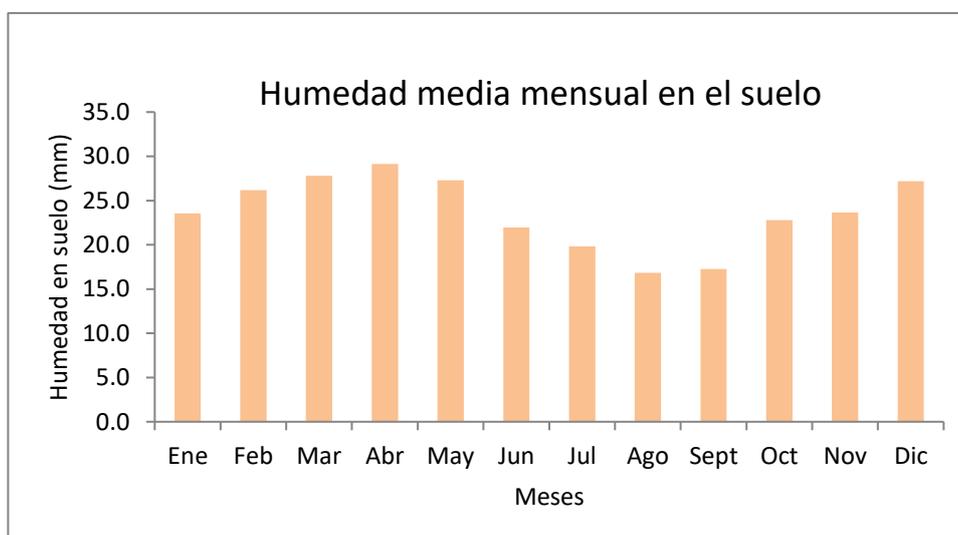
**Figura 31:** Precipitación media mensual en SH Las Encadenadas, serie 1989-2017.



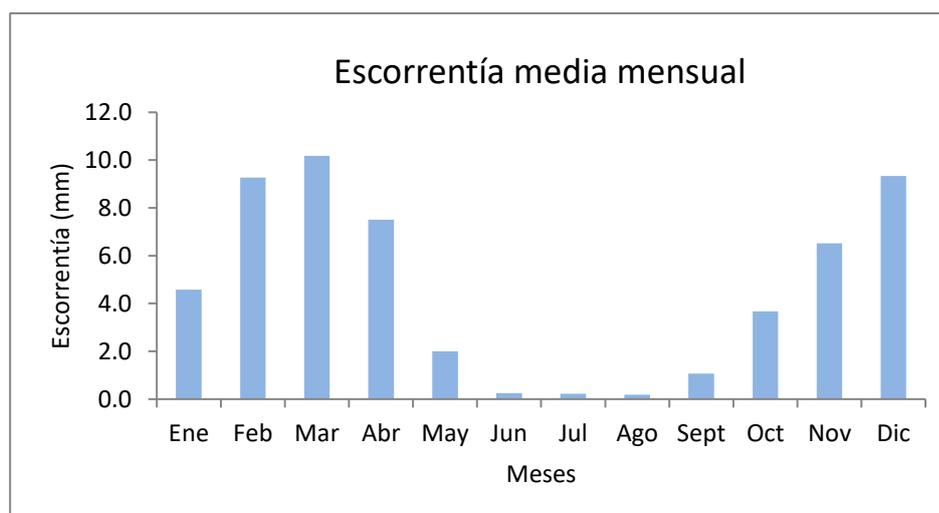
**Figura 32:** Percolación media mensual en SH Las Encadenadas.



**Figura 33:** Evapotranspiración media mensual real y potencial en SH Las Encadenadas.



**Figura 34:** Humedad media mensual del suelo en SH Las Encadenadas.



**Figura 35:** Escorrentía media mensual en SH Las Encadenadas.

#### **4.1.1.2.4 Estimación de Números de Curva CN**

En este apartado son estimados los valores de Número de Curva, de ahora en adelante CN, con el objeto de definir el complejo suelo-vegetación y una aproximación de la humedad antecedente del suelo. Esta información es requerida para determinar los hietogramas netos, los cuales alimentan al modelo. Para la estimación de los valores de Números de Curva de cada una de las subcuencas que componen el SH de estudio es utilizada información del tipo hidrológico de suelo, del uso de la tierra y tratamiento, y condición previa de humedad; la cual fue generada en los Apartados 4.1.1.2.1, 4.1.1.2.2 y 4.1.1.2.3. Dicha información, ingresada en el simulador hidrológico, arroja como resultado el valor de CN en cada una de las HRU'S que componen el sistema, para cada uno de los meses que integran el registro histórico de información (de 1989 a 2017 en este caso).

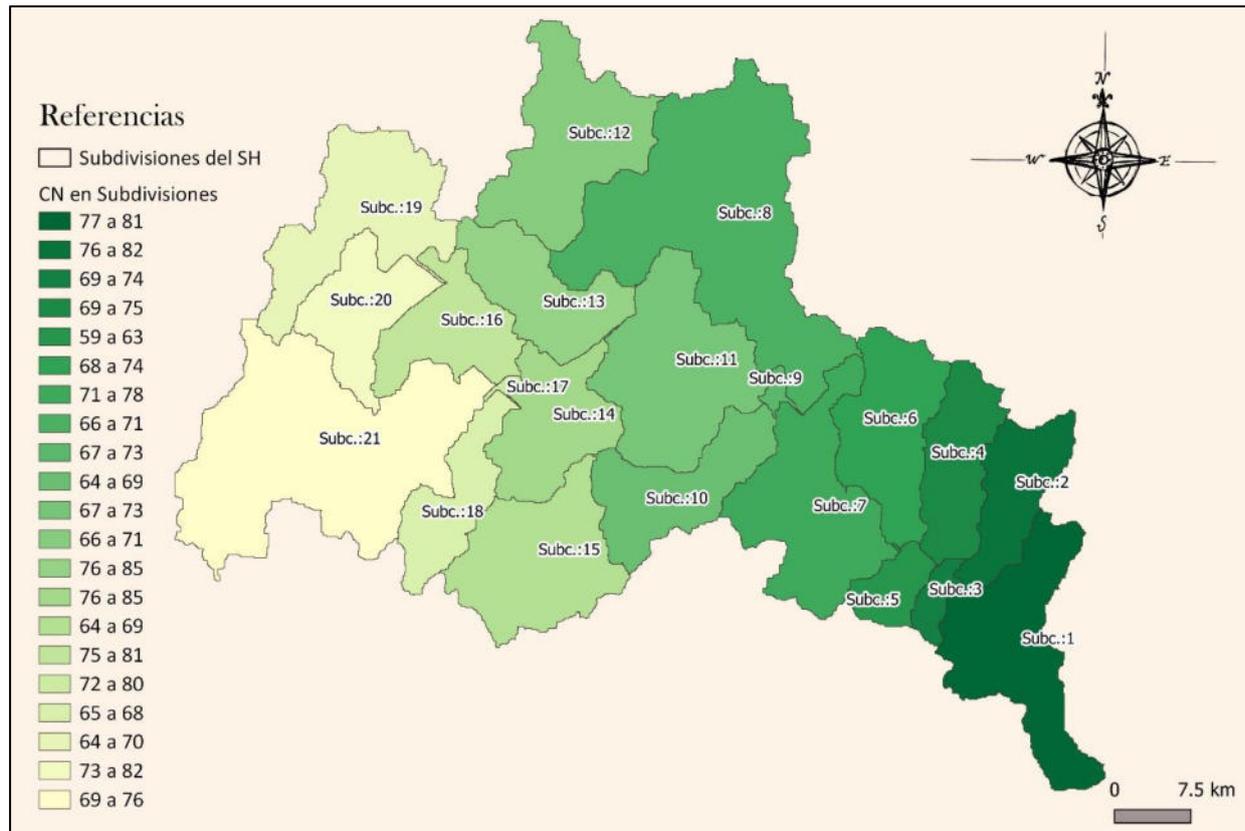
Obtenida dicha información, fue realizado el promedio mensual de CN para cada una de las de las HRU's presentes, los cuales fueron verificados con los valores brindados en la Tabla D.1 de Tipos de complejos hidrológicos y números de escurrimiento respectivos para condición II (media) del libro Hidrología, procesos y métodos (Orsolini et al., 2008), la cual se encuentra presente en el Anexo D. Posteriormente, debido a que las subcuencas se encuentran comprendidas por cuantiosas HRU's, cada una de las cuales posee información característica, correspondió agrupar a dichas HRU's conforme 7 grupos representativos de las mismas para agilizar las labores. Para finalizar, los CN de cada subcuenca fueron determinados realizando un promedio ponderado arealmente, de los CN de las HRU's componentes.

Así, quedaron establecidos los valores de CN para condición II de cada una de las subcuencas integrantes del SH Las Encadenadas, en cada uno de los meses del año, denominados de ahora en adelante CN normales. En la Tabla 8 puede apreciarse esta información.

Además, para una mejor interpretación, se presenta la Figura 36 los rangos de valores de CN's normales presentes en cada una de las subcuencas del SH.

**Tabla 8:** Número de Curva CN normales (condición II) para el SH Las Encadenadas.

Subcuenca N°	Meses											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
1	79	79	80	81	81	80	78	77	77	77	78	79
2	78	79	80	82	81	80	78	77	76	76	77	78
3	71	72	73	74	74	72	71	69	69	69	70	71
4	72	73	74	75	75	73	71	70	69	69	70	72
5	61	61	62	63	62	61	60	59	59	60	60	61
6	71	72	73	74	74	72	71	69	68	69	70	71
7	74	75	77	78	77	75	73	72	71	72	73	75
8	68	69	70	71	70	69	68	67	66	67	67	68
9	70	71	72	73	72	71	69	68	67	68	69	71
10	67	68	69	69	69	67	66	65	64	65	66	67
11	70	71	72	73	73	71	69	68	67	68	69	71
12	68	69	70	71	70	69	68	67	66	67	67	68
13	80	82	84	85	84	81	79	77	76	78	79	82
14	80	82	84	85	84	81	79	77	76	78	79	82
15	67	68	69	69	69	67	66	65	64	65	66	67
16	77	78	80	81	81	79	78	76	75	75	76	78
17	75	77	78	80	79	77	75	73	72	73	74	76
18	66	67	68	68	68	67	66	65	65	65	66	67
19	66	67	69	70	69	67	66	65	64	65	66	67
20	77	79	80	82	81	79	76	75	73	75	76	78
21	72	73	75	76	76	74	72	70	69	69	70	72



**Figura 36:** Mapa de CN normales (condición II) para las subcuencas del SH Las Encadenadas.

#### 4.1.1.3 INFORMACIÓN SOBRE CANALIZACIONES

Debido a la escasa información sobre canalizaciones presentes en el sistema de estudio, son empleadas metodologías de análisis espacial, mediante el software QGIS, tanto para identificar los canales presentes como así también para extraer información característica de los mismos.

Como primer paso metodológico de este Apartado son identificados y preseleccionados los canales de mayor impacto sobre el SH mediante su visualización con Google Satellite e imágenes satelitales actuales. Luego, los mismos son dibujados y enumerados mediante una capa vectorial del tipo línea. Cabe destacar que se menciona preselección, puesto que posteriormente en el Apartado 4.1.2.3 Validación de las simulaciones, son finalmente elegidos los canales a considerar en las simulaciones.

Paralelamente, con motivo de trabajar con las mismas nomenclaturas espaciales que el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0 (celdas y elementos), es generada una grilla con dimensiones de celda de 100 m en el eje x, y 100 m en el eje y, con posición centrada con respecto a la capa de valores altimétricos; adjudicando

dimensiones de grilla conforme la extensión areal del SH. Posteriormente, es realizada la enumeración de las celdas componentes de la grilla en orden superior a inferior y en sentido desde izquierda a derecha, logrando así obtener los valores "celda" determinados en el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado. Seguidamente, es unida a la capa grilla la capa valores altimétricos, puesto que ésta posee los valores de identificación de los puntos, iguales a los valores "elemento" considerados en el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado. Con dicha operación es obtenida en la capa grilla ambas informaciones: celdas y elementos.

A continuación, son superpuestas visualmente las capas grilla y canales; además es generada, mediante la visualización de las anteriores, una capa en la cual se identifiquen mediante puntos el paso de los canales por las distintas celdas. El objetivo de esta acción es extraer mediante esos puntos, información de celdas, elementos y valores altimétricos del terreno, la cual es necesaria para el ingreso de los canales al modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado. Resulta apropiado indicar que los puntos generados, para cada canal, deberán ser enumerados de menor a mayor, conforme el sentido de escurrimiento de los canales.

Posterior a ello, para que los puntos posean la identificación de correspondencia a determinado canal, es generado un buffer sobre la capa canales, de dimensiones tales que contemplen las posiciones de los puntos dentro de las celdas (en este caso fue asignado 30 m) y posteriormente interceptada la capa punto con ésta última. Culminando con las metodologías SIG, la capa punto es guardada en formato csv con el objeto de proseguir con las labores mediante una planilla de cálculo.

Desde la planilla de cálculo, las labores consisten en filtrar la información por canal, ordenar los puntos de menor a mayor, establecer la profundidad para el primero de los puntos y desarrollar las profundidades subsiguientes conforme los valores establecidos por la pendiente asignada y el valor altimétrico del terreno en dicho punto. Además, son asignados a cada punto características del canal como ser: ancho, talud, coeficiente de Manning para río y para valle de inundación.

Para finalizar, dicha información es exportada a un archivo de texto, antecedida en su primer párrafo por el número de líneas que posee el archivo, es decir, la cantidad de puntos correspondientes a la totalidad de los canales. Con ello, la información de canales se

encuentra lista para ser ingresada al modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0.

#### **4.1.1.4 INFORMACIÓN SOBRE ALTURAS INICIALES**

Debido a que no se dispone de información directa sobre alturas de agua en el SH, debieron utilizarse técnicas de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica para obtener la misma. A grandes rasgos, la metodología consiste en clasificar imágenes satelitales radar en coberturas de agua/ no agua y analizar las superficies de agua: conforme el valor altimétrico del terreno en el elemento de mayor altura que contempla el cuerpo de agua, asignar tirantes a los restantes elementos; realizando este procedimiento para cada uno de los cuerpos de agua presentes en el evento de análisis.

En lo que concierne a herramientas para desarrollar esta metodología, a modo de resumen se menciona principalmente el software SNAP, el cual es empleado para la manipulación de las imágenes satelitales radar, el software QGIS para la extracción de la información proveniente de las imágenes satelitales radar, y hoja de cálculo de Microsoft Excel, para el tratamiento final de la información.

Con respecto a los materiales, insumos de los softwares, son utilizados los productos L1 Detected High-Res Dual-Pol (GRD-HD) del satélite radar Sentinel 1 para distintas fechas; y el DEM SRTM de 90 m de píxel corregido, el cual fue tratado en el Apartado 4.1.1.1.1.

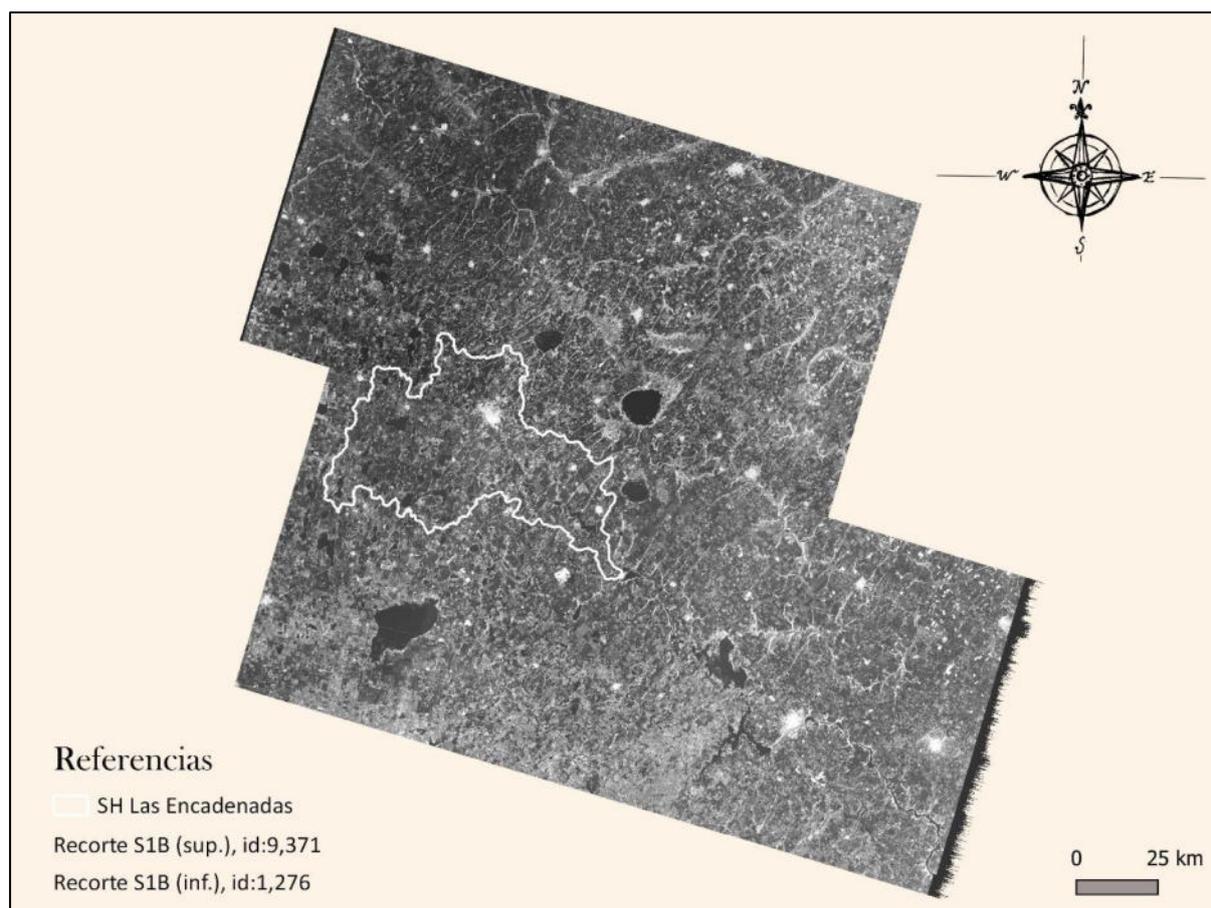
A continuación, y con el fin de manifestar los procedimientos logrados, es presentada la metodología de calibración.

##### **4.1.1.4.1 Tratamiento de imágenes satelitales radar**

En este Apartado, son descriptas las rutinas realizadas a las imágenes satelitales radar para lograr finalmente la clasificación de las mismas en coberturas de agua y no agua. Se destaca que la metodología desarrollada aquí, se encuentra basada en el manual de procesamiento y análisis de imágenes SAR (Podest, 2017).

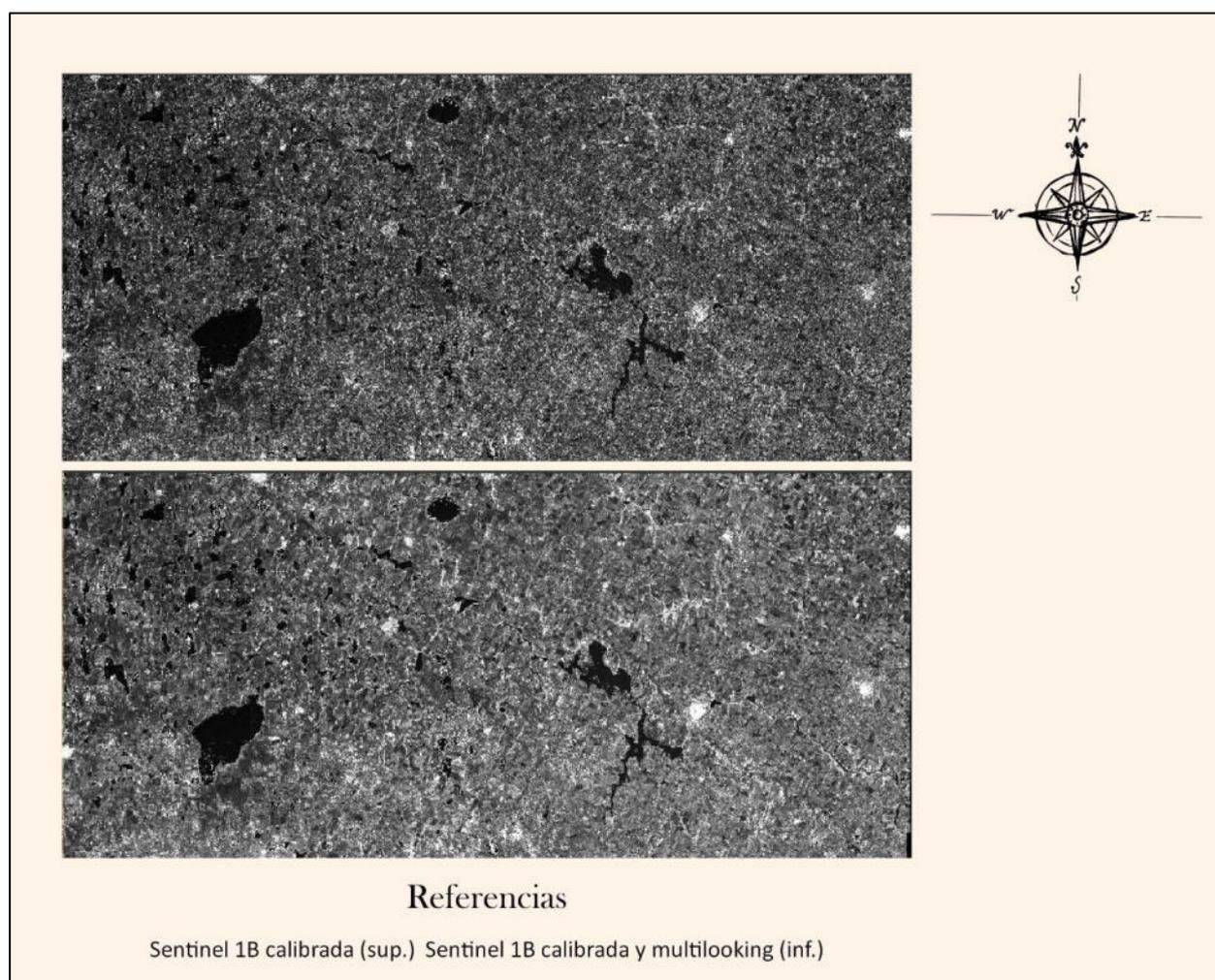
Para el tratamiento de las imágenes satelitales radar es utilizado el software SNAP, como fue mencionado anteriormente, con lo cual los procesos expresados a continuación, se exponen deduciendo la utilización de este.

En una primera instancia del tratamiento, son descomprimidas las imágenes y recortadas conforme el área de interés de trabajo. Resulta importante mencionar que, en la mayoría de las fechas de visita del satélite utilizadas, el área del SH de estudio resulta contemplada por dos escenas (imágenes), lo cual implica el procesamiento individual para ambas y posteriormente, en el Apartado 4.1.1.4.2, la manipulación de estas en conjunto. En la Figura 37 pueden apreciarse las escenas seleccionadas que implican el área de trabajo.



**Figura 37:** Recorte de escenas del satélite radar Sentinel 1B del área del SH Las Encadenadas.

Continuando con los procedimientos, es realizada una calibración radiométrica con el objeto de adquirir valores calibrados del coeficiente de retrodispersión. Luego, es reducido el Speckle de las imágenes (efecto sal y pimienta) mediante multilooking, adjudicando 6 al número de looks. De seguida, se observa en la Figura 38, una imagen radar calibrada frente a la misma imagen, con multilooked aplicado.

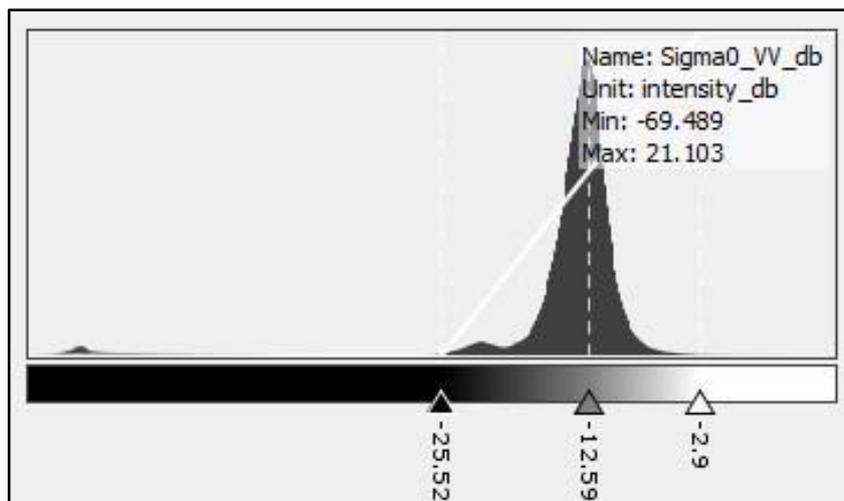


**Figura 38:** Comparativa de recorte de imagen Sentinel 1B calibrada (superior) frente a imagen calibrada y con multilooking (inferior).

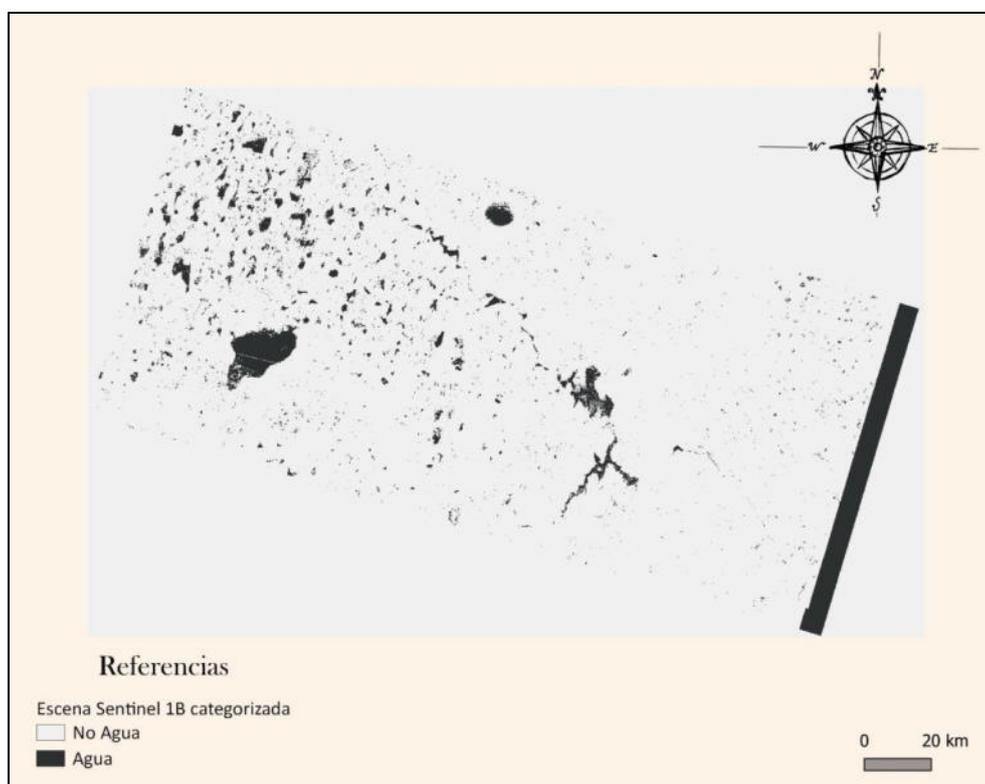
Para continuar, se realiza la calibración geométrica de las imágenes, con el fin de corregir distorsiones geométricas, producto de rango oblicuo, inversión de relieve, sombras, entre otras (Chuvieco Salnero, 1995).

Luego de aplicada esta corrección, y posterior a la conversión de los valores de la imagen a decibeles (dB), se procede a analizar el histograma de cada una de las imágenes para la banda VV, con el objeto de detectar el valor del punto de quiebre de los dos picos, que separa lo que es agua de las demás clases de coberturas. Posteriormente es aplicada una expresión a dicha banda, para que los valores menores al punto de quiebre adquieran un valor, y los demás otro (255 y 0 en este caso) permitiendo diferenciar lo que es agua, de lo que no.

Con motivo de aportar a la explicación, en la Figura 39 se muestra el histograma de la imagen Sentinel 1B del área de estudio con fecha 10 de octubre del año 2016, para la banda VV; y posterior a ésta, se exhibe la Figura 40 transformada a elementos de agua y no agua.



**Figura 39:** Histograma de imagen Sentinel 1B del área de estudio, 10 de octubre de 2016, banda VV.



**Figura 40:** Imagen Sentinel 1B del área de estudio, 10 de octubre de 2016, categorizada en agua-no agua.

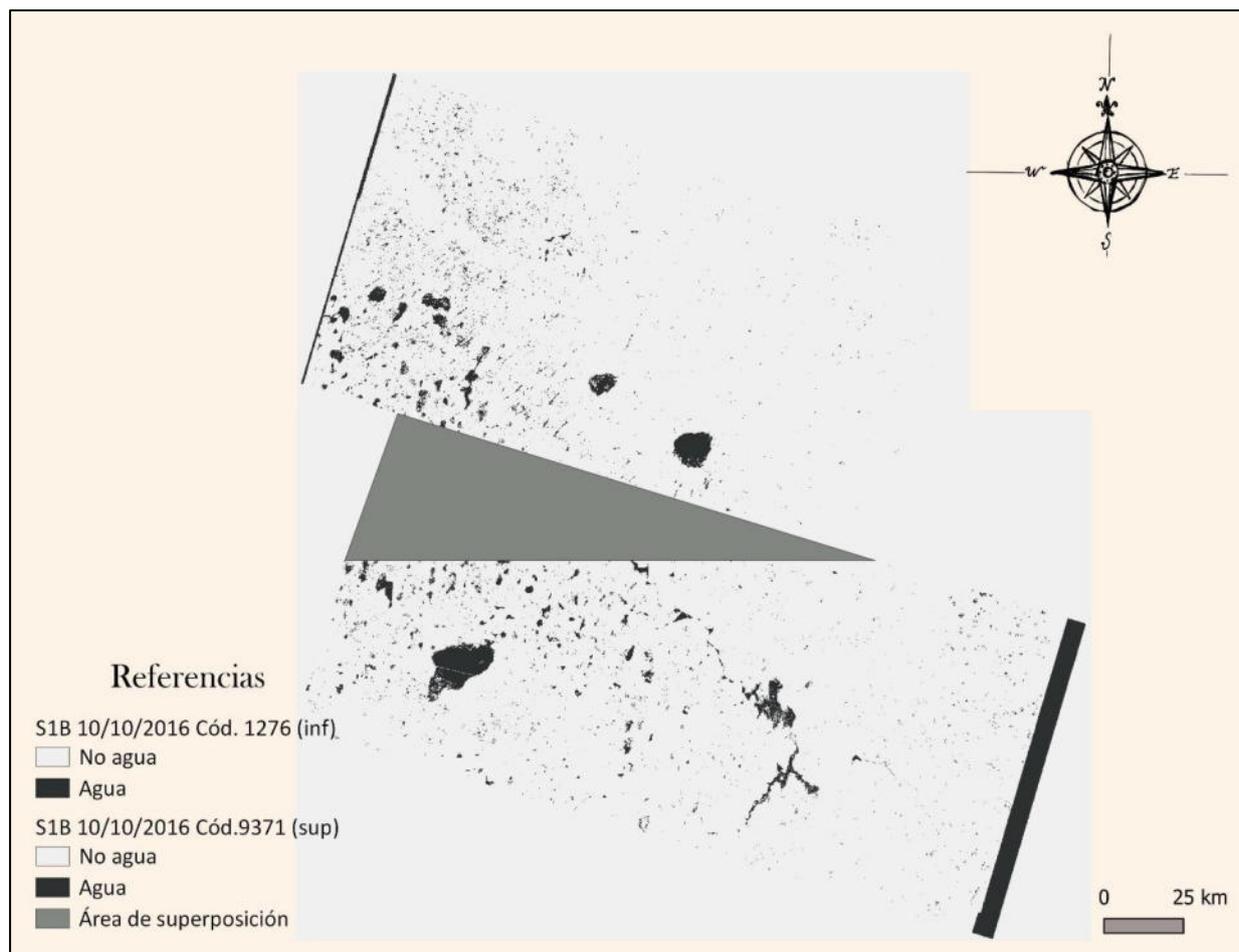
#### 4.1.1.4.2 Extracción de información de agua en superficie

En este Apartado, se expone como es extraída y tratada la información de agua de las imágenes satelitales radar a través del software SIG QGIS, la cual es esencial tanto para contrastar las respuestas de simulación, como para ingresar los valores de alturas iniciales de agua, de la corrida.

Resulta oportuno indicar que primeramente son explicadas las técnicas de extracción de la información afines a ambos procesos, alturas iniciales y validación de simulaciones (ver Apartado 4.1.2.3) y posteriormente, en el Apartado 4.1.1.4.3, son expuestos procedimientos extendidos necesarios para alturas iniciales. Además, se recuerda que en esta instancia se trabaja con recortes de 2 escenas satelitales radar por cada análisis, puesto que en su conjunto logran cubrir el área de estudio.

Para iniciar con la metodología, es ejecutada la herramienta "point sampling tool" a cada una de las imágenes por separado. Dicha herramienta, utilizando como insumo una capa de formato punto con los valores altimétricos del DEM la cual ya fue mencionada con anterioridad, realiza una extracción de la información agua-no agua de manera puntual, para cada uno de los 323,795 puntos que componen el SH, generando una nueva capa punto. El objetivo de este paso es lograr obtener una capa con la información altimétrica en conjunto con la información agua, para cada una de las posiciones. Posterior a esto, dichas nuevas capas son fusionadas mediante un proceso de unión de atributos conforme su localización, y es generada en la tabla de atributos de la misma, una nueva columna con la información fehaciente de agua-no agua. Esto debe realizarse puesto que, en la unión de capas vectoriales ejecutada en el paso anterior, es integrada información de bordes de imagen, las cuales vician la información de la otra capa como no agua. Como ejemplo de lo expresado, en la Figura 41 es expuesta dicha situación de superposición de información a corregir.

Luego de restablecida la información de agua-no agua de cada posición, conforme sentencias de validación, es realizada una unión mediante el método de intersección con la capa vectorial de delimitación de lagunas (mencionada en el Apartado 4.1.1.1.2) con motivo de poder disponer en una misma tabla de atributos de ambas informaciones, para cada posición geográfica. Para finalizar, es generada una nueva columna con la numeración identificatoria de cada punto, conforme su posicionamiento (de este a oeste, de norte a sur), lo cual servirá más adelante para que los reconozca el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado.



**Figura 41:** Superposición de recortes de escenas Sentinel 1B clasificadas en Agua – No agua.

Al culminar con estos procedimientos, se posee la información necesaria para poder realizar la contrastación de la información de las imágenes satelitales, para una fecha determinada, con la información arrojada por el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado, para dicha fecha.

#### **4.1.1.4.3 Manipulación de información de agua en superficie**

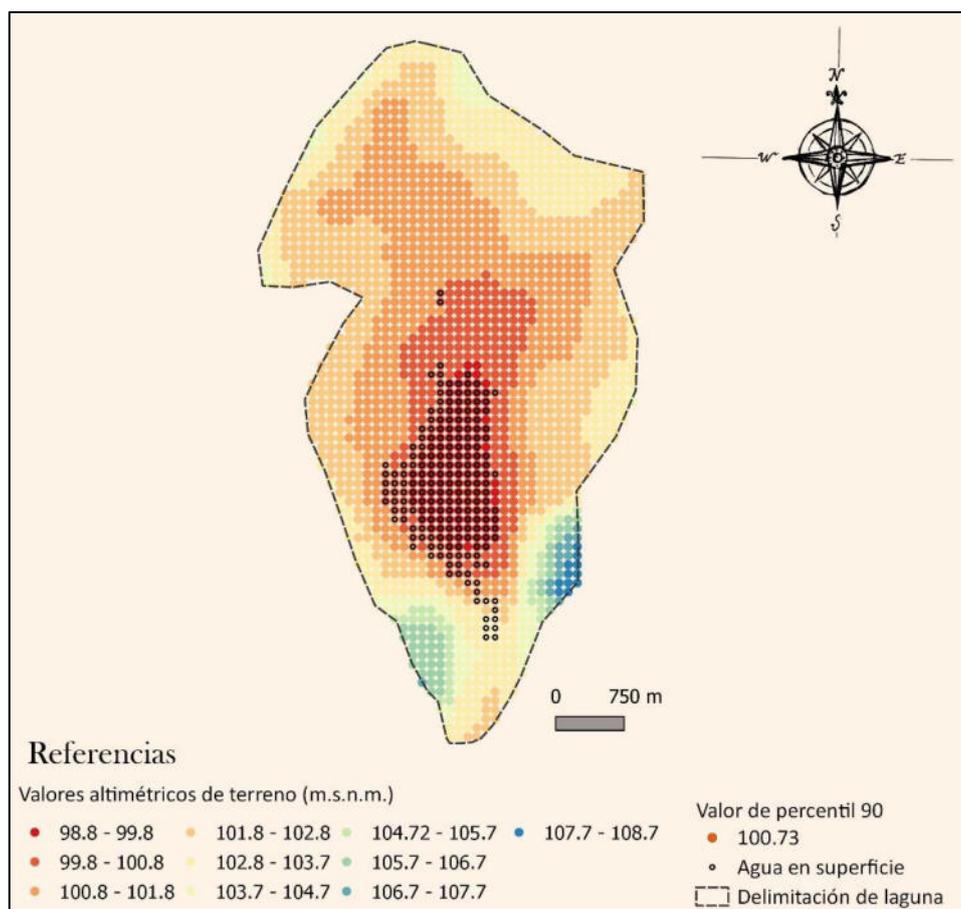
En este Apartado, son explicadas las técnicas necesarias para poder asignar los valores de alturas iniciales de agua a los puntos componentes de la discretización del SH de estudio.

El objetivo de este Apartado en cuanto a lo metodológico, a grandes rasgos, es identificar cuáles son los puntos que componen las lagunas del SH que tienen agua y de ellos, cuáles son los de mayor valor altimétrico. Al obtener esto, los puntos con mayor valor altimétrico servirán para dar los tirantes de agua a los demás puntos con agua de la laguna de análisis.

Finalizado este resumen con ánimo de orientación, se describe de manera detallada la metodología desarrollada para lograr las alturas de agua iniciales de una simulación hidrológica/hidráulica.

Para iniciar la metodología, es realizada la conversión de formato de la capa vectorial lograda en el Apartado 4.1.1.4.2. Dicha capa de formato shape es convertida a formato csv, con el fin de que puedan ser leídos los atributos de ésta, mediante una hoja de cálculo. Posterior a ello, es guardada con formato .xlsx para que sean aceptadas ciertas operaciones y puedan guardarse correctamente los cambios.

Una vez abierto el archivo en Microsoft Excel, es generada una nueva columna en la cual es anotado el valor del percentil 90 de los valores altimétricos con agua, para cada una de las lagunas. Esto es realizado, puesto que, tomando el máximo valor altimétrico como referencia para los tirantes de los demás puntos con agua en cada laguna, se podrían cometer en errores que perjudicarían la simulación. A modo de ejemplo, se presenta la Figura 42.



**Figura 42:** valores altimétricos máximos y P90 para el área de la laguna N°15.

Como puede apreciarse en la Figura 42, el valor altimétrico máximo que posee agua en superficie se encuentra en el orden de 102.8 a 103.7 m.s.n.m. (color amarillo intermedio con bordes negros). Si usáramos este valor como referencia de valor máximo con agua y de él sacáramos los tirantes para los demás puntos con agua dentro de la laguna, estaríamos cometiendo un error porque si bien el punto posee agua (se evidencia es un canal) tiene valor altimétrico alto debido a que el modelo de elevación no detectó como altimetría la de la base del fondo del canal sino el entorno, dada su delgadez conforme la escala de trabajo.

Los valores representativos a utilizar como base para calcular los tirantes de agua de la laguna, deben ser los valores de los puntos con agua del perímetro de la misma, los cuales, para este caso, se encuentran en el orden de 99.8 a 100.8 msnm (color naranja intermedio con bordes negros). Ahora, si se observa el valor del percentil 90 calculado para los puntos con agua de la laguna, divisamos que este sí es representativo de la misma. Con esto, se demuestra que al utilizar el valor de percentil 90 para calcular los tirantes, se adquiere una mayor seguridad en el cálculo de los mismos.

Este procedimiento de calcular el percentil 90, es realizado para los puntos con agua de cada una de las 55 lagunas de interés del área de estudio. Luego de esto, es generada una nueva columna en la cual se realiza la diferencia entre el valor del percentil 90 y el valor altimétrico del punto, conservando los valores positivos y asignándole cero a los valores que sean negativos (altos no representativos) y a los que no posean agua.

Para finalizar, se ordena dicha columna conforme orden creciente de identificación de posición, y se transforma a la misma en una matriz, con la finalidad de que el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado pueda reconocer los datos.

#### **4.1.2 CALIBRACIÓN / VALIDACIÓN DEL MODELO VMMHH 1.0**

En este Apartado, se presenta el detalle de cómo y por qué fueron elegidos determinados eventos de lluvia ocurridos en el área de estudio para realizar la calibración del modelo y posteriormente, es explicada la metodología necesaria para realizar la simulación de dichos eventos en el SH de estudio y la validación de los mismos.

Los materiales empleados para llevar a cabo la selección de los eventos climáticos a simular fue la siguiente: historial de imágenes radar Sentinel-1 y registros pluviométricos de las localidades de Venado Tuerto y Villa Cañas.

En cuanto a los materiales utilizados para poder desarrollar la simulación, se presentan los siguientes: DEM corregido, con incorporación de batimetrías y discretizado (generado en Apartados anteriores), rangos numéricos de las subcuencas (elaborado en el Apartado 4.1.1.1.5), CN's normales (condición II) de cada una de las subcuencas para los diferentes meses (elaborado en el Apartado 4.1.1.2.4), características de circulación del agua pluviométrica en el punto de cierre, alturas iniciales de agua en el sistema (elaborado en el Apartado 4.1.1.4) y registro de lluvias para el período de simulación de las localidades de Venado Tuerto y Villa Cañás.

En lo que respecta a herramientas utilizadas, fue utilizado primordialmente el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0; brindando el mismo como resultado de la simulación las variables de flujo: alturas y cotas de agua, caudales y velocidades, entre otros, para el dominio de la cuenca (Riccardi et al., 2009). Ver Anexo A.

Para una mejor comprensión de la metodología realizada en esta etapa, se presentan como Apartados específicos, los siguientes: Selección de eventos para la simulación del SH de estudio (Apartado 4.1.2.1), Simulación de eventos climatológicos acontecidos (Apartado 4.1.2.2) y, Validación de las simulaciones (Apartado 4.1.2.3).

#### **4.1.2.1 SELECCIÓN DE EVENTOS PARA LA SIMULACIÓN DEL SH**

La selección de eventos climatológicos para el área de estudio debió ser realizada conforme ciertos factores que son explicados a continuación.

Por un lado, los períodos de búsqueda de información pluviométrica debieron ser ajustados acorde a la disponibilidad de registros históricos de lluvias de las localidades de Venado Tuerto y Villa Cañás, de las cuales se dispone información desde el año 1989.

El otro motivo, severamente limitante a la hora de elegir los eventos puesto que de él depende la calibración de las simulaciones, fue el de la disponibilidad de imágenes satelitales radar, de las cuales existe un registro que inicia a finales de 2014. Cabe aclarar que se utilizaron únicamente imágenes radar debido a que las imágenes satelitales ópticas, si bien poseen un archivo histórico considerablemente mayor al de las imágenes radar, se presentan cubiertas con nubes en la totalidad de las fechas en las cuales se registra precipitación.

Por estas cuestiones, los eventos climatológicos seleccionados para la simulación del comportamiento del SH fueron los siguientes:

- *Evento N°1:* Se inicia la simulación del mismo el 21 de diciembre de 2016, con una primera calibración de ajuste para el día 02 de enero de 2017 y una calibración de cierre del evento el día 14 de enero de 2017. Dicho evento presentó una precipitación total de 347 mm para la localidad de Venado Tuerto y 363 mm para la localidad de Villa Cañas. Es el evento de mayor magnitud presente en el rango de estudio, y a su vez, un evento notable para la región, que puso en emergencia hídrica la zona, afectando numerosas poblaciones y vías de comunicación.
- *Evento N°2:* De inicio con fecha 10 de octubre de 2016 y culmina el 22 de octubre de 2016. Este evento presentó una precipitación total de 57 mm para la localidad de Venado Tuerto y 52 mm para la localidad de Villa Cañas. En cuanto a magnitud es un evento leve, distribuido en el tiempo, resultando útil su análisis para la calibración de eventos de baja recurrencia.

Cabe aclarar, que las fechas de inicio de los eventos son dadas conforme las fechas de las imágenes satelitales radar utilizadas en las asignaciones de alturas iniciales de agua del SH, lo cual fue tratado en el Apartado 4.1.1.4.

#### **4.1.2.2 SIMULACIÓN DE EVENTOS CLIMATOLÓGICOS ANTECEDENTES**

En este Apartado, se desarrollan las metodologías necesarias para llevar a cabo la representación del comportamiento del SH de estudio. Cabe destacar que los procedimientos efectuados aquí, son meramente realizados con el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0.

A grandes rasgos, la información necesaria para poder realizar las simulaciones de los eventos de interés son las siguientes: Información altimétrica, valores de Número de Curva, coeficientes de rugosidad de Manning, secciones y cotas de obras de arte en el punto de cierre del SH; y precipitaciones, entre otras.

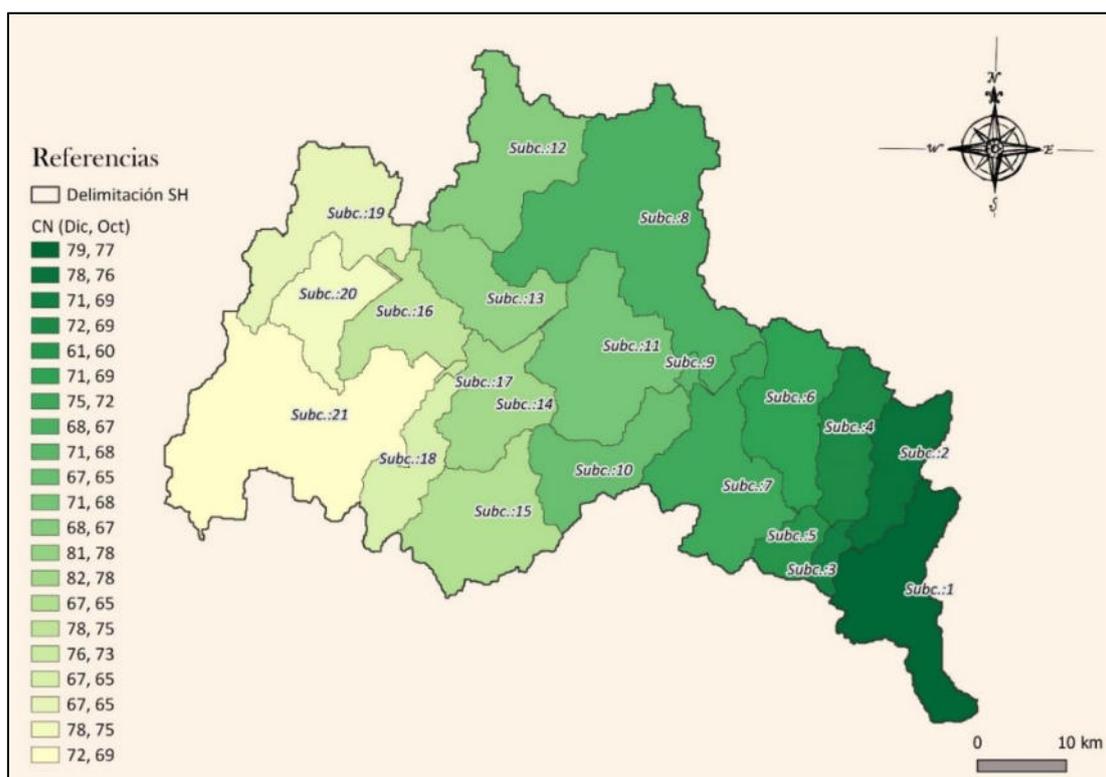
Los siguientes Apartados, reflejan el orden de procedimientos necesarios para poder desarrollar adecuadamente las simulaciones de los eventos climáticos ocurridos seleccionados. Los mismos son explicados para ambas simulaciones, realizando discriminaciones en cuanto a la información particular de cada evento, cuando así lo requiera.

#### 4.1.2.2.1 Ingreso de información altimétrica

Para dar inicio a las simulaciones, es ingresada como primera información el DEM corregido, el cual además posee ejecutadas las batimetrías de las lagunas presentes. Cabe recordar, como fue mencionado en el Apartado 4.1.1.4 que los valores de dicho DEM se presentan discretizados en valores puntuales, en forma de malla, numerados de izquierda a derecha y de norte a sur, con una separación entre puntos de 100m en ambas direcciones. Para una mejor interpretación visual, en el modelo son exhibidas también las delimitaciones de las subcuencas componentes del SH.

#### 4.1.2.2.2 Adjudicación de Número de Curva CN

En esta etapa, son ingresados los valores de CN normales (condición II) a cada rango numérico conforme la subcuenca que integra y el mes en el cual es desarrollada la simulación. En la Figura 43, a modo de esquema, son representados los valores para ambas simulaciones.



**Figura 43:** Valores de CN normales para las simulaciones de estudio.

#### 4.1.2.2.3 Especificación de coeficientes de rugosidad de Manning

En cuanto a las rugosidades de Manning, fue utilizado en esta instancia un valor general, representativo de todas las subcuencas presentes en el SH. El mismo fue obtenido del manual de Hidrología Aplicada (Chow et al., 1994) como un promedio de los valores para las

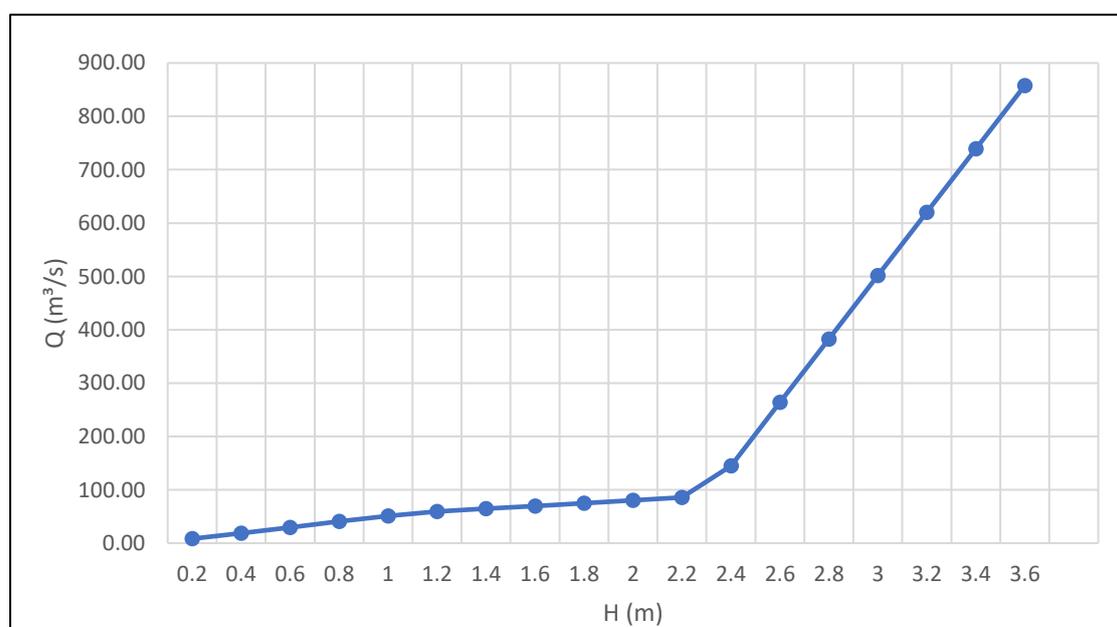
descripciones de planicies de inundación compuestas de pastos y cultivos ( $0.035 \text{ (s/m}^{1/3})$  y  $0.040 \text{ (s/m}^{1/3})$ , respectivamente). Cabe aclarar que estos valores son particulares, formando parte de un conjunto mayor con los cuales fue realizado el análisis de sensibilidad, el cual es descrito más adelante.

#### **4.1.2.2.4 Condición de borde**

La condición de borde seleccionada para la caracterización del punto de cierre del SH es una curva de descarga tipo Q-H (caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) versus altura de agua (m)).

La misma se presenta en la Figura 44, obtenida a partir de información conforme obras de arte situadas en el punto de cierre del SH, siendo la misma brindada por la Sede de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe en Venado Tuerto y corroboradas las secciones mediante salidas de campo (Ver Anexo E). Se aclara que fue realizada una prolongación de la curva considerando situaciones en las cuales la cota de agua supere la cota de coronamiento de las obras de arte, escurriendo a superficie libre sobre el pavimento.

Si bien no se cuenta con registro de caudales en el punto de cierre del sistema con los cuales poder cotejar los valores de la curva, se obtuvieron imágenes del evento de diciembre 2016-enero 2017, el cual es analizado posteriormente, lo cual permite una comparación marginal de tirante-caudal ocurrido frente a lo simulado. Dichas imágenes se presentan en el Anexo E.



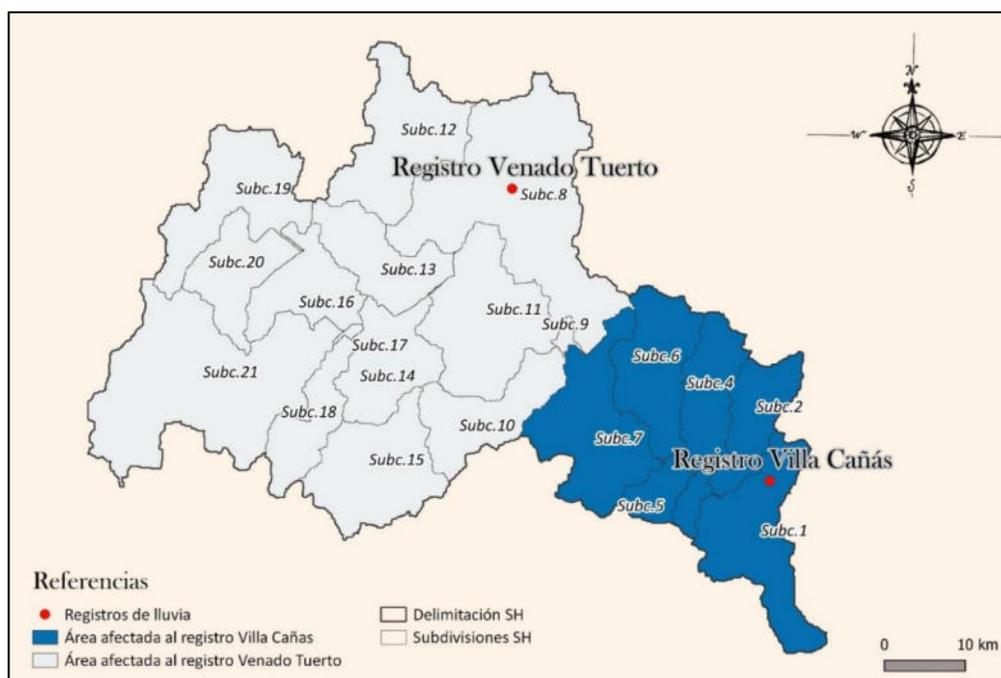
**Figura 44:** Curva Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) vs H (m).

#### **4.1.2.2.5 Asignación de precipitaciones**

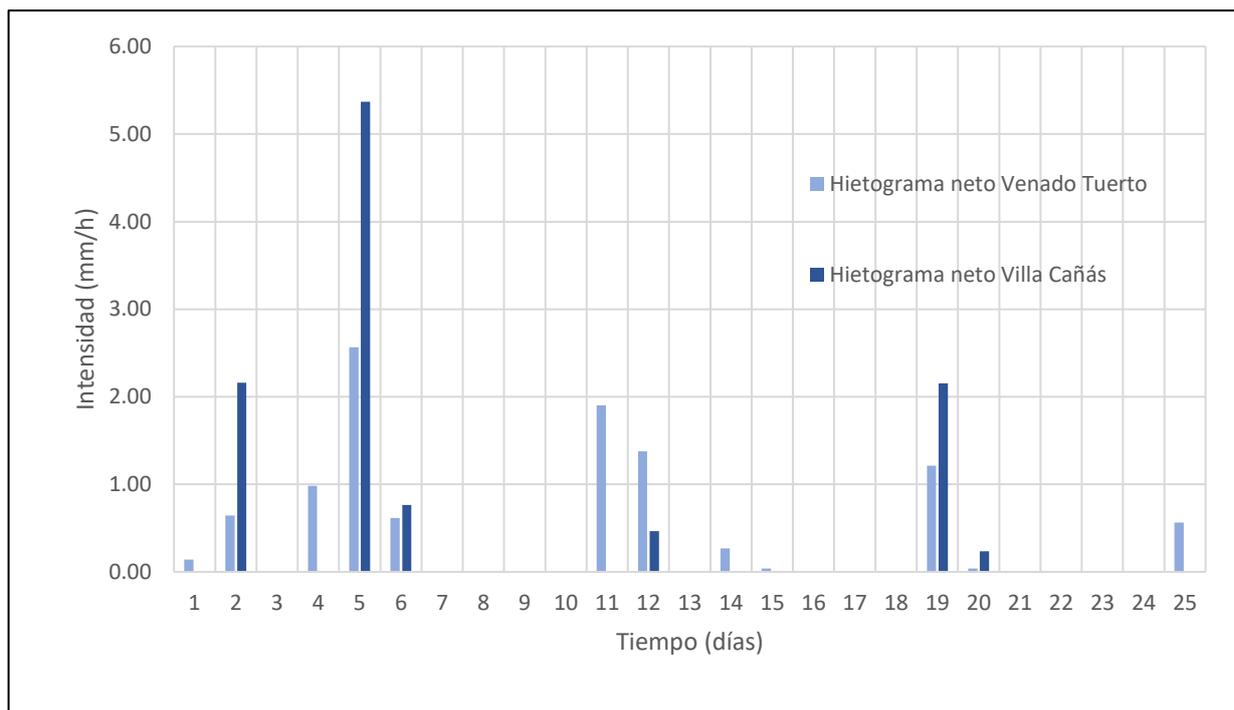
Los hietogramas ingresados a la simulación fueron obtenidos mediante información pluviométrica de dos localidades: por un lado, información registrada en la Ciudad de Venado Tuerto en la Estación Meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional y por otro, información registrada en la Localidad de Villa Cañas por una Estación particular. No se profundiza aquí sobre el análisis de la información puesto que fue tratado en el Apartado 4.1.1.2.2.

Con la finalidad de que los hietogramas posean una buena representatividad en la cuenca, los mismos fueron asignados a las distintas subcuencas de acuerdo con su cercanía las mismas. Esto puede observarse en la Figura 45.

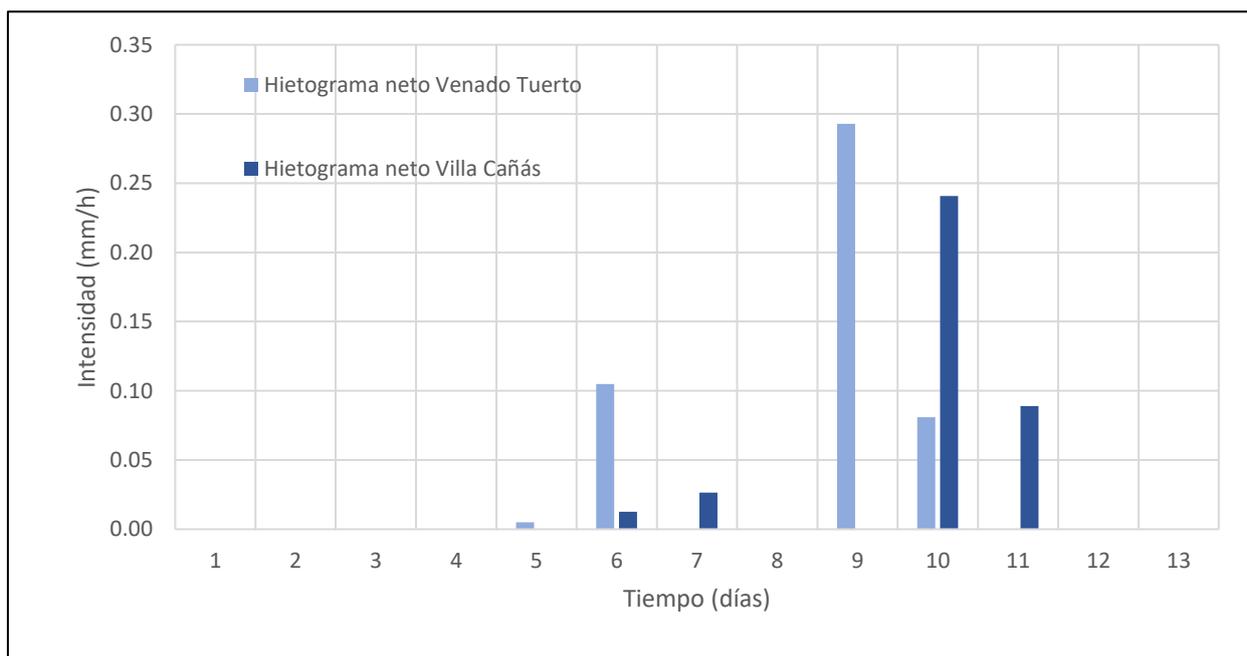
Debido a que el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado realiza la simulación del escurrimiento de la precipitación considerando la lluvia neta se realizaron procedimientos preliminares a la simulación con el objeto de descontar el agua precipitada que es retenida e infiltrada y lograr la precipitación neta. Además, debido a que el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado toma una cantidad limitada de hietogramas de ingreso, debió realizarse un promedio de CN's entre subcuencas de características semejantes con el objeto de ingresar una única lluvia neta para cada grupo de subcuencas. En las Figuras 46 y 47, se presentan los hietogramas de lluvia neta para los dos grupos de subcuencas.



**Figura 45:** Subcuencas contempladas por los registros de lluvias en SH Las Encadenadas.



**Figura 46:** Hietogramas para la simulación N°1, día 1 = 21 de diciembre.



**Figura 47:** Hietogramas para la simulación N°2, día 1 = 10 de octubre.

A continuación, se presenta la Tabla 9, la cual consiste en un resumen de valores de lluvia total y neta para evento, en cada estación.

**Tabla 9:** Resumen de lluvias para las estaciones VT y VC

Evento/ Estación	Lluvia Total (mm)	Lluvia Neta (mm)
Evento 1- VT	347	233
Evento 1 -VC	363	293
Evento 2- VT	57	8
Evento 2 -VC	52	14

#### **4.1.2.2.6 Procesamiento y simulación**

Como etapa previa a la simulación, debió realizarse el análisis de consistencia de datos, y conforme a su dictamen, continuar con la etapa de procesamiento o rever los errores informados. Seguidamente, se realizó el guardado de los archivos en formato dat.

Resulta apropiado mencionar que, en esta primera etapa de simulación (sin canalizaciones) son utilizados intervalos de procesamiento del orden de los 30 segundos, tiempo máximo en el cual las simulaciones se manifiestan estables.

Con los archivos dat generados, la simulación es ejecutada por fuera del modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado, mediante un intérprete de comandos CMD. Cabe destacar que antes de iniciar la simulación, debieron ser modificados los archivos de alturas iniciales, ingresando los valores obtenidos mediante la metodología desarrollada en el Apartado 4.1.1.4.

#### **4.1.2.3 VALIDACIÓN DE LAS SIMULACIONES.**

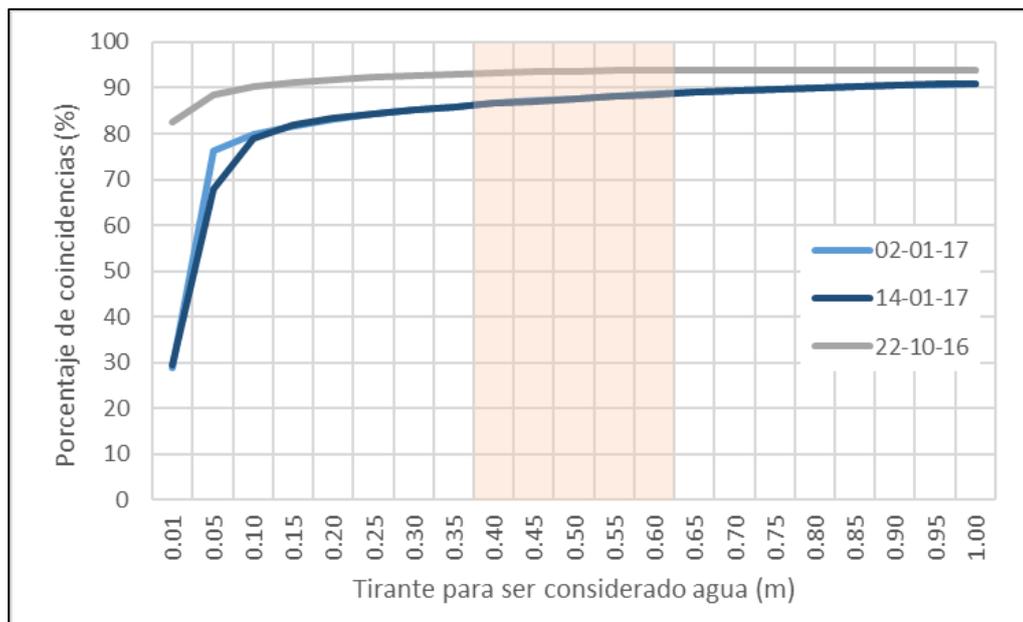
El SH Las Encadenadas, no posee registros históricos de caudales o de cotas de nivel de agua en secciones fijas de interés, con lo cual, realizar la validación de las simulaciones hidrológico/hidráulicas del mismo, se torna ciertamente más complejo.

Debido a esta situación, y con el objeto de lograr simulaciones precisas del sistema, es utilizada parte de la metodología desarrollada para obtener alturas iniciales (Apartado 4.1.1.4) para obtener una validación a través de la verificación de superficies de agua presentes en el SH. A modo de repaso, son utilizadas las imágenes satelitales radar clasificadas en agua/no agua y contrastada dicha información con la arrojada por la simulación, que también previamente es condicionada bajo la sentencia agua/ no agua.

Resulta importante aclarar que la unidad areal de contraste son celdas (de 100 m x 100 m, en este caso) puesto que es la unidad con la cual trabaja el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado. Con respecto a las fechas de las imágenes satelitales radar, las mismas son elegidas conforme los eventos climáticos seleccionados y viceversa, es decir, son elegidos los eventos climáticos conforme la disponibilidad de imágenes satelitales radar.

El contraste de la información de alturas finales de agua en cada una de las celdas conforme la existencia de agua-no agua del producto logrado mediante imágenes satelitales radar (Soria et al., 2020) es efectuado luego de realizadas las simulaciones sin canalizaciones, para ambos eventos.

Dicha contrastación se realiza ingresando en una planilla de cálculo el archivo de alturas finales que arroja el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado y alistando en otra columna (previo alineamiento de la información por valores de coordenadas) la información del producto agua-no agua de la imagen radar para la fecha de estudio. La información de alturas brindada por el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado es convertida a agua-no agua bajo el condicionante de que, para alturas de agua seleccionadas dentro del rango de 0.40 m a 0.60 m sean consideradas agua, y alturas inferiores como no agua. Cabe destacar que dicho rango de valores fue designado luego de analizar la influencia que genera dicho valor en los resultados de la contrastación. Se debe tener en cuenta que este tirante de agua responde a una esquematización de almacenamiento y conducción dentro del elemento; con lo cual la altura inicial en la que se considera como agua, resulta menor en la realidad al encontrarse dispersa por toda el área del elemento; por tal motivo las alturas inferiores a ese rango, son consideradas no agua. A continuación, se presenta en la Figura 48 la gráfica de análisis de la variación del valor que da inicio a ser considerada una celda como agua, con respecto al porcentaje de aciertos entre la simulación y el producto agua-no agua de la imagen satelital radar.

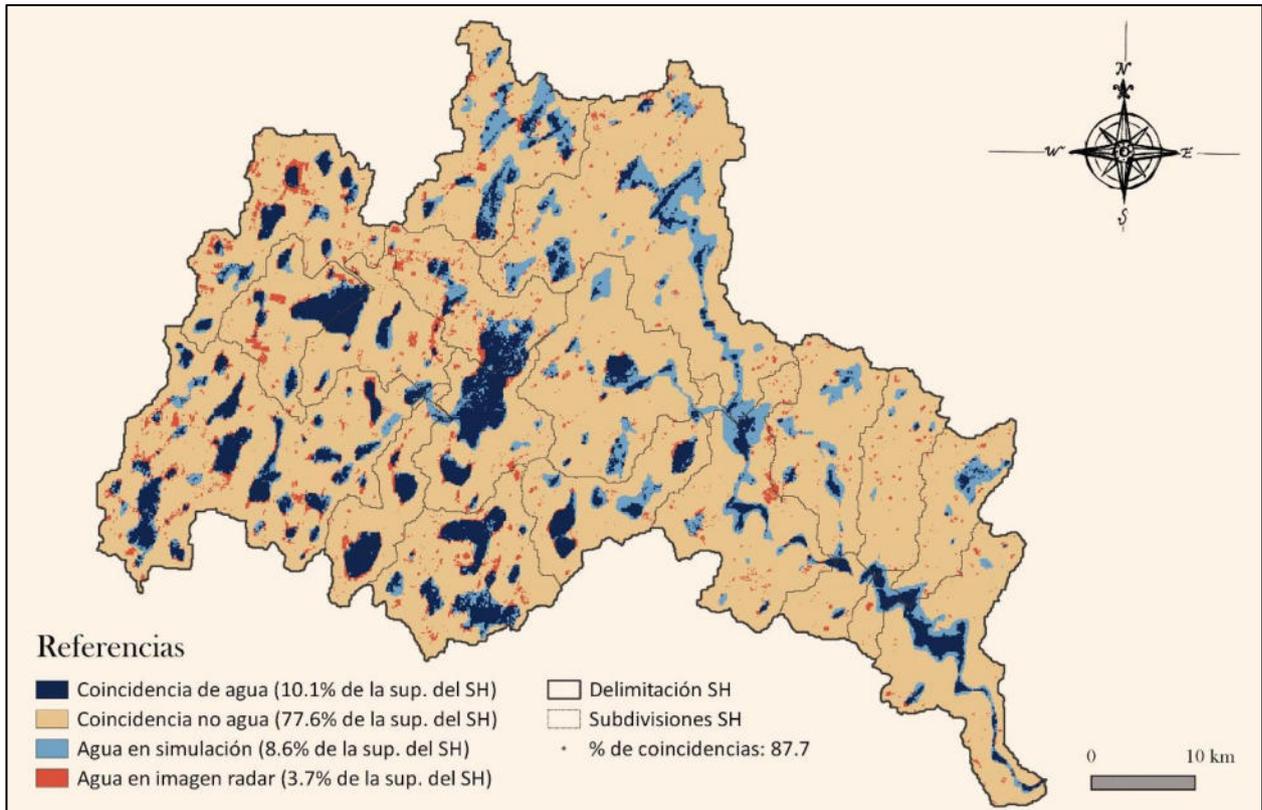


**Figura 48:** Curvas de porcentaje de coincidencia entre simulaciones y máscaras de agua respecto tirantes iniciales a ser considerados agua.

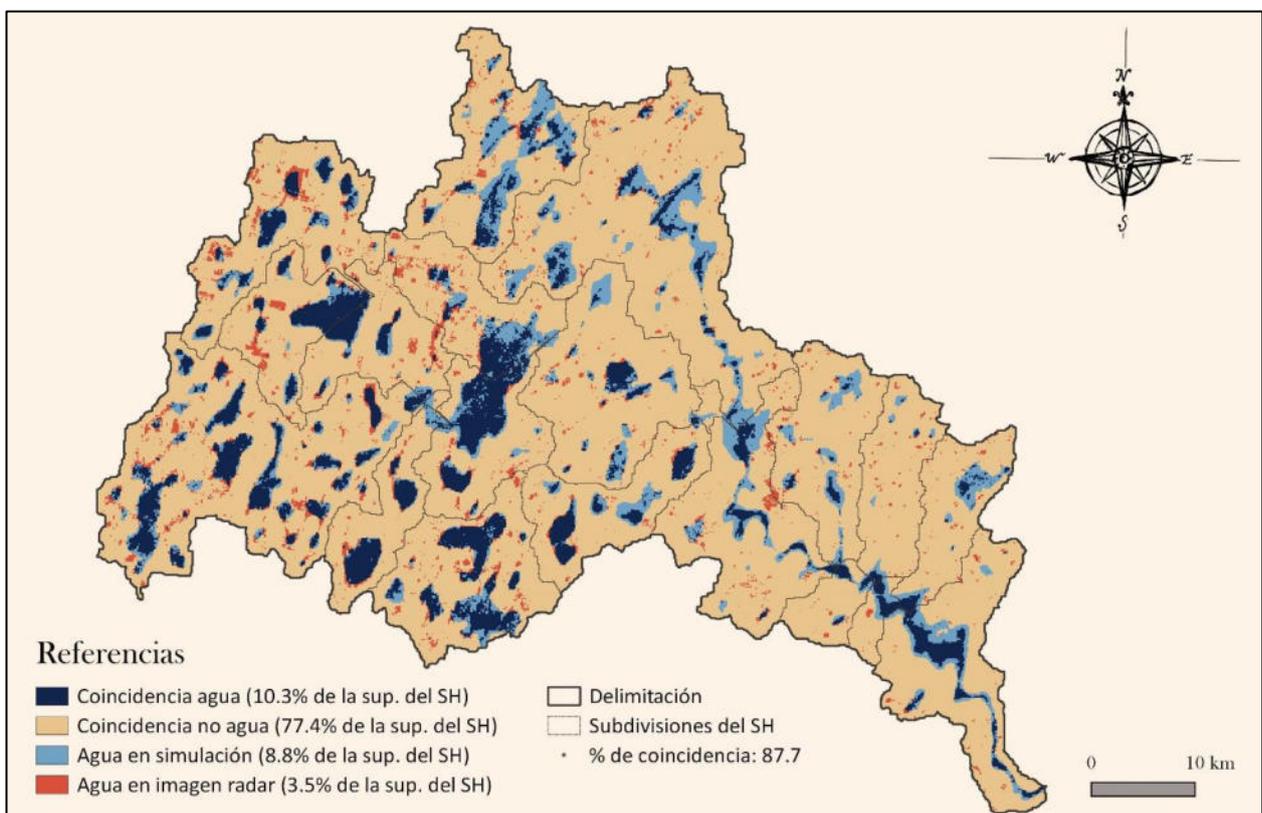
Luego de asignada la altura en la cual las celdas son consideradas con agua, adoptando para este caso el valor de 0.50 m, es realizada una clasificación de dichas celdas conforme las siguientes premisas: la celda es considerada con agua tanto en la simulación como en la máscara de agua, la celda es considerada sin agua tanto en la simulación como en la máscara de agua, la celda es considerada como agua sólo en la simulación; y la celda es considerada como agua sólo en la máscara de agua. Realizado esto, la planilla es exportada a formato .csv e ingresada al software de SIG. Para finalizar, es realizado un mapeo de este análisis, lo cual permite una mejor interpretación de las no coincidencias. En las Figuras 49, 50 y 51, se presentan mapas con el análisis mencionado recientemente, para los eventos de estudio.

Como puede observarse en las mismas, en color azul se presentan las áreas en las cuales realmente había agua en la superficie, de acuerdo con la imagen satelital radar, y también la simulación arroja como resultado agua. En color beige, se presentan las zonas en las cuales no había agua para ese evento y tampoco lo considera agua la simulación. En color celeste, se presentan las superficies en las cuales no había agua según la imagen satelital radar, pero que la simulación considera como agua.; y en color terracota, las en las cuales sí había agua en superficie pero que la simulación no las considera agua.

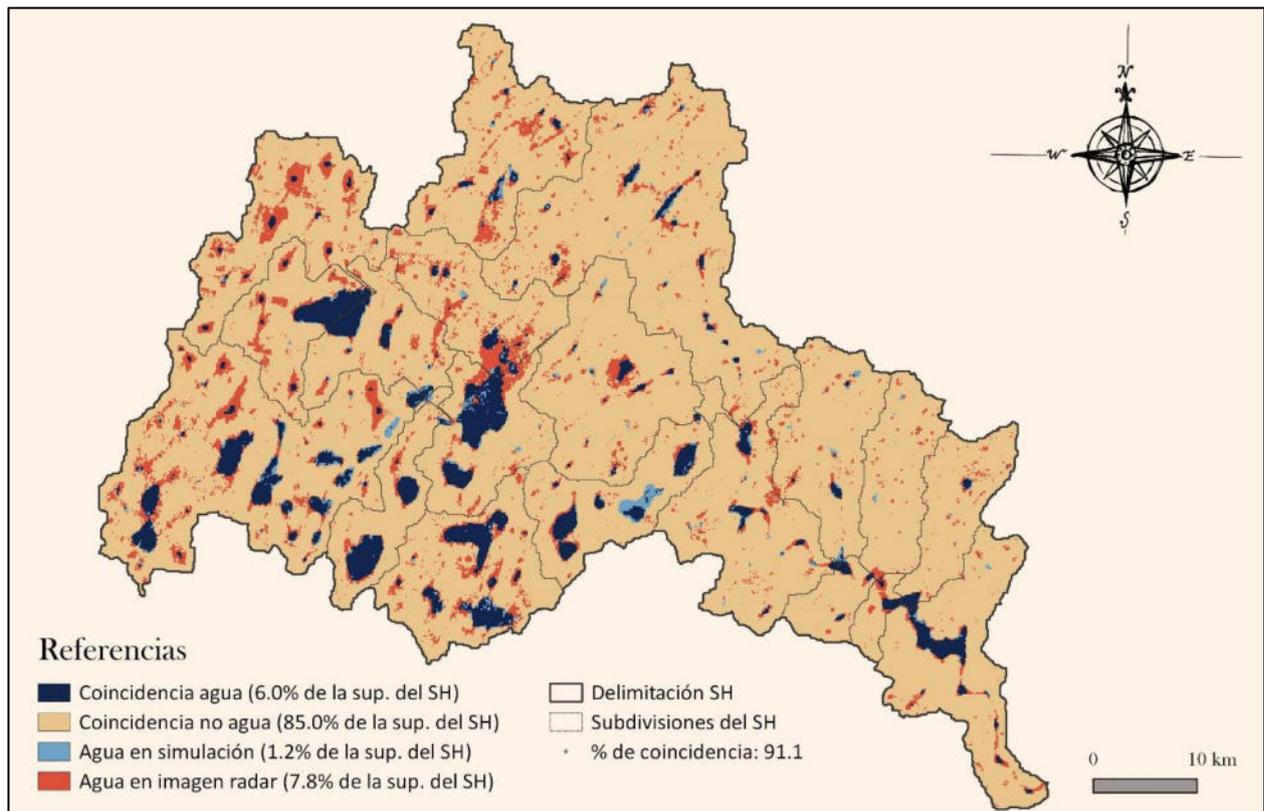
En las Figuras 52 y 53 son presentados los hidrogramas en el punto de cierre del SH, obtenidos de la simulación de los dos eventos.



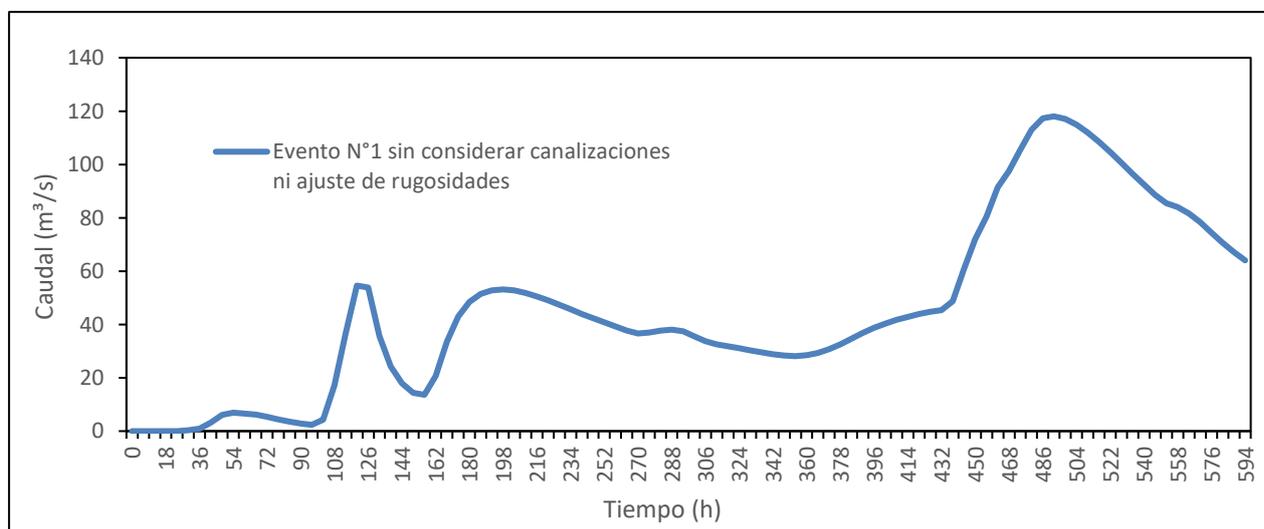
**Figura 49:** Mapa de contraste de respuestas de Evento 1, para la fecha 02 de enero de 2017.



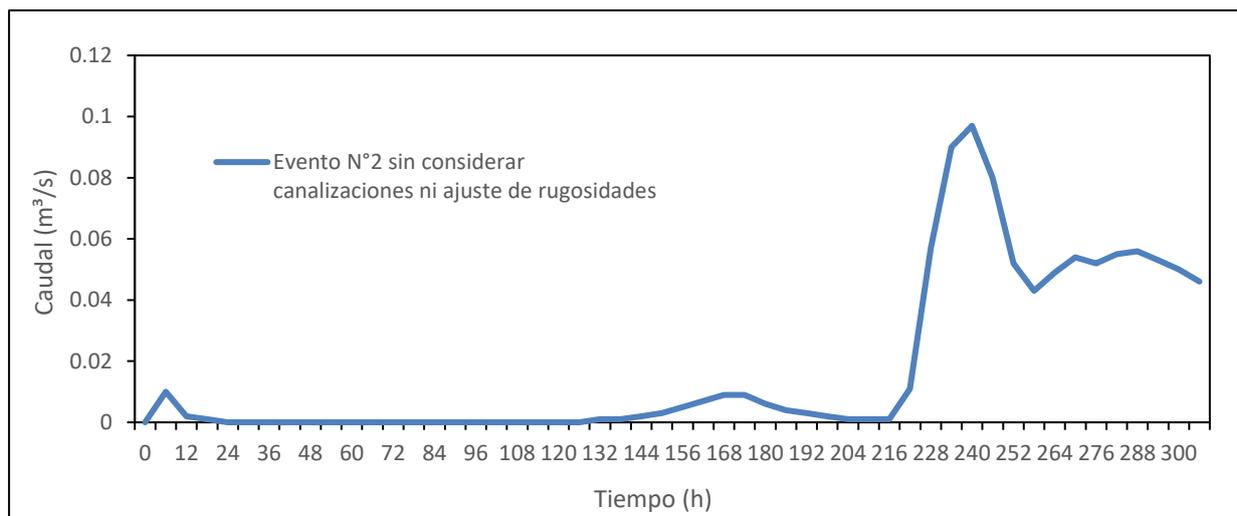
**Figura 50:** Mapa de contraste de respuestas de Evento 1, para la fecha 14 de enero de 2017.



**Figura 51:** Mapa de contraste de respuestas de Evento 2, para la fecha 22 de octubre de 2016.



**Figura 52:** Hidrograma en el punto de cierre obtenido de la simulación del Evento N°1.



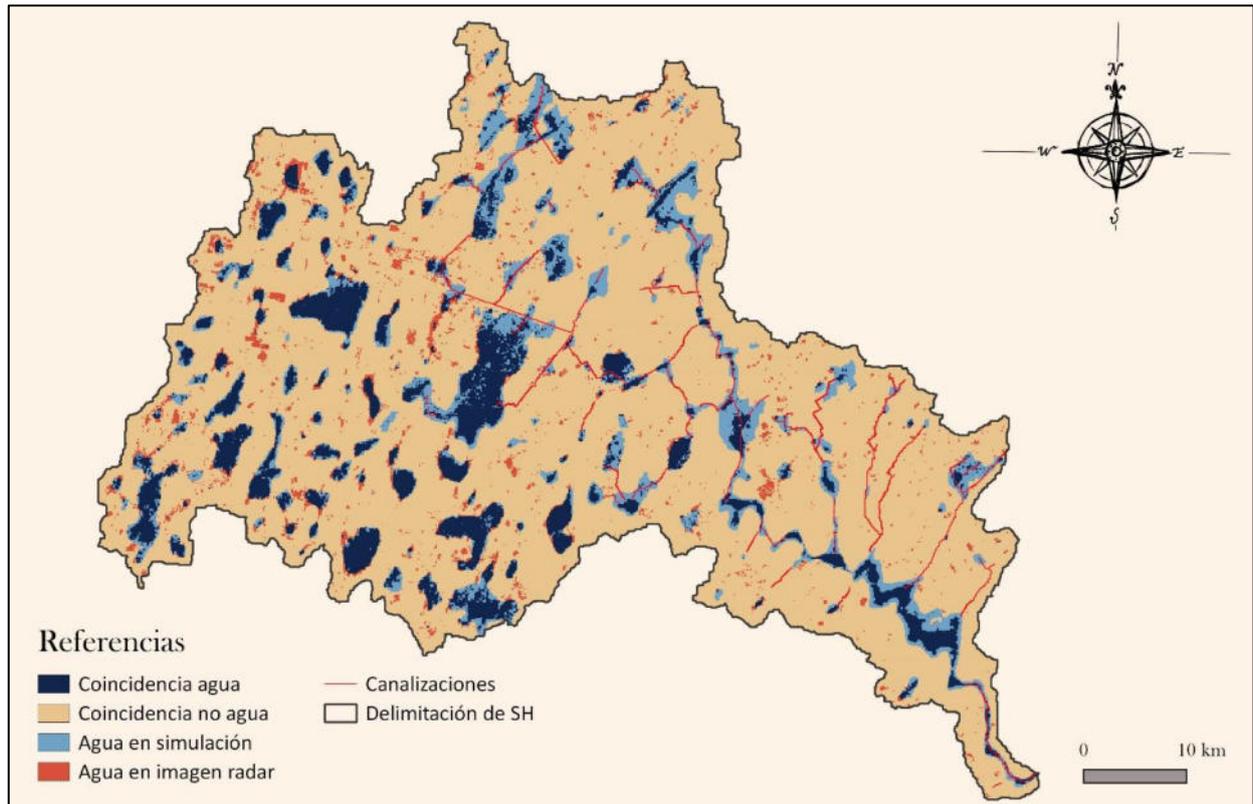
**Figura 53:** Hidrograma en el punto de cierre obtenido de la simulación del Evento N°2.

Como puede observarse en las imágenes 49, 50 y 51; existen algunas subcuencas en las cuales la modelización no presenta un ajuste adecuado conforme la realidad, por lo que resulta necesario realizar la modelización del SH con el agregado de canales existentes, siendo seleccionados primordialmente los pertenecientes a las zonas de menor ajuste.

En la Figura 54 se presentan las canalizaciones designadas para efectuar las modelizaciones. Para una mejor comprensión de la funcionalidad de los mismos, son incluidos los canales a uno de los mapas de contraste, en este caso el de la fecha 14 de enero de 2017.

Con el objeto de lograr alta precisión tanto espacial como del caudal saliente, se realizaron diversas simulaciones del SH con las canalizaciones, en las cuales se variaron los valores de rugosidad de Manning tanto para las canalizaciones como para los valles de inundación. Como puede apreciarse en la Tabla 10, se realizaron simulaciones con diferentes combinaciones de rugosidades en celdas canal y celdas valle, basadas en los rangos numéricos establecidos de acuerdo a las características de las celdas: canales de tierra, serpenteantes y lentos, con pastos y algunas malezas; y planicies de inundación con coberturas desde pastizales hasta cultivos en sus diferentes etapas. (ver Anexo F).

En cuanto a las Figuras 52 y 53 puede observarse que, para estas representaciones del SH sin canalizaciones ni ajustes de los coeficientes de rugosidad, en el evento N°1 se presenta un pico máximo en el escurrimiento de 120 m³/s a las 492 h de iniciada la simulación; y el evento N°2 no presenta casi escurrimiento del agua pluvial, reteniendo lo precipitado dentro del sistema.



**Figura 54:** Mapa de canalizaciones seleccionadas para su incorporación a las simulaciones.

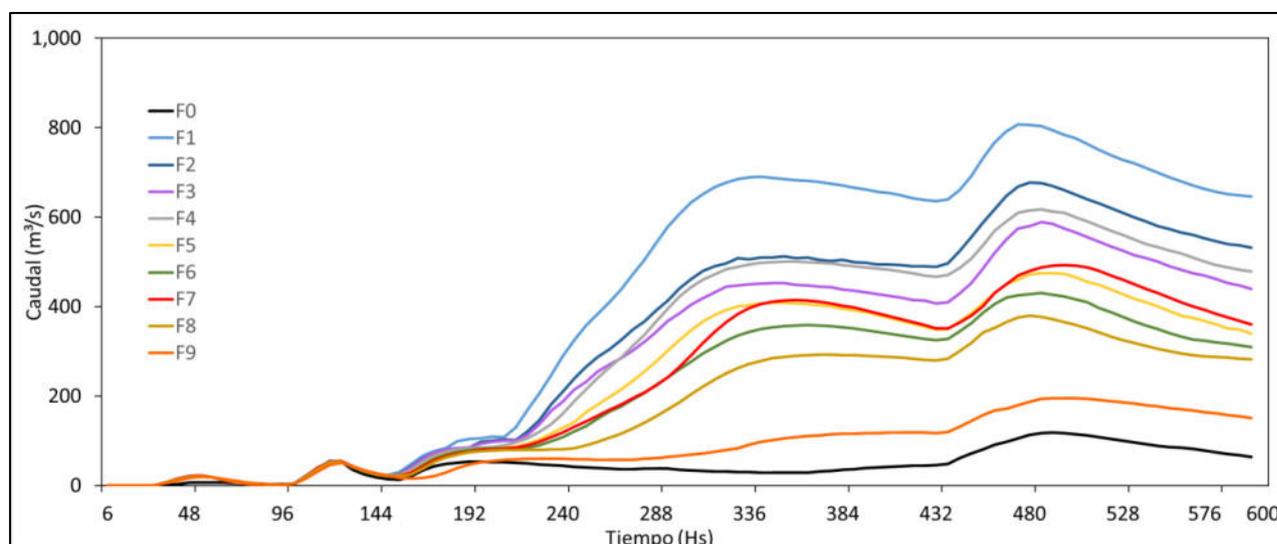
**Tabla 10:** Simulaciones basadas en combinaciones de rugosidades de Manning

Nombre de simulación	Elementos	Rugosidad (Manning)
F0	Río Valle	(sin canalizaciones) 0.0375
F1	Río Valle	0.025 0.030
F2	Río Valle	0.028 0.035
F3	Río Valle	0.030 0.035
F4	Río Valle	0.025 0.0375
F5	Río Valle	0.028 0.0375
F6	Río Valle	0.030 0.0375
F7	Río Valle	0.025 0.040
F8	Río Valle	0.028 0.040
F9	Río Valle	0.033 0.050

Luego de realizadas las nueve simulaciones para el evento N°1 (F0 ya fue realizada con anterioridad) se elaboraron hidrogramas con el fin de analizar el comportamiento del SH frente a diferentes rugosidades y seleccionar la simulación que mejor se ajuste al comportamiento real del mismo.

Como puede apreciarse en la Figura 55, las simulaciones que contienen valores de rugosidad de valle mínimos-medios dentro del rango de las rugosidades consideradas para campos cultivados, en cualquiera de los estados en los que se presente: sin cultivo, cultivos alineados y cultivos maduros (Chow, 2004) son las que producen los mayores picos de caudales a la salida del sistema. Además, las simulaciones que consideran los valores mínimos-medios de rugosidad dentro de la categoría seleccionada de canales excavados con pala con poca vegetación (Chow, 2004) también incrementan dichos valores (ver Anexo F). Esta situación de caudales pico tan elevados no es representativo de la realidad puesto que, si se observa la Figura 44 y el Anexo E, en los cuales se presenta la curva Q vs H de cierre del sistema y el posicionamiento de las alcantarillas, esos caudales pico representarían tirantes superiores a 0.50m de agua sobre la calzada, situación que no ha ocurrido. Por tal motivo, y debido a un mejor ajuste espacial, fueron seleccionadas como más representativas las rugosidades de la simulación F9.

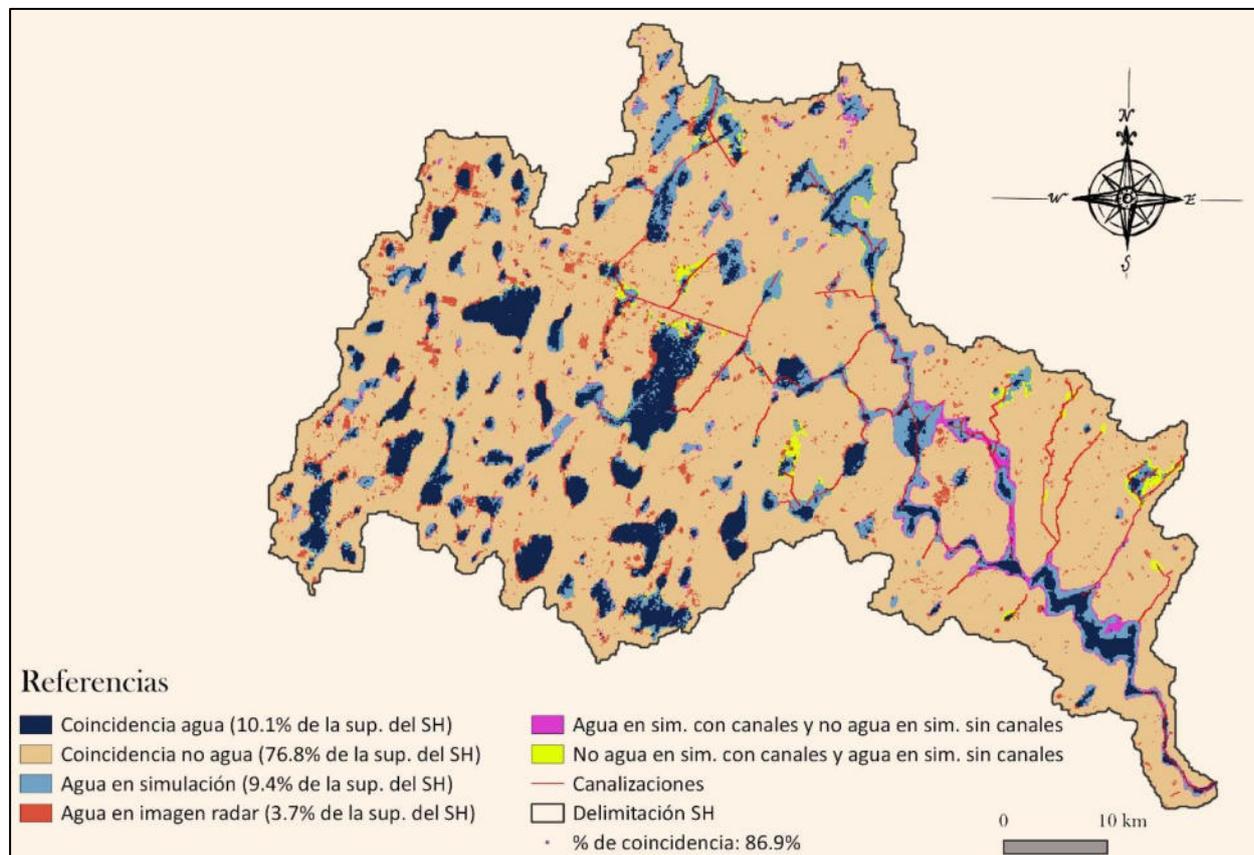
Cabe recordar que los tiempos de traslado de la escorrentía son validados indirectamente, mediante la contrastación de las superficies de agua arrojadas por el software y las presentes en la clasificación de las imágenes satelitales, para diferentes fechas, dentro de la ocurrencia del evento de análisis.



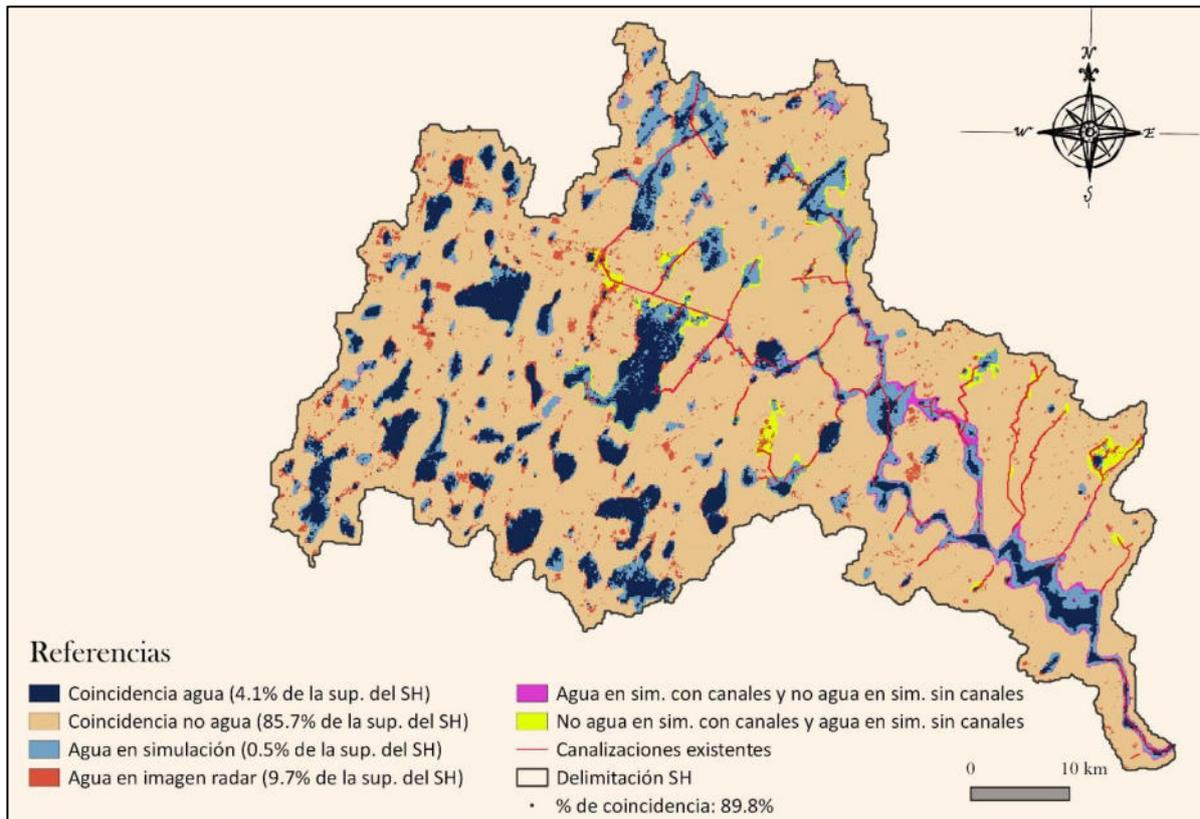
**Figura 55:** Hidrogramas del SH para diferentes rugosidades de Manning.

Las Figuras 56 a 58, corresponden a la respuesta de las calibraciones de las simulaciones para los eventos N°1 y N°2, con las canalizaciones seleccionadas, las rugosidades definidas y; al igual que en las simulaciones sin canalizaciones, el tirante para que una celda sea considerada agua, definido. En las mismas puede apreciarse, además de la clasificación expuesta anteriormente, una nueva categorización la cual se encuentra basada en las diferencias entre la simulación sin canales y la simulación con canales. La misma, hace un discernimiento entre las superficies consideradas como agua en la simulación con canales, y que anteriormente en la simulación sin canales no existían como agua (en color magenta) es decir que desmejoró el ajuste de la simulación puesto que no era agua en realidad; y las superficies que figuraban como agua en la simulación sin canales, y que en la simulación con canales desaparecieron (en color amarillo), resultando una mejora en el ajuste ya que como en el caso anterior, no era agua en la realidad.

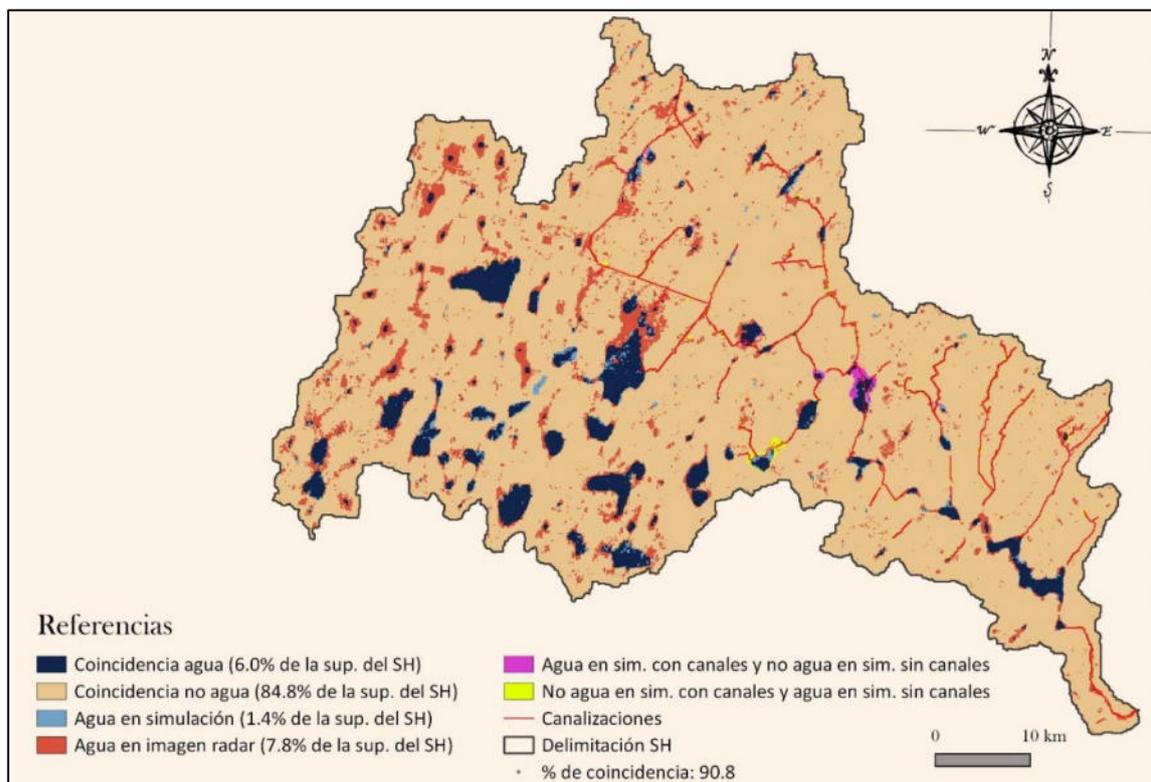
En las Figuras 59 y 60 se presentan los hidrogramas en el punto de cierre del SH, obtenidos de la simulación de los dos eventos, con las canalizaciones anexadas y el ajuste de las rugosidades.



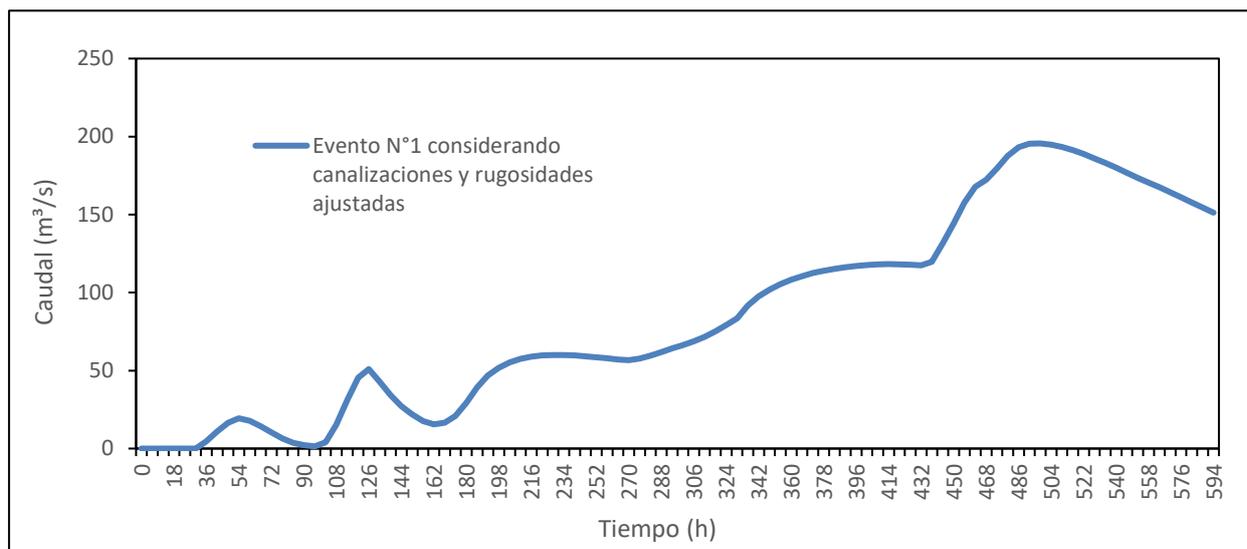
**Figura 56:** Mapa de contraste de respuestas de Evento 1, con canalizaciones y rugosidades ajustadas, para la fecha 02 de enero de 2017.



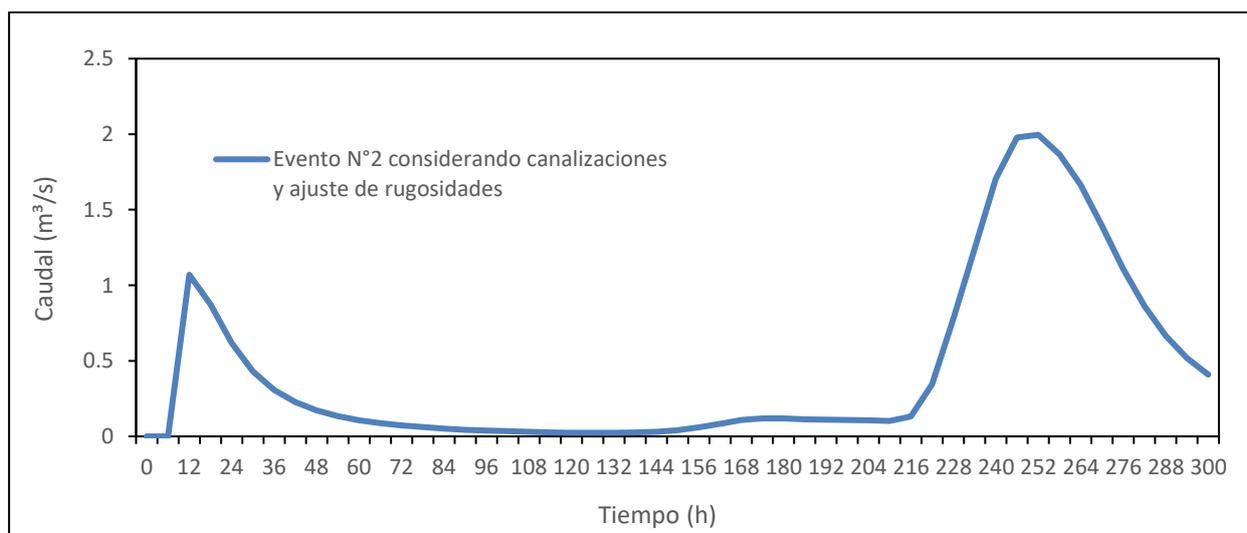
**Figura 57:** Mapa de contraste de respuestas de Evento 1, con canalizaciones y rugosidades ajustadas, para la fecha 14 de enero de 2017



**Figura 58:** Mapa de contraste de respuestas de Evento 2, con canalizaciones y rugosidades ajustadas, para la fecha 22 de octubre de 2016.



**Figura 59:** Hidrograma en punto de cierre obtenido de la simulación calibrada del Evento N°1.



**Figura 60:** Hidrograma en punto de cierre obtenido de la simulación calibrada del Evento N°2.

Como puede apreciarse en las Figuras 56 a 58, en varios sectores en los cuales fueron agregados canales, se notan mejorías. También, se observa que en la zona de escurrimiento más definida que posee el sistema, se presenta un desborde mayor al de la simulación sin considerar canales y, que resulta real de lo acontecido. Conforme a lo observado y de acuerdo con las superficies de cada una de las clases analizadas, se manifiesta que la calibración del sistema y consecuentemente las predicciones del comportamiento del mismo frente a diversos eventos climáticos poseen un grado de certeza superior al 86%.

En cuanto a las Figuras 59 y 60 puede observarse que, para estas representaciones del SH calibradas, en el evento N°1 se presenta un pico máximo en el escurrimiento  $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$  a las 510 h de iniciada la simulación; y el evento N°2 un pico máximo de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  a las 258 h.

En cuanto a los tiempos de respuesta del SH arrojados por el software de simulación hidrológica-hidráulica, si bien los mismos no pudieron ser verificados directamente debido a la inexistencia de lecturas de caudales en el punto de cierre, para dichos eventos; pudieron ser cotejados marginalmente para estas fechas de calibración, mediante la visualización de incrementos y decrementos de las superficies de agua del cauce próximo al punto de cierre a través de las imágenes satelitales correspondientes a dichas fechas de análisis.

## **4.2 APLICACIÓN DE VMMHH 1.0 EN EVENTOS EXTREMOS ANTE CAMBIO CLIMÁTICO**

En este apartado es aplicado el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0 para eventos extremos, de diversas recurrencias, considerando CC. Con el objeto de brindar una lectura más amena, se presentan los siguientes apartados: Definición/ determinación de recurrencias de lluvia/ caudales/ hietogramas (Apartado 4.2.1), Simulación del comportamiento del SH frente a eventos climáticos de diversas recurrencias considerando cambio climático (Apartado 4.2.2), Determinación/ análisis de permanencia de agua en superficie (Apartado 4.2.3), Discusión sobre la delimitación del SH (Apartado 4.2.4) e Identificación de zonas de amenaza, Construcción de Mapas y Contrastación con áreas de riesgo según Ley 11.730 (Apartado 4.2.5).

### **4.2.1 DEFINICIÓN /DETERMINACIÓN DE RECURRENCIAS DE LLUVIA/ CAUDALES/ HIETOGRAMAS**

#### **4.2.1.1 DETERMINACIÓN DE LLUVIAS PARA DIFERENTES RECURRENCIAS**

Para la selección de las recurrencias de precipitaciones se utilizaron las series históricas de la localidad de Venado Tuerto y de Villa Cañas, las cuales ya fueron descritas con anterioridad. Acorde a la escala de trabajo, fueron analizadas las recurrencias de 25, 50 y 100 años; estableciendo como duración de la tormenta (D) 120 h.

Para iniciar con la selección de las recurrencias, se extrajeron de cada año y para cada estación, las precipitaciones máximas de duración igual a 24, 48, 72, 96 y 120 h. Posteriormente, mediante el software de inferencia estadística AFMULTI (Paoli et al., 1996) se realizaron ajustes a las series de precipitaciones máximas conforme los modelos

probabilísticos: LogGauss (Galton), Gumbel, GEV, Pearson, LogPearson y Exponencial, obteniendo así las recurrencias de precipitación. En las Tablas 11 y 12, se presentan las láminas de lluvias máximas anuales de 1 a 5 días de duración, para cada estación, conforme a las distintas recurrencias (25, 50 y 100 años); y distintas Funciones de Densidad de Probabilidad (FDP).

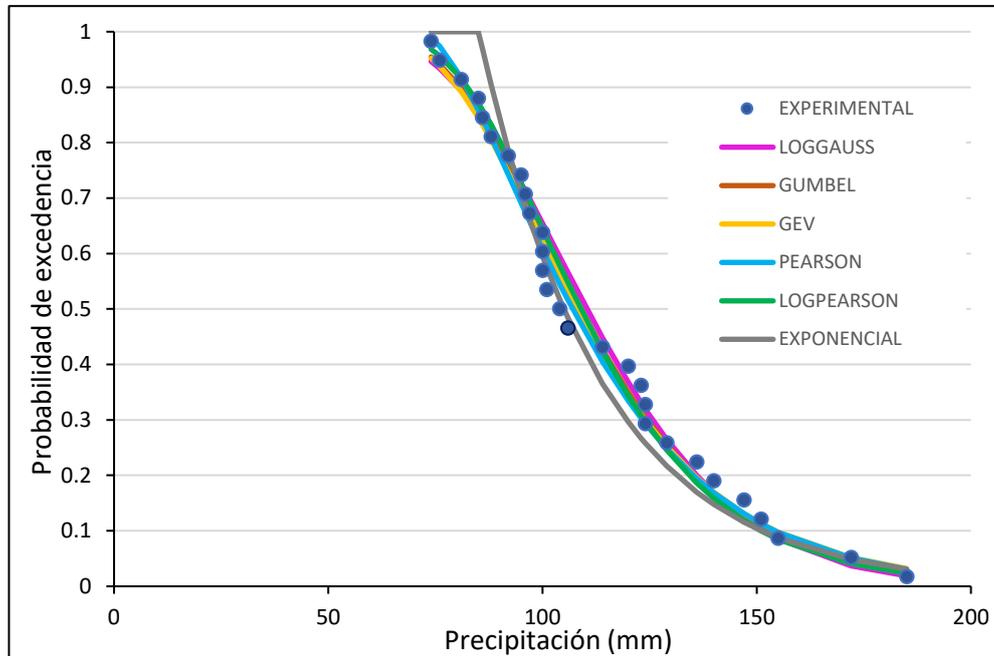
**Tabla 11** Láminas de lluvias máximas anuales conforme distintas FDP, Venado Tuerto.

D (hs)	R (años)	P (mm)					
		LogGauss	Gumbel	GEV	Pearson	LogPearson	Exponencial
24	100	139.1	143.2	152.4	143	147.3	153.1
	50	129	131.6	137.5	131.9	133.5	138.3
	25	118.6	119.8	123.1	120.5	120.2	123.4
48	100	155.8	165.5	155.5	152.9	155.3	172.2
	50	145.7	152.5	146.7	143.9	145.4	156.6
	25	135.3	139.5	137.1	134.4	135.2	140.9
72	100	170.2	179	170.6	165.1	170.1	188.1
	50	159	165	160.3	155.6	158.9	170.8
	25	147.4	150.9	149.2	145.5	147.4	153.5
96	100	183.7	196.4	194.1	197.7	187	203.2
	50	172.3	181.3	180.6	182.8	174.2	185.1
	25	160.4	166	166.5	167.5	161.3	167
120	100	196.6	207.8	217.1	212.8	204.8	217.3
	50	183.8	191.5	197.8	195.7	188.5	197.4
	25	170.5	175	179	178.2	172.4	177.5

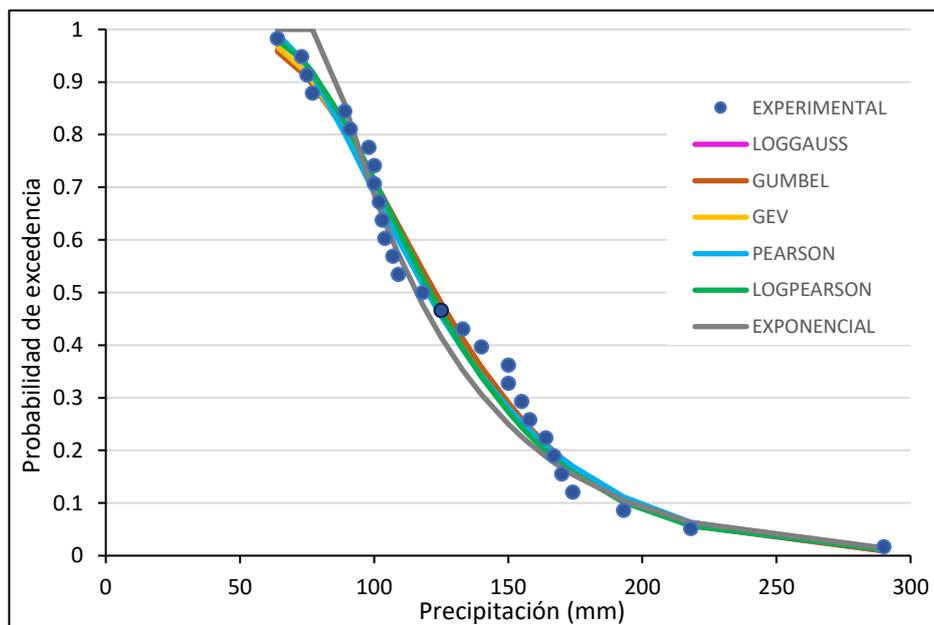
**Tabla 12:** Láminas de lluvias máximas anuales, conforme distintas FDP, Villa Cañas.

D (hs)	R (años)	P (mm)					
		LogGauss	Gumbel	GEV	Pearson	LogPearson	Exponencial
24	100	171	181.6	161.4	165.6	163.1	187.9
	50	158	165.8	153.2	154.9	153.3	169.2
	25	144.7	150	143.7	143.4	142.6	150.5
48	100	216.3	220.9	229.2	214.7	220.6	235.3
	50	197.3	200.7	206.2	196.9	199.6	210.1
	25	178.2	180.4	183.5	178.5	178.9	185
72	100	231.2	242	233.3	228.8	229.2	253.1
	50	212.6	220.6	215.8	211.8	211.5	227.2
	25	193.7	199	197.3	193.9	193.3	201.4
96	100	273.3	275.4	294.3	267.6	281.1	295.7
	50	248	249.6	261.3	244.8	251.9	263.2
	25	222.5	223.6	229.7	221.1	223.6	230.8
120	100	286.4	286.7	306.5	294.3	296.3	309.2
	50	259.3	259.6	271.8	266.1	264.2	274.9
	25	232.1	232.4	238.7	237.3	233.3	240.6

Con motivo de obtener el modelo de predicción de mejor ajuste a las series de estudio, en las Figuras 61 y 62 se presentan gráficos de probabilidad de excedencia, para ambas estaciones, en la duración de 120 h. Las demás gráficas son presentadas en Anexo G.



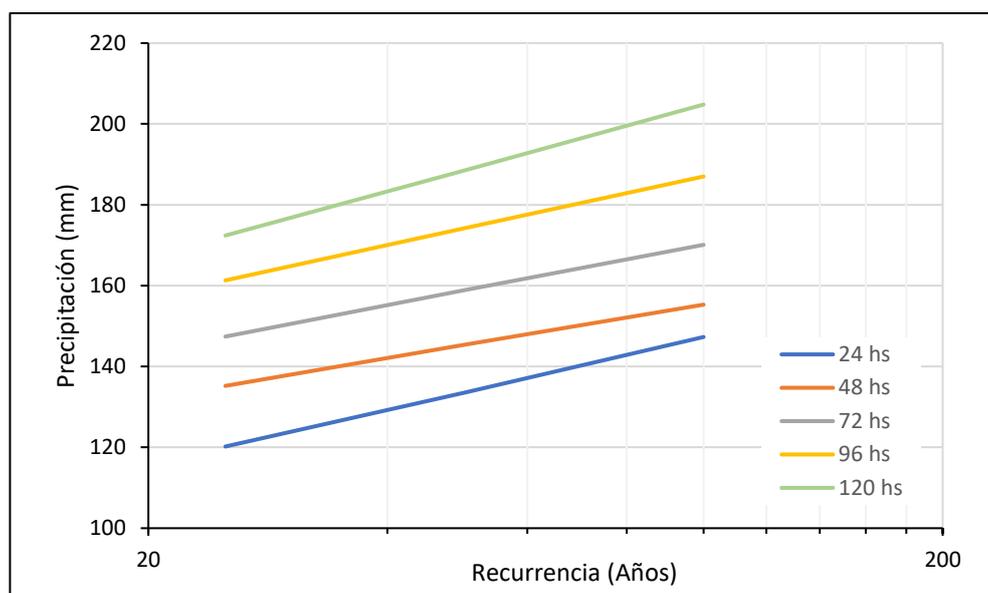
**Figura 61:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones  $D = 120$  h para la estación Venado Tuerto.



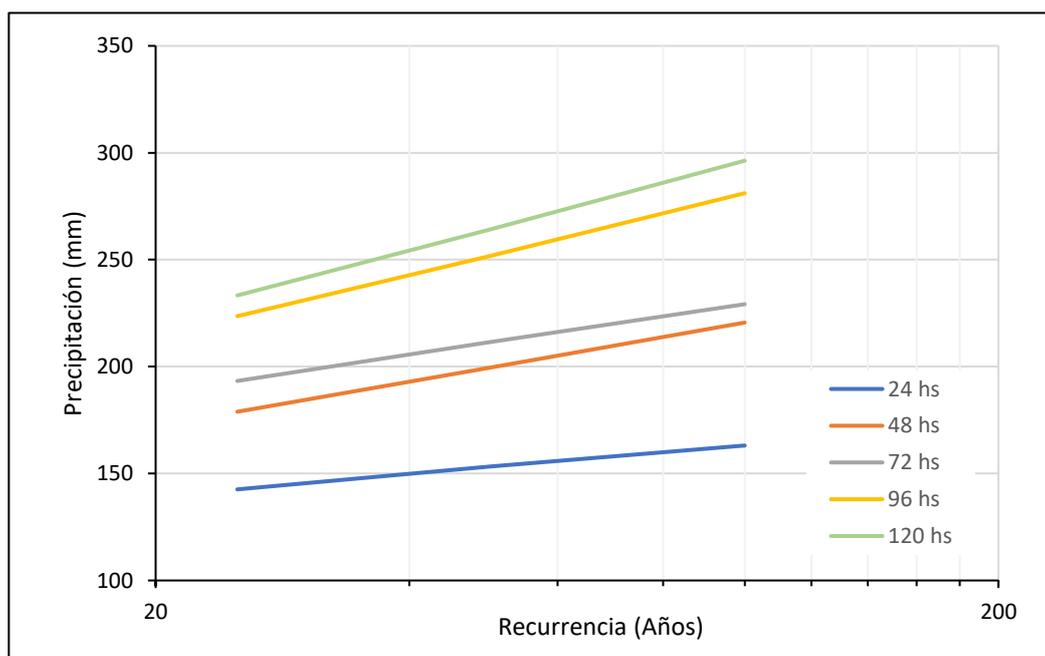
**Figura 62:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones  $D = 120$  h, para la estación Villa Cañás.

Conforme las pruebas de bondad de ajuste realizadas, las cuales se encuentran en el Anexo H, todos los modelos son considerados como válidos; pero con motivo de seleccionar uno de los mismos, para realizar las curvas Precipitación-Duración-Recurrencia (PDR) y posteriormente realizar los hietogramas de análisis, se ha escogido el modelo de LogPearson, el cual presenta un mejor ajuste de manera general para las distintas recurrencias y duraciones.

A continuación, en las Figuras 63 y 64, se presentan las curvas PDR para las estaciones de análisis, con los valores obtenidos mediante el modelo LogPearson.



**Figura 63:** Curvas P-D-R para la estación Venado Tuerto.

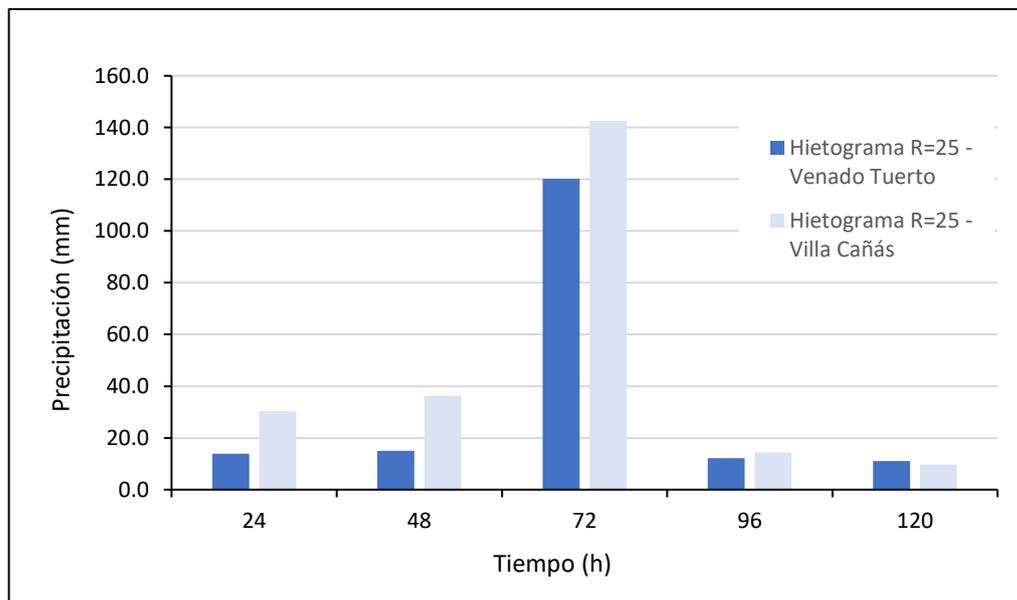


**Figura 64:** Curvas P-D-R para la estación Villa Cañás.

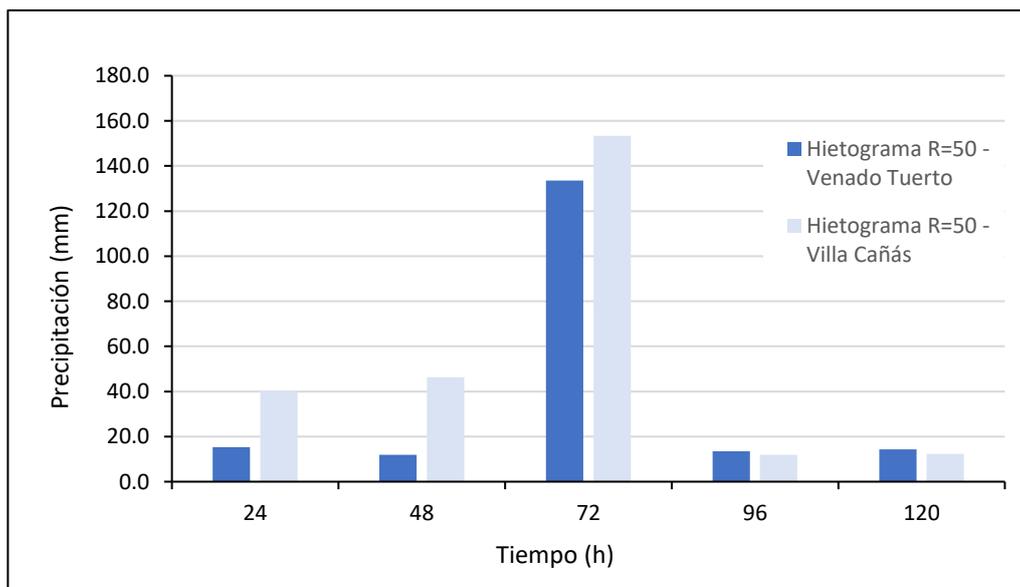
#### 4.2.1.2 HIETOGRAMAS DE LLUVIA PARA DISTINTAS RECURRENCIAS CONSIDERANDO CAMBIO CLIMÁTICO

Para la confección de los hietogramas de lluvia para distintas recurrencias considerando CC es utilizado el método de bloques alternos (Orsolini, 2008). En el mismo, son utilizadas las curvas P-D-R presentadas anteriormente.

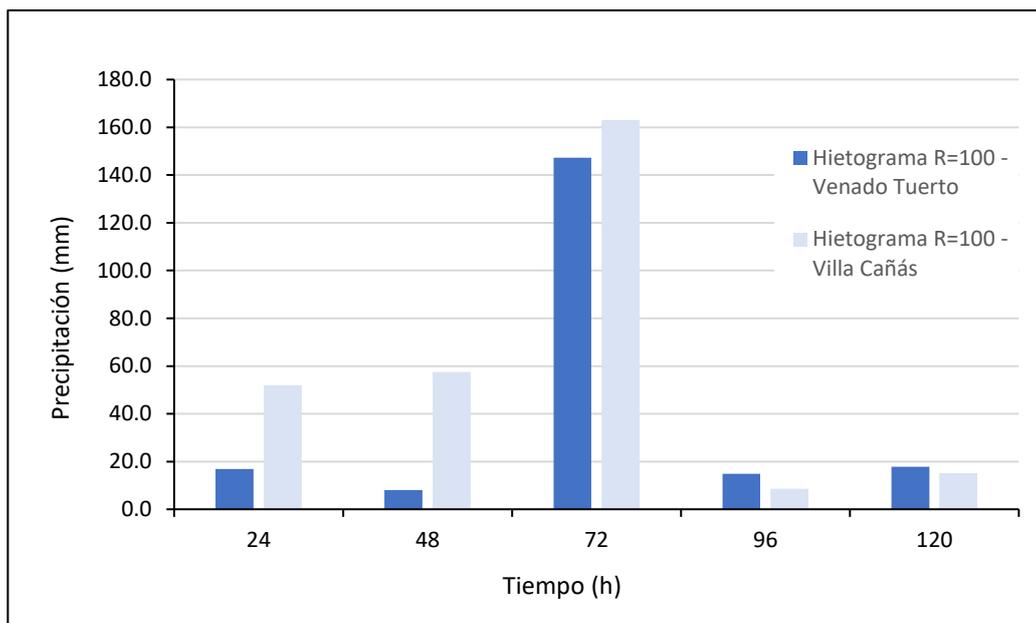
En las Figuras 65 a 67 se muestran los hietogramas de diseño de ambas estaciones, para las tres recurrencias de análisis.



**Figura 65:** Hietograma con R=25 años para las estaciones Venado tuerto y Villa Cañás.



**Figura 66:** Hietograma con R=50 años para las estaciones Venado tuerto y Villa Cañás.



**Figura 67:** Hietograma con R=100 años para las estaciones Venado tuerto y Villa Cañas.

Posteriormente, en dichos hietogramas se aplicaron coeficientes de incremento de precipitación, los cuales fueron adjudicados a cada uno de los barros de lluvias diarias, para las recurrencias de análisis de ambas estaciones. Los coeficientes aplicados fueron de 1.06, 1.10, 1.20 y 1.30; pretendiendo abarcar con éstos, la variación del efecto de CC producto de diversos escenarios. A los fines de clarificar, se presenta la Tabla 13.

**Tabla 13:** Precipitaciones máximas de 5 días de duración en Estaciones: Venado Tuerto (VT) y Villa Cañas (VC), para distintas recurrencias (R), considerando situación sin cambio (Escenario ECC0) y con CC (ECC1 a 4).

Escenario	Warming (°C)	Coef.CC (**)	R=25 años		R=50 años		R=100 años	
			Est. VT	Est. VC	Est. VT	Est. VC	Est. VT	Est. VC
ECC0 (*)	0.0	1.00	172	233	189	264	205	296
ECC1	1.5	1.06	183	247	200	280	217	314
ECC2	2.0	1.10	190	257	207	291	225	326
ECC3	3.0	1.20	207	280	226	317	246	356
ECC4	4.0	1.30	224	303	245	343	266	385

(\*) sin cambio

(\*\*) CMIP6-Coupled Model Intercomparison Project Fase 6 (IPCC AR6-WG1, 2021a). Sur-Este de América del Sur.

Para finalizar, fue realizado el cálculo de las precipitaciones netas en el SH para las distintas recurrencias y condiciones de CC, según procedimientos (Zimmermann y Orsolini, 2008), conforme dos condiciones de estado del terreno: Por un lado, con los CN's normales a la temporada verano (calculados en el Apartado 4.1.1.2.4), que es donde se producen los registros más copiosos de lluvias en la región de estudio; y por otro lado, bajo una condición de suelo cuasi-saturado (CN=95) para todo el sistema; aclarando que los CN corresponden a un valor medio ponderado para todo el evento. En las Figuras 68, 70, 72, 74, 76 y 78 se presentan los hietogramas netos para las recurrencias de 25, 50 y 100 años, conforme los distintos escenarios planteados.

#### **4.2.2 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SH FRENTE A EVENTOS CLIMÁTICOS DE DIVERSAS RECURRENCIAS CONSIDERANDO CAMBIO CLIMÁTICO**

En este Apartado, es simulado el comportamiento del SH de estudio para recurrencias de 25, 50 y 100 años. La información de entrada resulta la misma que fue utilizada en el período de calibración (alturas del terreno, canales, características de canales y condición de borde), pero las alturas iniciales de agua en las celdas (para las celdas que representan lagunas) fueron utilizados valores correspondientes a un estado habitual de las lagunas; conforme la metodología explicada en el apartado anterior. En cuanto a la condición de humedad del suelo, se realizaron simulaciones conforme dos condiciones de valor medio ponderado para todo el evento: normales (Condición II, ver Apartado 4.1.1.2.4) y cuasi-saturados (Condición III, CN=95). Además, fueron realizadas simulaciones para estas tres recurrencias considerando diversos coeficientes de CC. En los siguientes Apartados, son presentados los efectos de dichos escenarios de CC, conforme las diferentes recurrencias de precipitaciones de análisis.

En la Tabla 14, a modo resumen se presentan las precipitaciones totales y netas de las estaciones VT y VC, para cada recurrencia y escenario de análisis.

**Tabla 14:** Resumen de precipitaciones conforme distintas recurrencias, escenarios de CC y condiciones de humedad antecedentes de suelo.

Estación	Recurrencia	Escenario (Coef.CC)	Lluvia total (mm)	Lluvia neta (mm) (Cond. normal)	Lluvia neta (mm) (Cond. cuasi-saturado)
VT	25	1.00	172	101	157
		1.06	183	109	168
		1.10	190	115	174
		1.20	207	129	192
		1.30	224	144	209
VC	25	1.00	233	156	218
		1.06	247	168	232
		1.10	257	177	241
		1.20	280	197	265
		1.30	303	218	288
VT	50	1.00	189	113	173
		1.06	200	122	185
		1.10	207	128	192
		1.20	226	144	211
		1.30	245	160	230
VC	50	1.00	264	182	249
		1.06	280	196	265
		1.10	291	205	275
		1.20	317	229	302
		1.30	343	253	328
VT	100	1.00	205	125	190
		1.06	217	135	202
		1.10	225	142	210
		1.20	246	160	230
		1.30	266	178	251
VC	100	1.00	296	209	281
		1.06	314	225	299
		1.10	326	236	310
		1.20	356	263	340
		1.30	385	291	370

#### 4.2.2.1 RECURRENCIA DE VEINTICINCO AÑOS

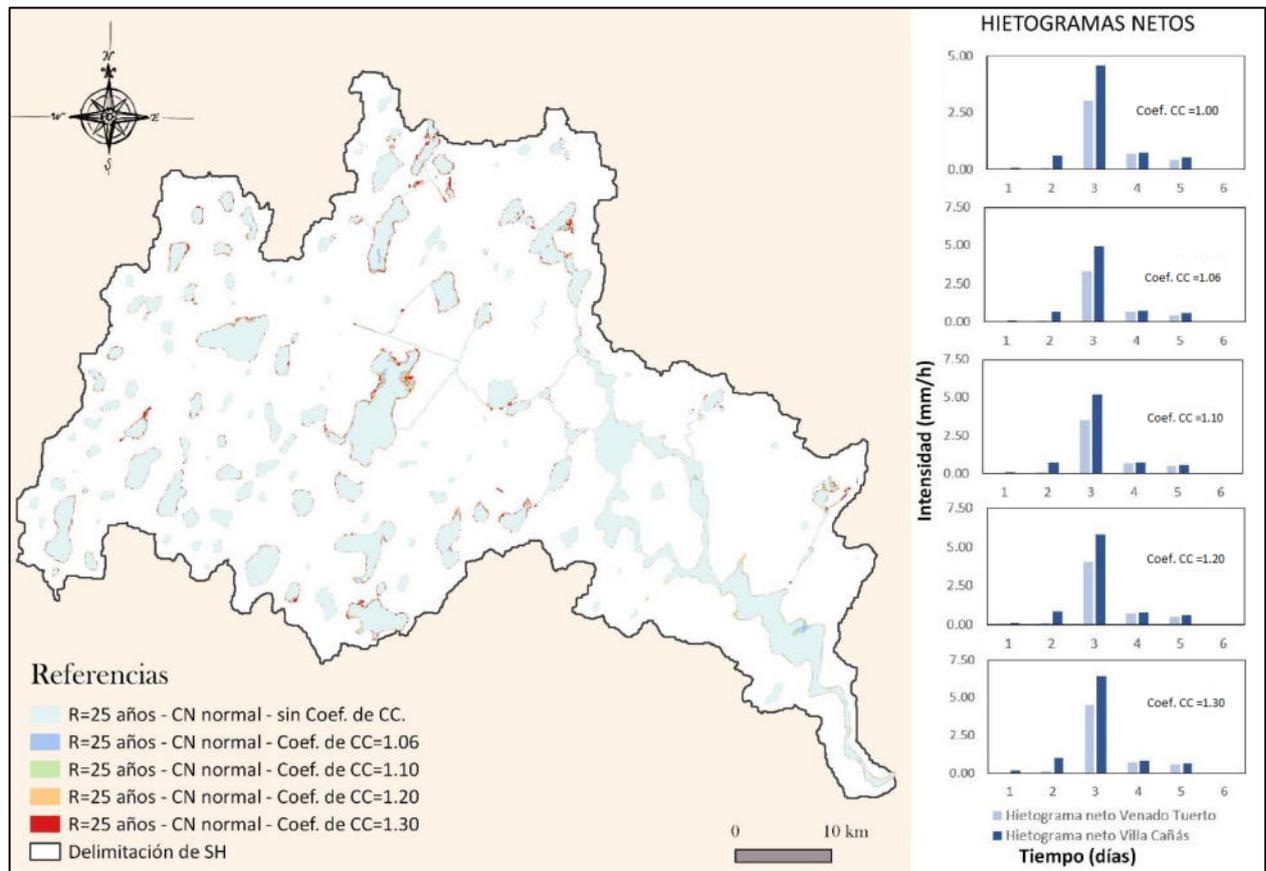
La simulación del comportamiento del SH frente a precipitaciones de recurrencia de 25 años, arrojó como resultado 45,236 ha de superficie cubiertas por agua para condiciones normales de la capacidad absorción (condición II) y 53,709 ha para la condición de suelo cuasi saturado (CN=95); con un 4.7% y un 10.2%, respectivamente, del volumen entrante escurrido a los 12 días de iniciado el evento. En cuanto a las simulaciones considerando los incrementos de precipitación por CC, se registraron diversas variaciones superficiales, las cuales son expuestas en las Tablas 15 y 17 y de volúmenes expresados en las Tablas 16 y 18. Además, en las Figuras 68, 69, 70 y 71; se exponen las distribuciones en el territorio de dichas variaciones de agua en superficie y los hidrogramas en el punto de cierre, para los diferentes escenarios.

**Tabla 15:** Variación de agua en superficie para una recurrencia de 25 años en condiciones de absorción de suelo normales, conforme escenarios de CC.

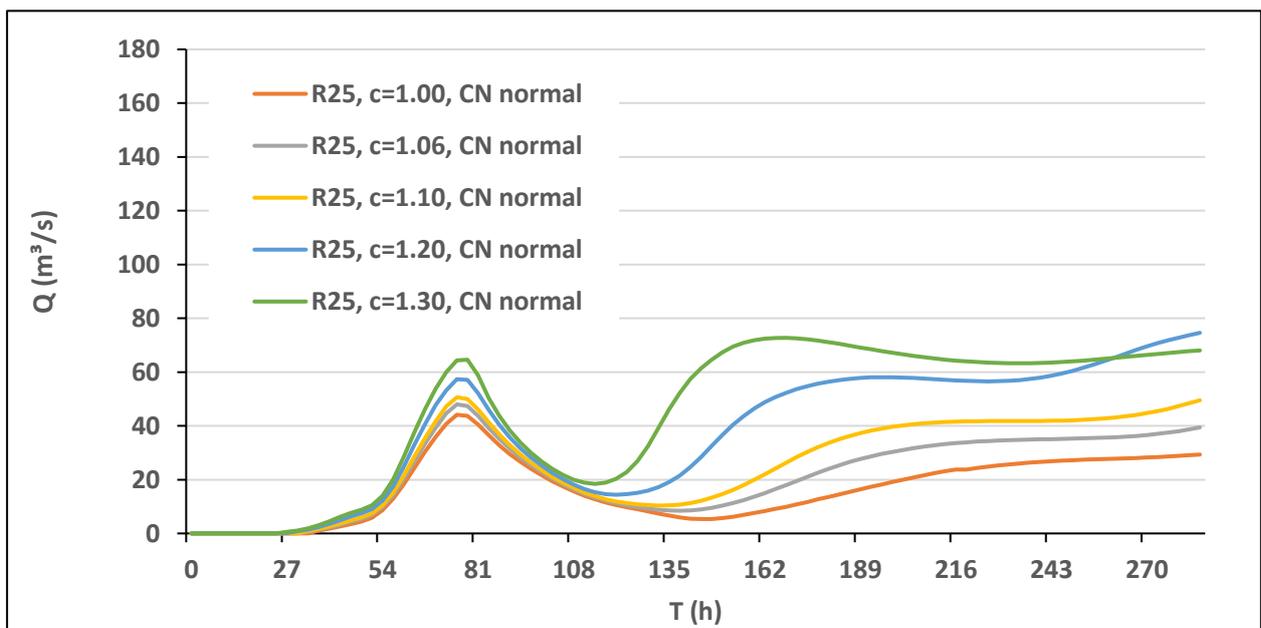
Escenario	Sup. con agua (ha)	% de incremento de agua respecto a sim. sin CC	% de sup. con agua respecto a sup. del SH
R25, CN normal – Sin Coef. CC	45,236	0.00	13.97
R25, CN normal - Coef. CC 1.06	46,896	3.67	14.48
R25, CN normal - Coef. CC 1.10	47,923	5.94	14.80
R25, CN normal - Coef. CC 1.20	50,270	11.13	15.53
R25, CN normal - Coef. CC 1.30	51,389	13.60	15.87

**Tabla 16:** Resumen de volúmenes intervinientes para R=25 años, CN=normal.

Escenario	Vol. inicial en lagunas (Hm <sup>3</sup> )	Vol. entrante de precipitación (P) (Hm <sup>3</sup> )	Vol. saliente (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Remante (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Entrante P/ Vol. Saliente (%)
R25, CN=normal - Sin CC	169.3	372.0	17.5	523.8	4.7
R25, CN=normal - Coef. CC 1.06	169.3	414.0	22.6	560.7	5.5
R25, CN=normal - Coef. CC 1.10	169.3	421.6	27.1	563.8	6.4
R25, CN=normal - Coef. CC 1.20	169.3	472.4	30.9	610.8	6.5
R25, CN=normal - Coef. CC 1.30	169.3	501.3	33.8	636.8	6.7



**Figura 68:** Variación de la superficie cubierta por agua para R=25 años y CN de suelo normales, de acuerdo con los diferentes escenarios de CC.



**Figura 69:** Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 25 años, conforme diferentes coeficientes de CC.

**Tabla 17:** Variación de agua en superficie para una recurrencia de 25 años en condiciones de absorción de suelo cuasi saturado, conforme escenarios de CC.

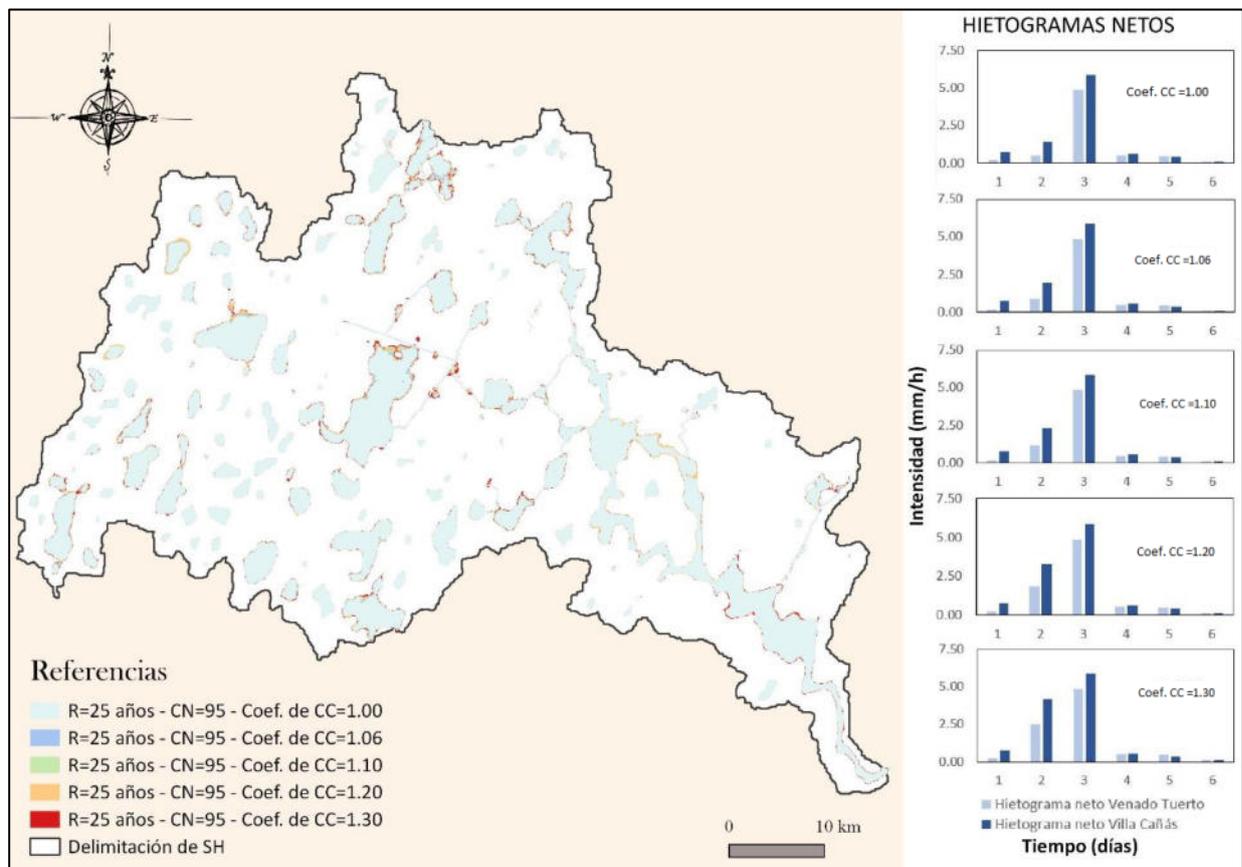
Escenario	Sup. Con agua (ha)	% de incremento de agua respecto a sim. sin CC	% de sup. con agua respecto a sup. del SH
R25, CN=95 - Sin CC	53,709	0.00	16.59
R25, CN=95 - Coef. CC 1.06	54,325	1.15	16.78
R25, CN=95 - Coef. CC 1.10	55,444	3.23	17.12
R25, CN=95 - Coef. CC 1.20	58,388	8.71	18.03
R25, CN=95 - Coef. CC 1.30	60,267	12.21	18.61

**Tabla 18:** Resumen de volúmenes intervinientes para R=25 años, CN=cuasi-saturado.

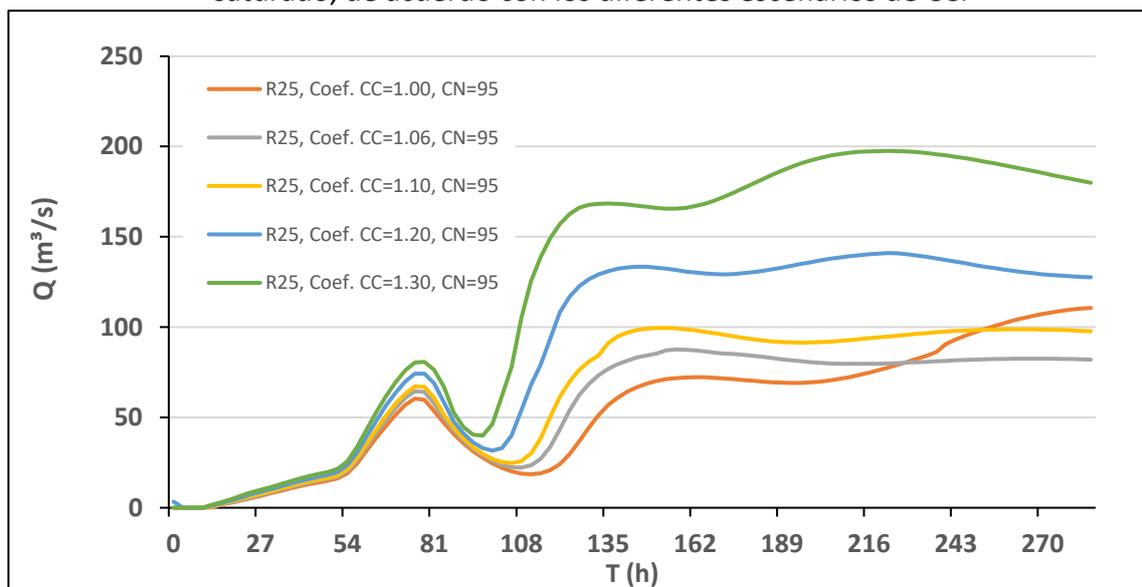
Escenario	Vol. inicial en lagunas (Hm <sup>3</sup> )	Vol. entrante de precipitación (P) (Hm <sup>3</sup> )	Vol. saliente (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Remante (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Entrante P/ Vol. Saliente (%)
R25, CN=95 - Sin CC	169.3	557.3	56.6	670	10.2
R25, CN=95 - Coef. CC 1.06	169.3	593.4	59.1	703.6	10.0
R25, CN=95 - Coef. CC 1.10	169.3	618.4	68.3	719.4	11.0
R25, CN=95 - Coef. CC 1.20	169.3	683.3	94.32	758.28	13.8
R25, CN=95 - Coef. CC 1.30	169.3	737.7	128.9	778.1	17.5

Como puede observarse, para condiciones de capacidad de absorción de suelo normales considerando CC, el incremento de agua superficial llega a alcanzar, para los escenarios más desfavorables, aproximadamente un 13.6% más respecto a la superficie de agua sin considerar CC; en cambio, en condiciones de suelo cuasi-saturadas el incremento respecto a una simulación sin CC es del 12.2%. Con respecto a volúmenes escurridos considerando el peor escenario de CC, en condiciones normales del suelo llega a alcanzar el 6.7%, y un 17.5% en condiciones de suelo cuasi saturado. En cuanto al incremento del porcentaje de superficie cubierta con agua respecto la superficie del SH, para condiciones de suelo normales respecto del peor escenario alcanza un 15.87% y para condiciones de suelo cuasi-saturado un 18.61%. En cuanto a los caudales pico, para condiciones de suelo normales se observa que al no considerar CC los mismos rondan en 40 m<sup>3</sup>/s, y considerando los coeficientes de CC más desfavorables, duplican dicho valor. Para los caudales pico en condiciones de suelo cuasi-

saturado sin CC se tienen valores del orden de los 100 m<sup>3</sup>/s y, considerando los coeficientes por CC más desfavorables, del orden de los 200 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 70:** Variación de la superficie cubierta por agua para R=25 años y CN de suelo cuasi saturado, de acuerdo con los diferentes escenarios de CC.



**Figura 71:** Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 25 años con condiciones de suelo cuasi-saturado, conforme diferentes Coef. de CC.

#### 4.2.2.2 RECURRENCIA DE CINCUENTA AÑOS

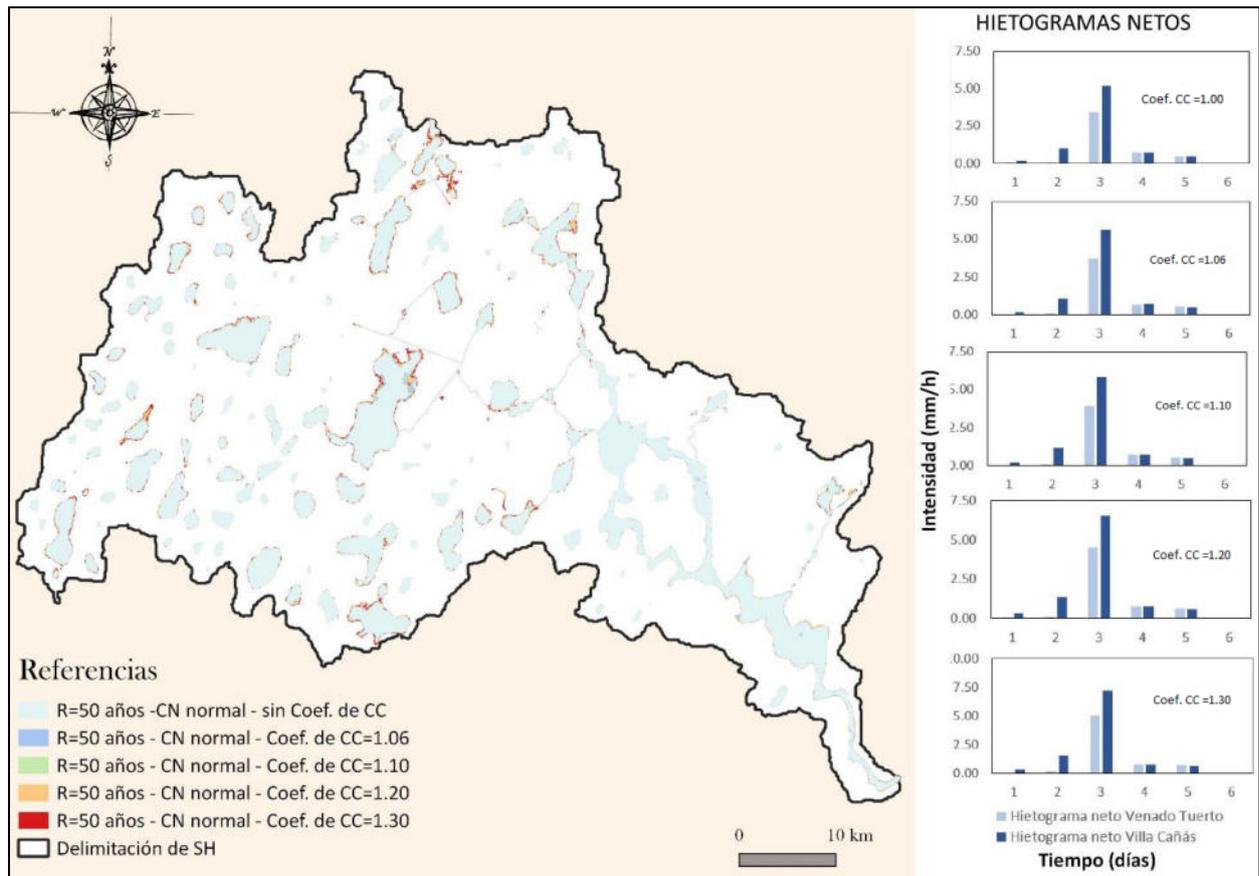
El análisis del comportamiento del SH frente a precipitaciones de recurrencia de 50 años, da como resultado 47,498 ha de superficie cubiertas por agua para condiciones normales de la capacidad absorción y 55,602 ha para la condición de suelo cuasi saturado; con un 7.1% y un 12.5%, respectivamente, del volumen entrante escurrido a los 12 días de iniciado el evento, según Tablas 20 y 22. En las Tablas 19 a 22 y Figuras 72, 73, 74 y 75; se muestran las variaciones de superficie y caudales por CC, tal como en el Apartado anterior.

**Tabla 19:** Variación de agua en superficie para una recurrencia de 50 años en condiciones de absorción de suelo normal, conforme escenarios de CC.

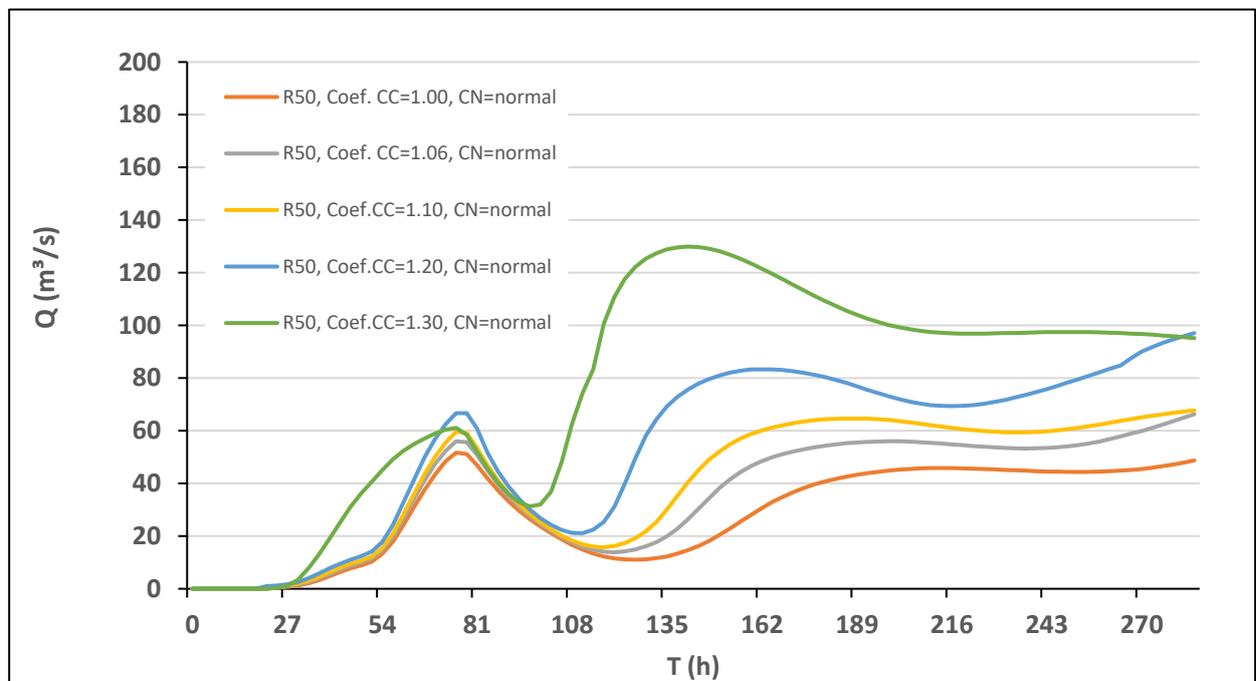
Escenario	Sup. Con agua (ha)	% de incremento de agua respecto a sim. sin CC	% de sup. con agua respecto a sup. del SH
R50, CN normal - Sin Coef. CC	47,498	0.00	14.67
R50, CN normal -Coef. CC 1.06	49,119	3.41	15.20
R50, CN normal -Coef. CC 1.10	49,709	4.65	15.35
R50, CN normal -Coef. CC 1.20	52,358	10.23	16.17
R50, CN normal -Coef. CC 1.30	53826	13.32	16.62

**Tabla 20:** Resumen de volúmenes intervinientes para R=50 años, CN=normal.

Escenario	Vol. inicial en lagunas (Hm <sup>3</sup> )	Vol. entrante de precipitación (P) (Hm <sup>3</sup> )	Vol. saliente (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Remante (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Entrante P/ Vol. Saliente (%)
R50, CN=normal - Sin CC	169.3	419.0	29.8	558.5	7.1
R50, CN=normal - Coef. CC 1.06	169.3	453.1	37.5	584.9	8.3
R50, CN=normal - Coef. CC 1.10	169.3	475.7	42.7	602.3	9.0
R50, CN=normal - Coef. CC 1.20	169.3	534.8	55.9	648.2	10.5
R50, CN=normal - Coef. CC 1.30	169.3	598.6	79.4	688.5	13.3



**Figura 72:** Variación de la superficie cubierta por agua para R=50 años y CN de suelo normales, de acuerdo con diferentes escenarios de CC.



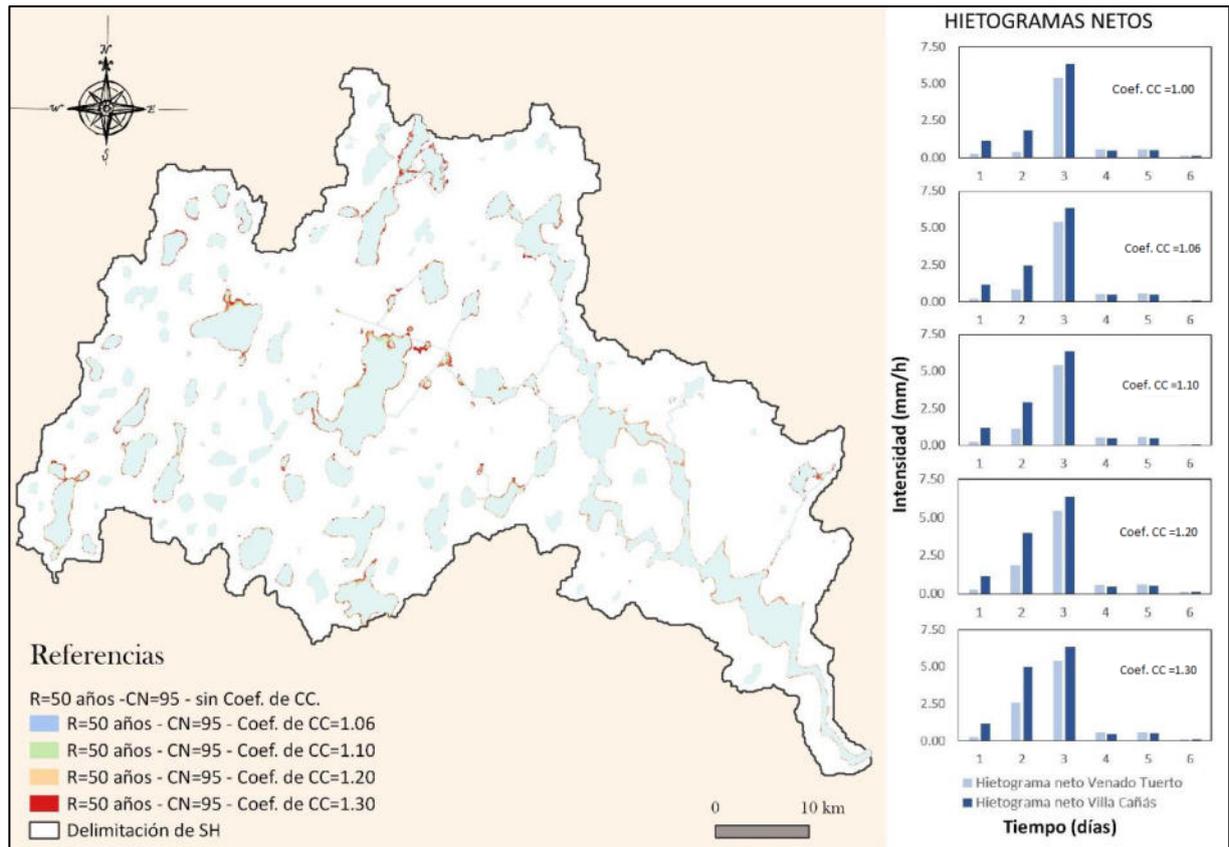
**Figura 73:** Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 50 años con condiciones de suelo normales, conforme diferentes coeficientes de CC.

**Tabla 21:** Variación de agua en superficie para una recurrencia de 50 años en condiciones de absorción de suelo cuasi saturado, conforme escenarios de CC.

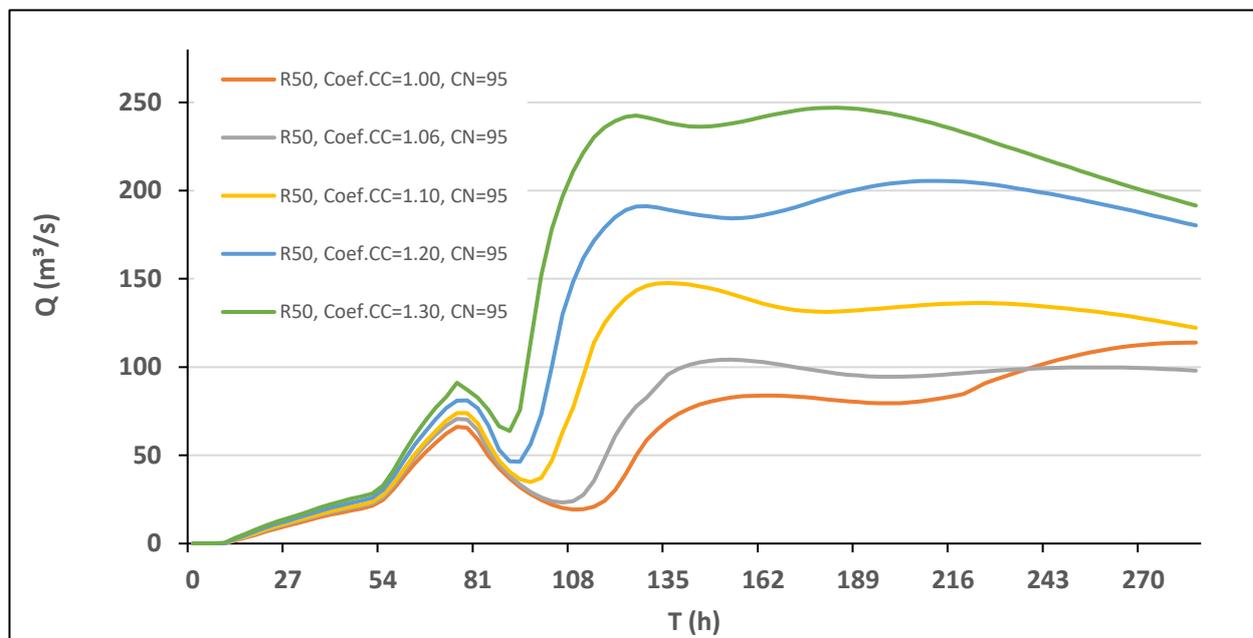
Escenario	Sup. Con agua (ha)	% de incremento de agua respecto a sim. sin CC	% de sup. con agua respecto a sup. del SH
R50, CN=95 - Sin Coef. CC	55,602	0	17.17
R50, CN=95 - Coef. CC 1.06	56,757	2.08	17.53
R50, CN=95 - Coef. CC 1.10	57,709	3.79	17.82
R50, CN=95 - Coef. CC 1.20	60,541	8.88	18.70
R50, CN=95 - Coef. CC 1.30	62,396	12.22	19.27

**Tabla 22:** Resumen de volúmenes intervinientes para R=50 años, CN=cuasi saturado.

Escenario	Vol. inicial en lagunas (Hm <sup>3</sup> )	Vol. entrante de precipitación (P) (Hm <sup>3</sup> )	Vol. saliente (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Remante (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Entrante P/ Vol. Saliente (%)
R50, CN=95 - Sin CC	169.3	620.9	77.8	712.4	12.5
R50, CN=95 - Coef. CC 1.06	169.3	660.6	96.8	733.1	14.7
R50, CN=95 - Coef. CC 1.10	169.3	687.6	98.1	758.8	14.3
R50, CN=95 - Coef. CC 1.20	169.3	753.6	139.61	783.29	18.5
R50, CN=95 - Coef. CC 1.30	169.3	820.5	168.2	821.6	20.5



**Figura 74:** Variación de la superficie cubierta por agua para R=50 años y CN de suelo casi saturado, de acuerdo con los diferentes escenarios de CC.



**Figura 75:** Variación de la superficie cubierta por agua para R=50 años y CN de suelo casi saturado, de acuerdo con los diferentes escenarios de CC.

Se observa que, para condiciones de capacidad de absorción de suelo normales considerando CC, el incremento de agua superficial llega a alcanzar, para los escenarios más desfavorables, aproximadamente un 14% más respecto a la superficie de agua sin considerar CC; en cambio, en condiciones de suelo cuasi-saturadas el incremento respecto a una simulación sin CC es del 12.22%. Con respecto a volúmenes escurridos considerando el peor escenario de CC, en condiciones normales del suelo llega a alcanzar el 13.3%, y un 20.5% en condiciones de suelo cuasi saturado. En cuanto al incremento del porcentaje de superficie cubierta con agua respecto la superficie del SH, para condiciones de suelo normales respecto del peor escenario alcanza un 16.62% y para condiciones de suelo cuasi-saturado un 19.27%. En cuanto a los caudales pico, para condiciones de suelo normales se observa que al no considerar CC los mismos rondan en 60 m<sup>3</sup>/s, y considerando los coeficientes de CC más desfavorables, duplican dicho valor. Para los caudales pico en condiciones de suelo cuasi-saturado sin CC se tienen valores del orden de los 120 m<sup>3</sup>/s y, considerando los coeficientes por CC más desfavorables, del orden de los 250 m<sup>3</sup>/s.

#### **4.2.2.3 RECURRENCIA DE CIENTO AÑOS**

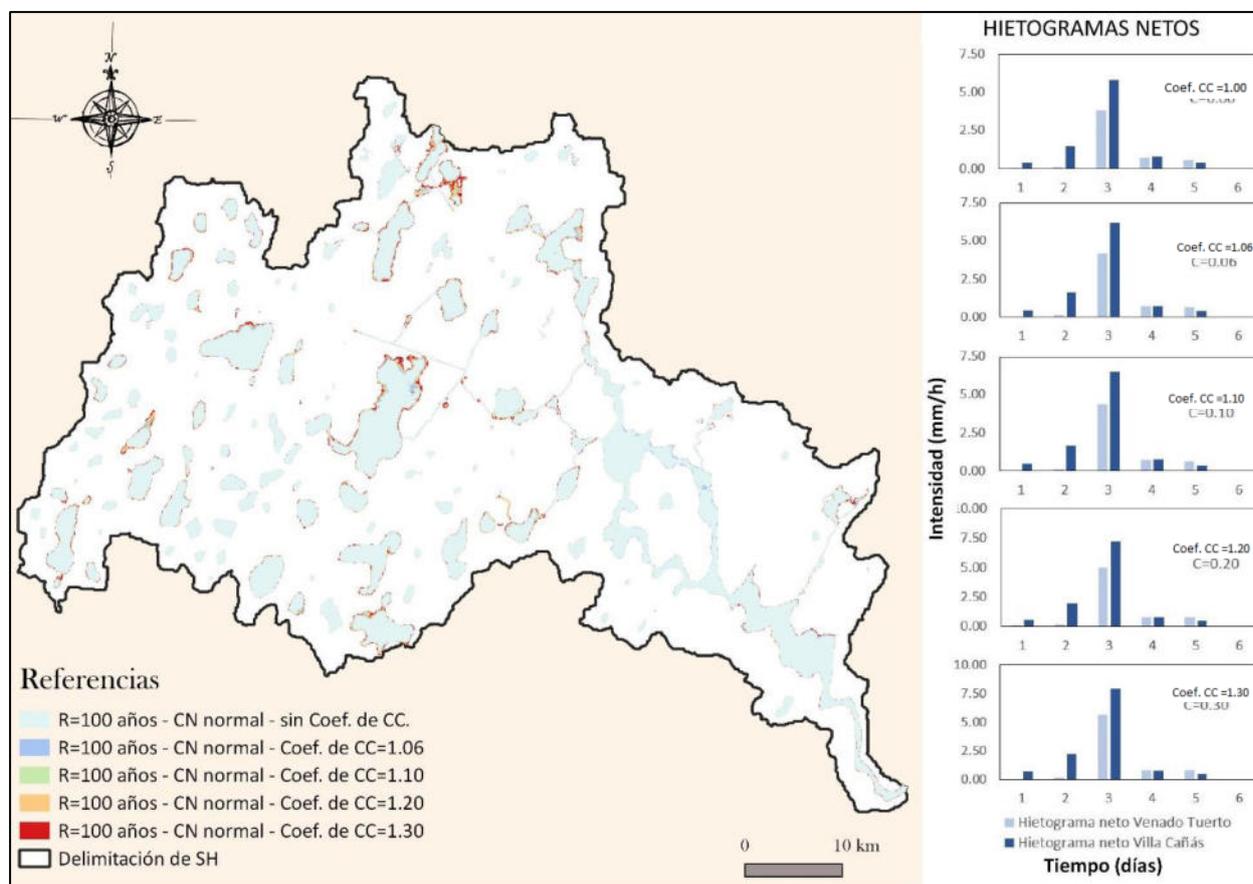
En cuanto al comportamiento del SH frente a precipitaciones de recurrencia igual a 100 años, el mismo proporcionó como resultado 49,220 ha de superficie cubiertas por agua para condiciones normales de la capacidad absorción y 57,669 ha para la condición de suelo cuasi saturado; con un 9.3% y un 15.1%, respectivamente, del volumen entrante escurrido a los 12 días de iniciado el evento. En las Tablas 23 a 26 y las Figuras 76 a 79, se muestran las variaciones, tal como en los Apartados anteriores.

**Tabla 23:** Variación de agua en superficie para una recurrencia de 100 años en condiciones de absorción de suelo normal, conforme escenarios de CC.

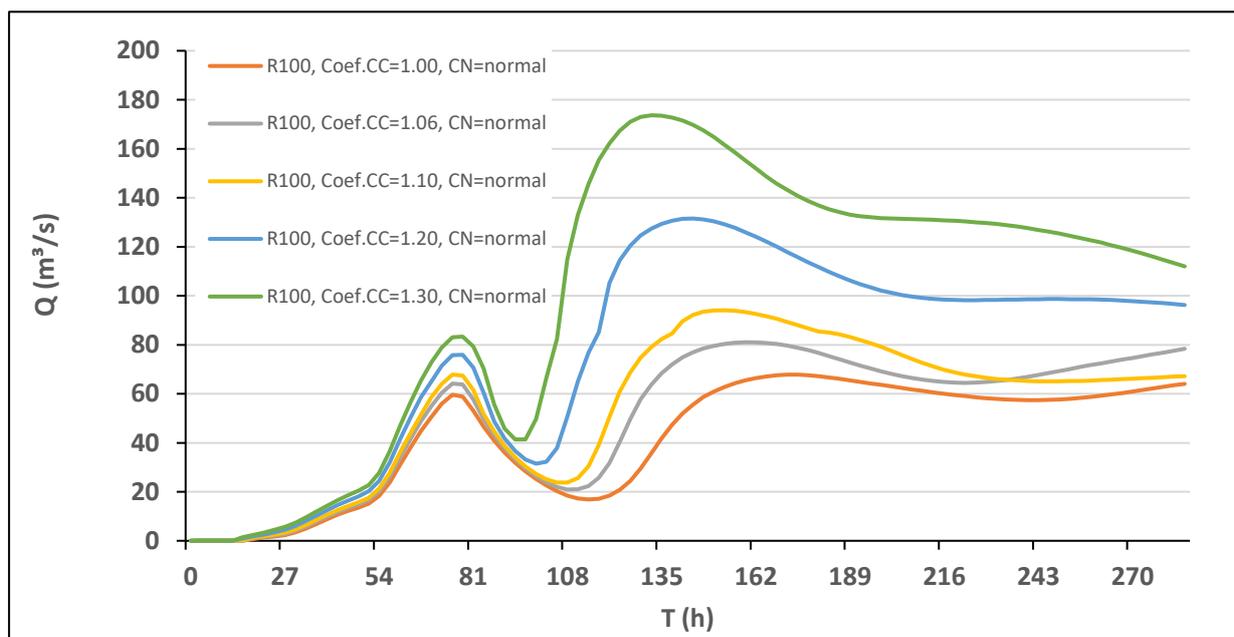
<b>Escenario</b>	<b>Sup. Con agua (ha)</b>	<b>% de incremento de agua respecto a sim. sin CC</b>	<b>% de sup. con agua respecto a sup. del SH</b>
R100, CN normal - Sin Coef.CC	49,220	0	15.20
R100, CN normal -Coef. CC 1.06	51,119	3.86	15.79
R100, CN normal -Coef. CC 1.10	51,181	3.98	15.81
R100, CN normal -Coef. CC 1.20	53,861	9.43	16.63
R100, CN normal -Coef. CC 1.30	56,006	13.79	17.30

**Tabla 24:** Resumen de volúmenes intervinientes para R=100 años, CN=normal.

Escenario	Vol. inicial en lagunas (Hm <sup>3</sup> )	Vol. entrante de precipitación (P) (Hm <sup>3</sup> )	Vol. saliente (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Remante (Hm <sup>3</sup> )	Vol. Entrante P/ Vol. Saliente (%)
R100, CN=normal - Sin CC	169.3	471.5	44.0	596.8	9.3
R100, CN=normal - Coef. CC 1.06	169.3	509.3	52.5	626.1	10.3
R100, CN=normal - Coef. CC 1.10	169.3	534.7	56.4	647.6	10.5
R100, CN=normal - Coef. CC 1.20	169.3	599.2	79.5	689.0	13.3
R100, CN=normal - Coef. CC 1.30	169.3	664.9	103.1	731.1	15.5



**Figura 76:** Variación de la superficie cubierta por agua para R=100 años y CN de suelo normales, de acuerdo con los diferentes escenarios de CC.



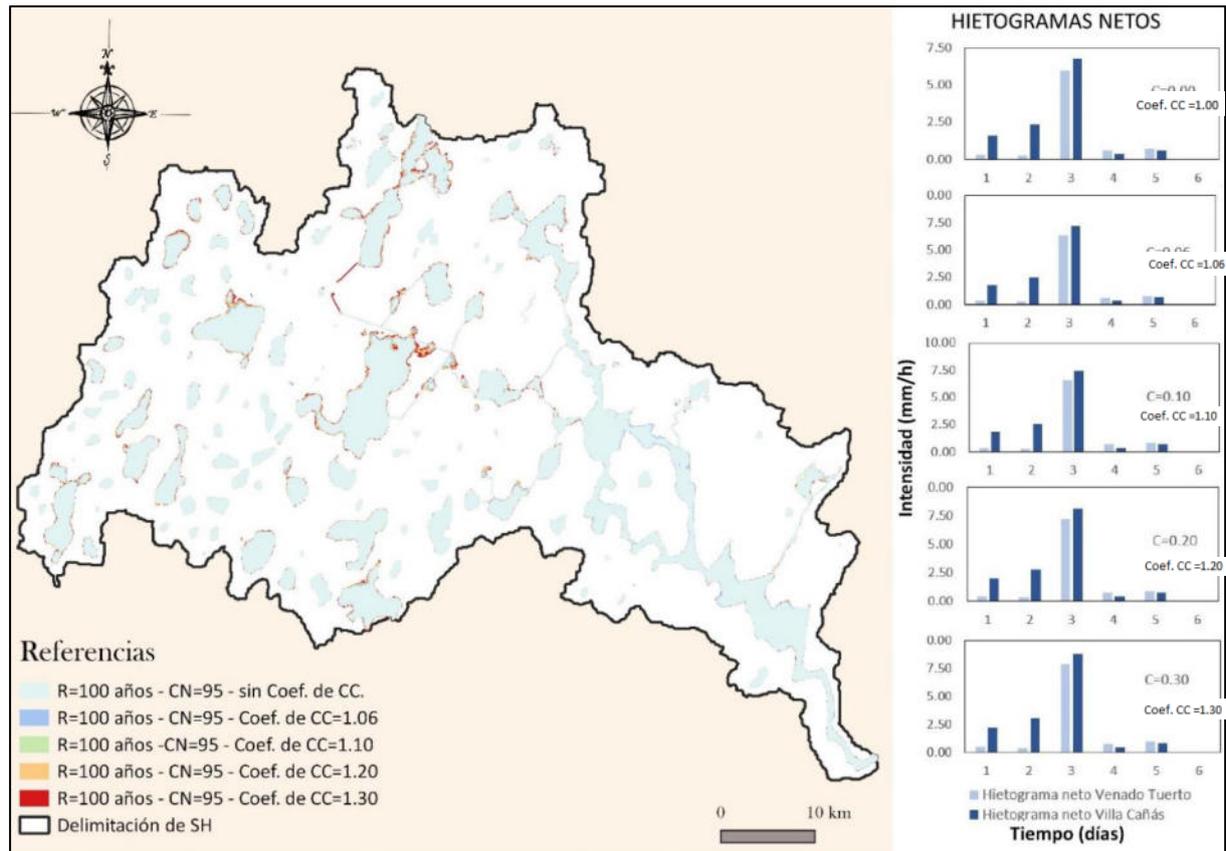
**Figura 77:** Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 100 años con condiciones de suelo normales, conforme diferentes coeficientes de CC.

**Tabla 25:** Variación de agua en superficie para una recurrencia de 100 años en condiciones de absorción de suelo cuasi saturado, conforme escenarios de CC.

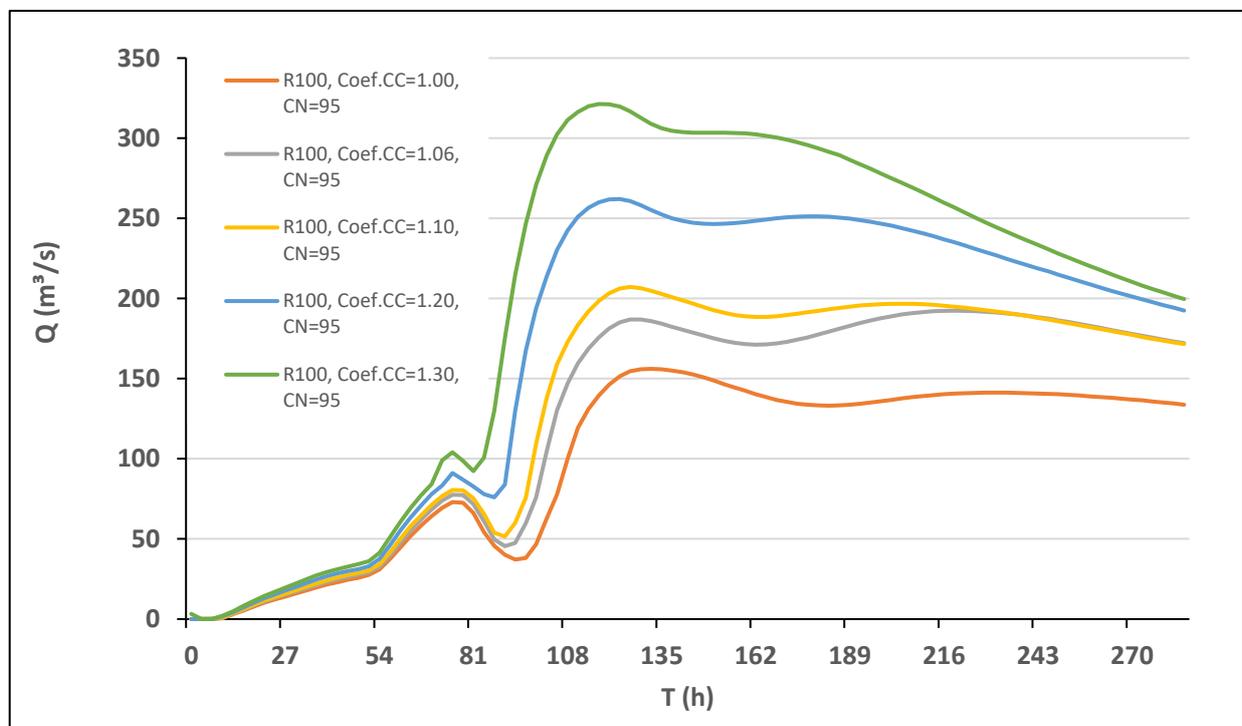
Escenario	Sup. Con agua (ha)	% de incremento de agua respecto a sim. sin CC	% de sup. con agua respecto a sup. del SH
R100, CN=95 - Sin Coef.CC	57,669	0	17.81
R100, CN=95 - Coef. CC 1.06	59,601	3.35	18.41
R100, CN=95 - Coef. CC 1.10	60,303	4.57	18.62
R100, CN=95 - Coef. CC 1.20	62,597	8.55	19.33
R100, CN=95 - Coef. CC 1.30	64,514	11.87	19.92

**Tabla 26:** Resumen de volúmenes intervinientes para R=100 años, CN=cuasi saturado.

Escenario	Vol. inicial en lagunas (Hm³)	Vol. entrante de precipitación (P) (Hm³)	Vol. saliente (Hm³)	Vol. Remante (Hm³)	Vol. Entrante P/ Vol. Saliente (%)
R100, CN=95 - Sin CC	169.3	685.9	103.6	751.6	15.1
R100, CN=95 - Coef. CC 1.06	169.3	729.5	132.8	766.0	18.2
R100, CN=95 - Coef. CC 1.10	169.3	759.1	140.9	787.5	18.6
R100, CN=95 - Coef. CC 1.20	169.3	833.1	176.0	826.4	21.1
R100, CN=95 - Coef. CC 1.30	169.3	906.0	205.4	869.9	22.7



**Figura 78:** Variación de la superficie cubierta por agua para R=100 años y CN de suelo cuasi saturado, de acuerdo con los diferentes escenarios de CC.

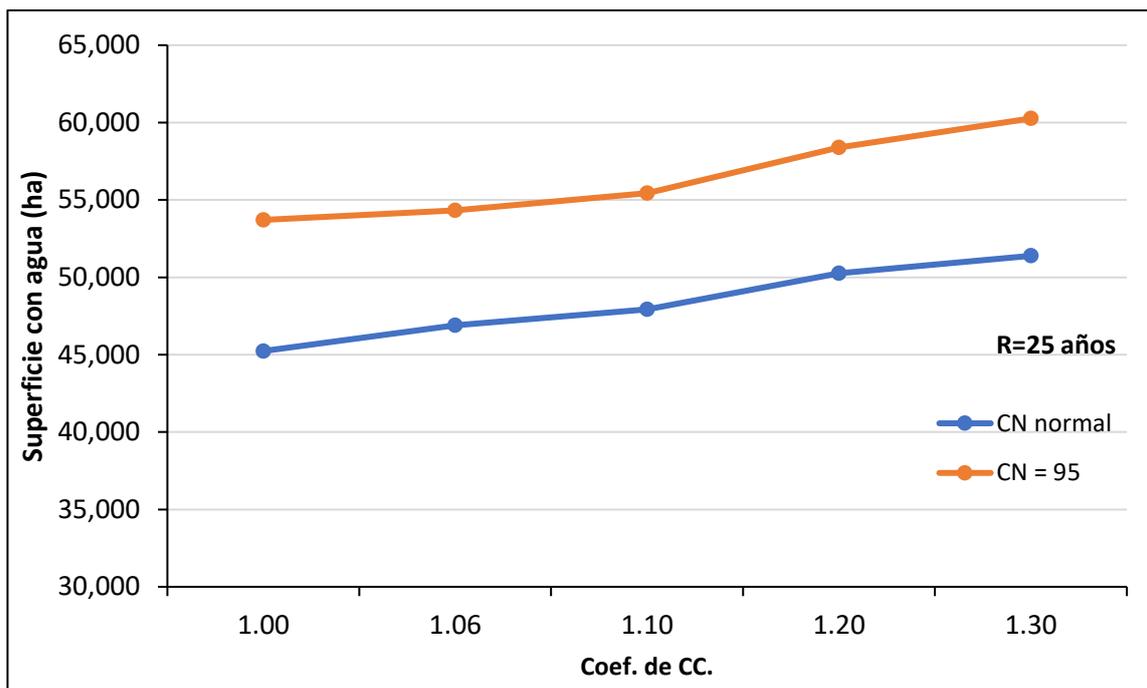


**Figura 79:** Hidrogramas para el punto de cierre del SH, frente a un evento climático de recurrencia 100 años con condiciones de suelo cuasi-saturado, conforme diferentes coeficientes de CC.

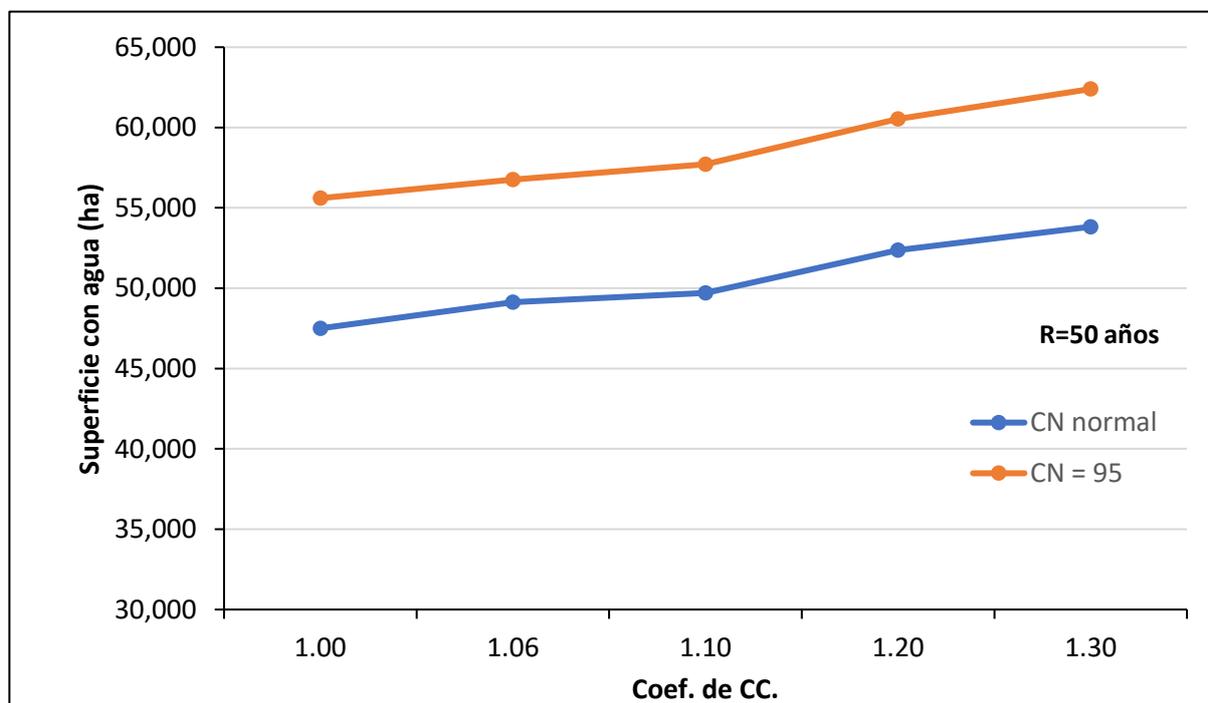
Se observa que, para condiciones de capacidad de absorción de suelo normales considerando CC, el incremento de agua superficial llega a alcanzar, para los escenarios más desfavorables, aproximadamente un 14% más respecto a la superficie de agua sin considerar CC; en cambio, en condiciones de suelo cuasi-saturadas el incremento respecto a una simulación sin CC es del 12%. Con respecto a volúmenes escurridos considerando el peor escenario de CC, en condiciones normales del suelo llega a alcanzar el 15.5%, y un 22.7% en condiciones de suelo cuasi saturado. En cuanto al incremento del porcentaje de superficie cubierta con agua respecto la superficie del SH, para condiciones de suelo normales respecto del peor escenario alcanza un 17.30% y para condiciones de suelo cuasi-saturado casi un 20%. En cuanto a los caudales pico, para condiciones de suelo normales se observa que al no considerar CC los mismos rondan en 70 m<sup>3</sup>/s, y considerando los coeficientes de CC más desfavorables, se encuentran próximos a los 180 m<sup>3</sup>/s. Para los caudales pico en condiciones de suelo cuasi-saturado sin CC se tienen valores del orden de los 150 m<sup>3</sup>/s y, considerando los coeficientes por CC más desfavorables, del orden de los 330 m<sup>3</sup>/s.

Como puede visualizarse en las Figuras 69, 71, 73, 75, 77 y 79; se presenta un doble pico en los hidrogramas del punto de cierre del SH. Esta situación se debe a la forma del SH y a sus características de drenaje: en una primera instancia drenan la superficies más próximas al punto de cierre y que poseen redes de drenaje bien definidas y, posteriormente, se genera un segundo pico al alcanzar el punto de cierre el agua drenada de las superficies del SH más alejadas y con redes de escurrimiento poco definidas. Además, se presentan picos más elevados al ir incrementándose el coef. de CC, puesto que, al ser las precipitaciones mayores y manteniéndose en iguales condiciones los demás factores, los escurrimientos son mayores.

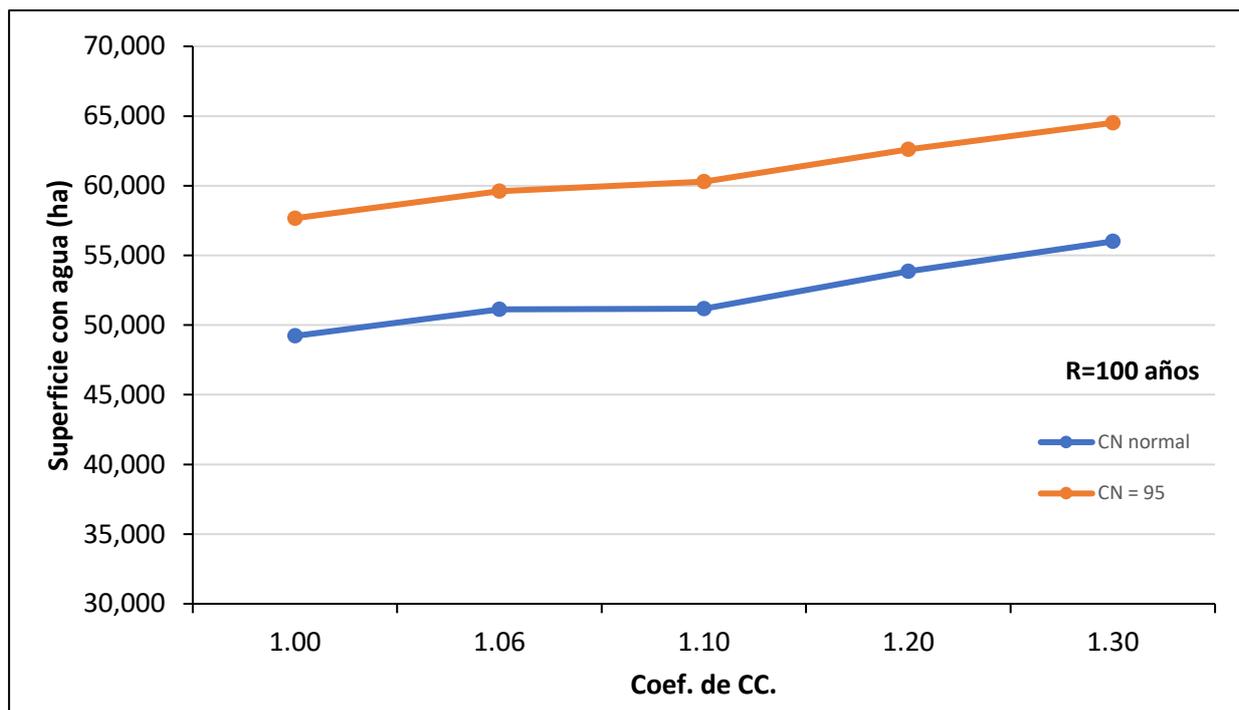
A continuación, en las Figuras 80, 81 y 82 se presenta la variación de superficie con agua para los diferentes escenarios de CC, y las tres recurrencias de análisis, conforme las dos condiciones de valor medio ponderado de humedad del suelo.



**Figura 80:** Variación de superficie con agua para los diferentes escenarios de CC, conforme las dos condiciones de valor medio ponderado de humedad del suelo, y una recurrencia de 25 años.



**Figura 81:** Variación de superficie con agua para los diferentes escenarios de CC, conforme las dos condiciones de valor medio ponderado de humedad del suelo, y una recurrencia de 50 años.



**Figura 82:** Variación de superficie con agua para los diferentes escenarios de CC, conforme las dos condiciones de valor medio ponderado de humedad del suelo, y una recurrencia de 100 años.

A continuación, se presenta la Tabla 27 a modo de resumen comparativo, para una mejor comprensión del efecto de la variación del CC en el SH.

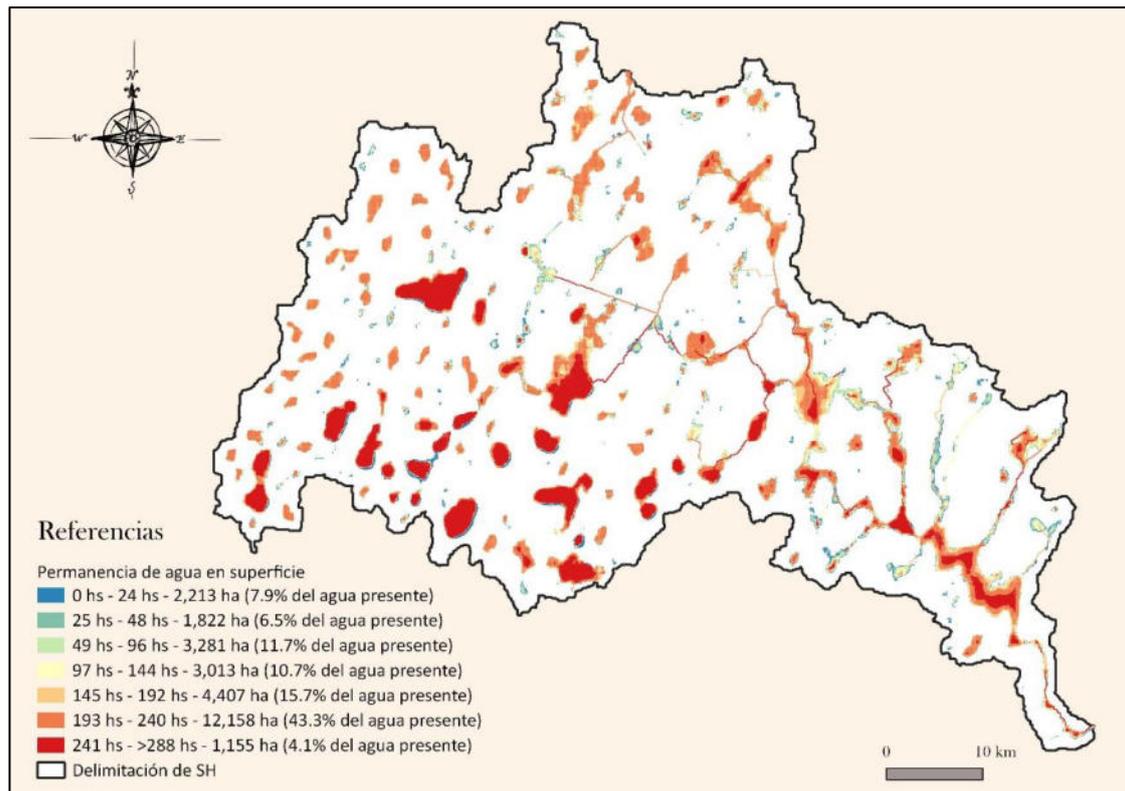
**Tabla 27:** Sup. con agua (ha) s/CC para CN normal y con CC para CN=95, para diferentes recurrencias.

R (años)	CN nor., s/CC	CN=95, CC=1.10	I(%)	CN=95, CC=1.20	I (%)	CN=95, CC=1.30	I (%)
25	45,236	55,444	22.6	58,388	29.1	60,267	33.2
50	47,498	57,709	21.5	60,541	27.5	62,396	31.4
100	49,220	60,303	22.5	62,597	27.2	64,514	31.1

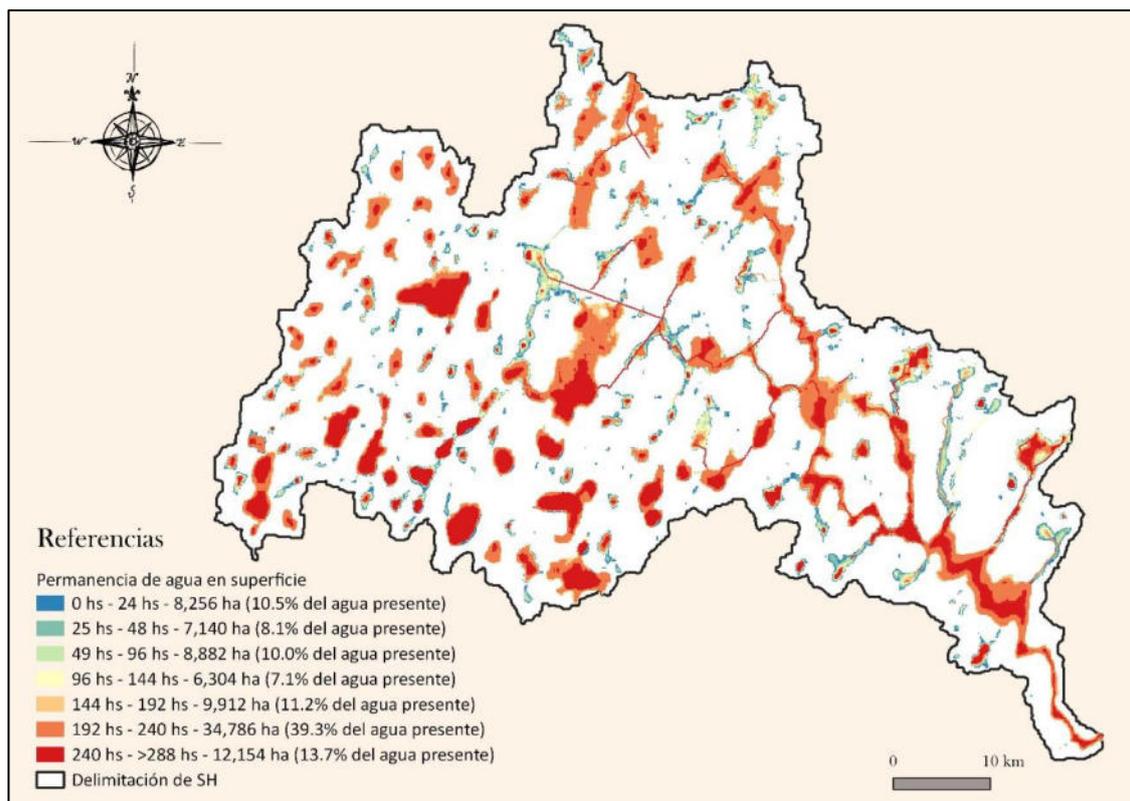
#### 4.2.3 DETERMINACIÓN / ANÁLISIS DE PERMANENCIA DE AGUA EN SUPERFICIE

Una situación que resulta también relevante de analizar es el tiempo en el cual el agua permanece sobre la superficie del SH hasta que escurre, se infiltra o evapora. Para realizar este análisis es utilizado un complemento del modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0 el cual realiza la lectura de las simulaciones y efectúa el análisis de permanencia de agua en superficie. Debido a que el mismo arroja los resultados de permanencia de agua en cada celda en formato de coordenadas de posicionamiento, los

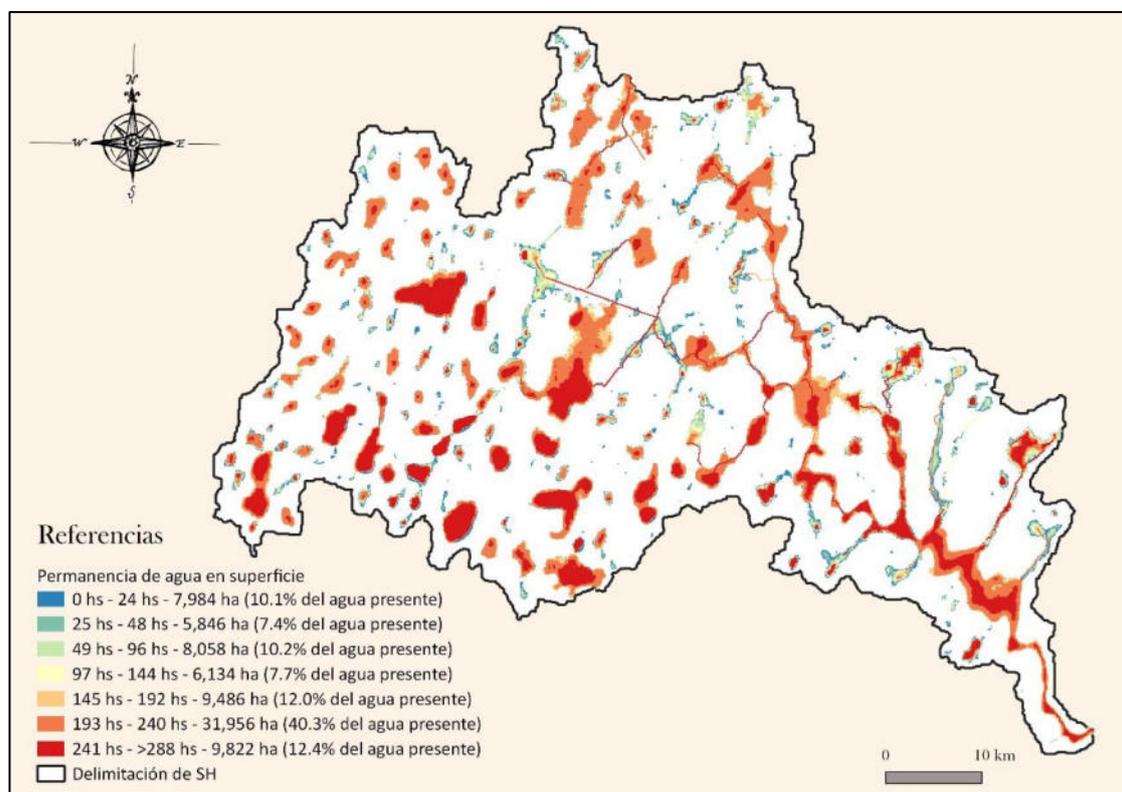
mismos son procesados mediante el software de SIG para, mediante una categorización de la información, realizar un mapeo general del tiempo de permanencia de agua en superficie en todo el SH. A continuación, en las Figuras 83 a 88, se presentan los mapas de permanencia de agua en superficie para recurrencias de 25, 50 y 100 años, en condiciones antecedentes de humedad del suelo cuasi-saturado, para escenarios sin considerar CC y considerando el coeficiente máximo de incremento por CC.



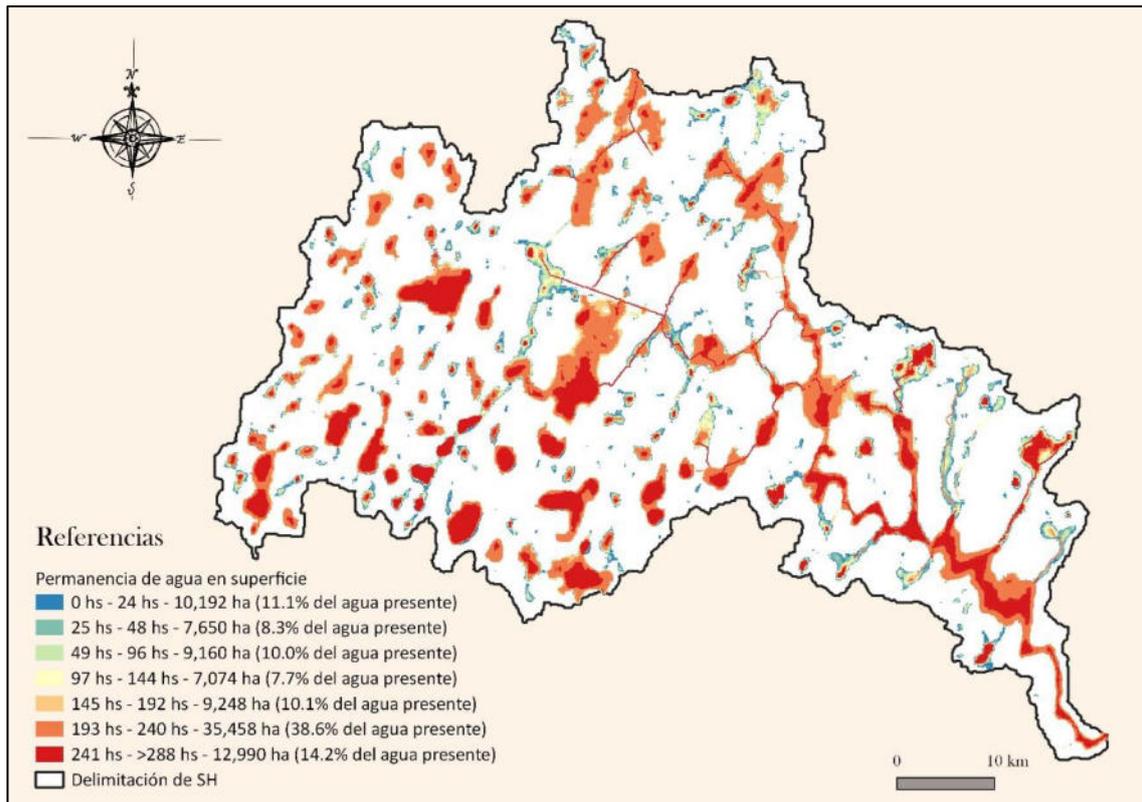
**Figura 83:** Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 25 años, en condición de suelo cuasi-saturado sin considerar incremento de precipitación por CC.



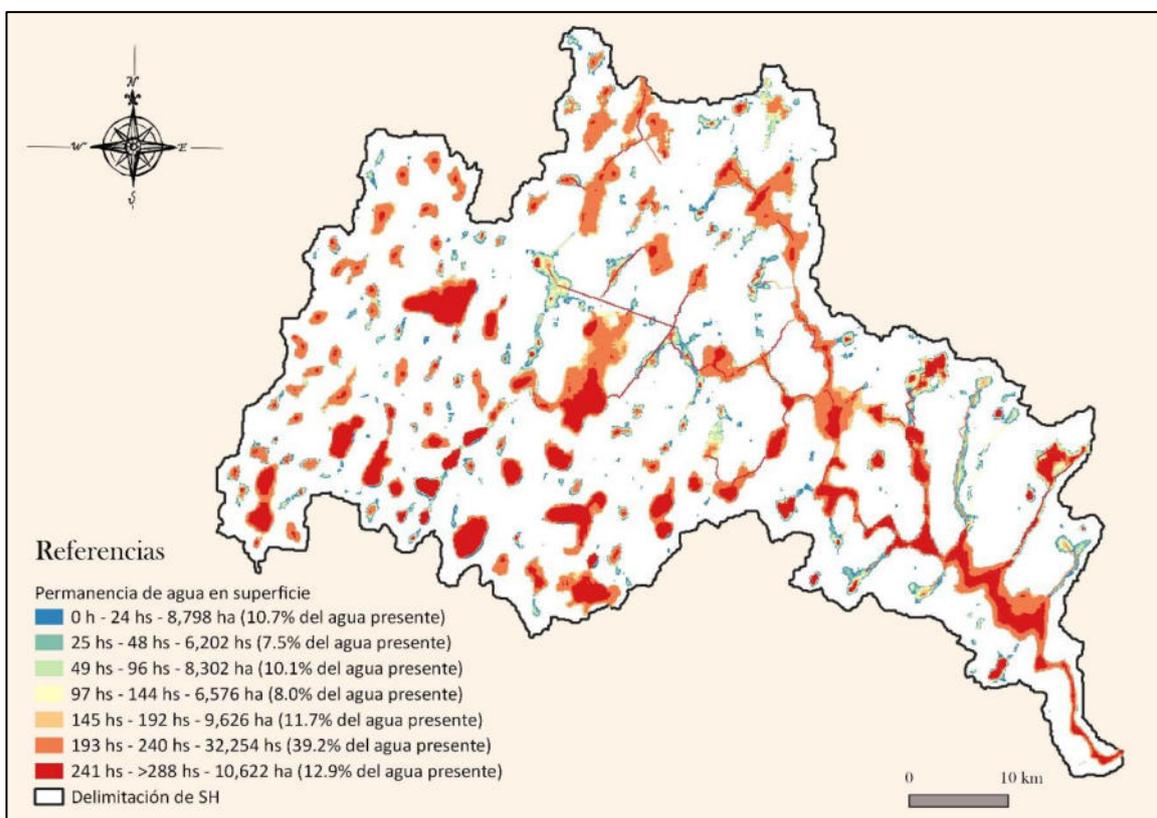
**Figura 84:** Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 25 años, en condición de suelo cuasi-saturado considerando un incremento de precipitación por CC de 1.30.



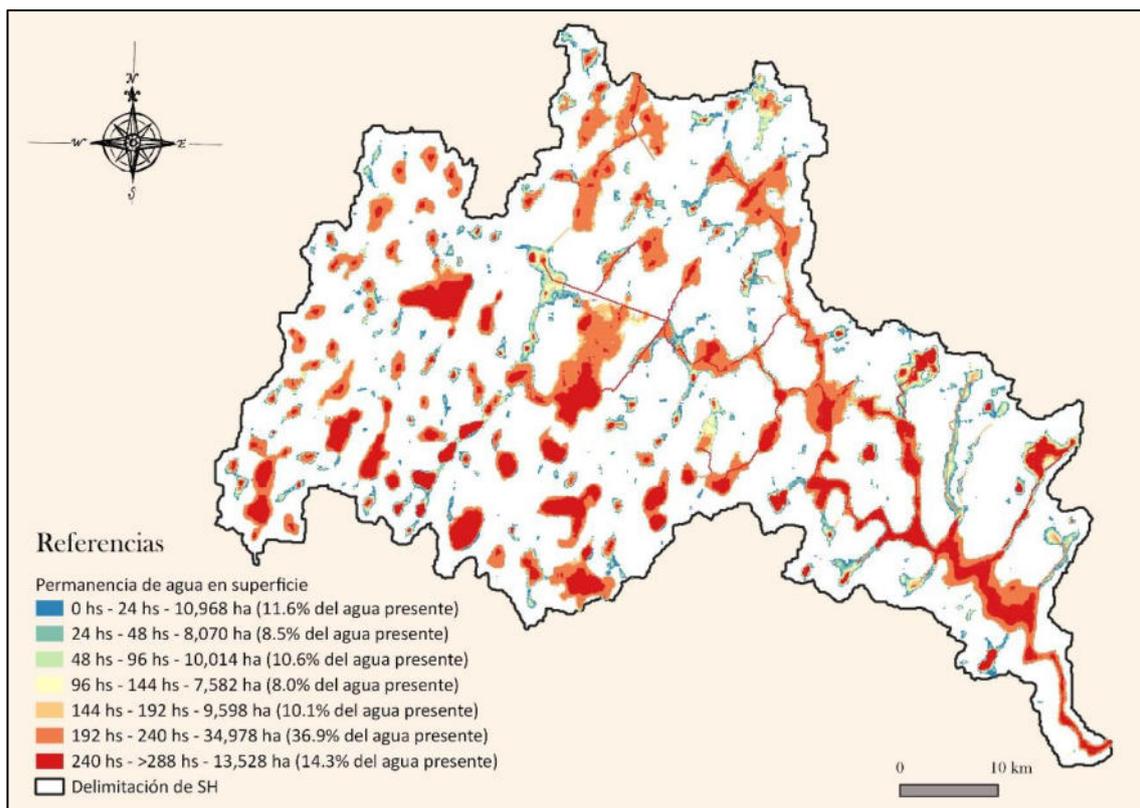
**Figura 85:** Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 50 años, en condición de suelo cuasi-saturado sin considerar incremento de precipitación por CC.



**Figura 86:** Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 50 años, en condición de suelo cuasi-saturado considerando un incremento de precipitación por CC de 1.30.



**Figura 87:** Mapa de permanencia de agua en superficie para una R= 100 años, en condición de suelo cuasi-saturado sin considerar incremento de precipitación por CC.



**Figura 88:** Mapa de permanencia de agua en superficie para una R=100 años, en condición de suelo cuasi-saturado considerando un incremento de precipitación por CC de 1.30.

Como puede observarse en las imágenes, se tiene para una recurrencia de 25 años sin considerar CC, 1,155 ha que permanecen cubiertas con agua después de 288 h de iniciado el evento climático de duración 120 h y, al considerar el máximo factor por CC, este valor alcanza las 12,154 ha. En cuanto a la recurrencia de 50 años, se tiene para la simulación sin considerar CC 9,822 ha y considerando el máximo factor por CC, 12,990 ha de agua en superficie transcurridas 288 h de inicio del evento. Para finalizar, para una recurrencia de 100 años sin considerar CC se tienen 10,622 ha de agua en superficie superadas las 288 h y 13,528 ha al considerar CC.

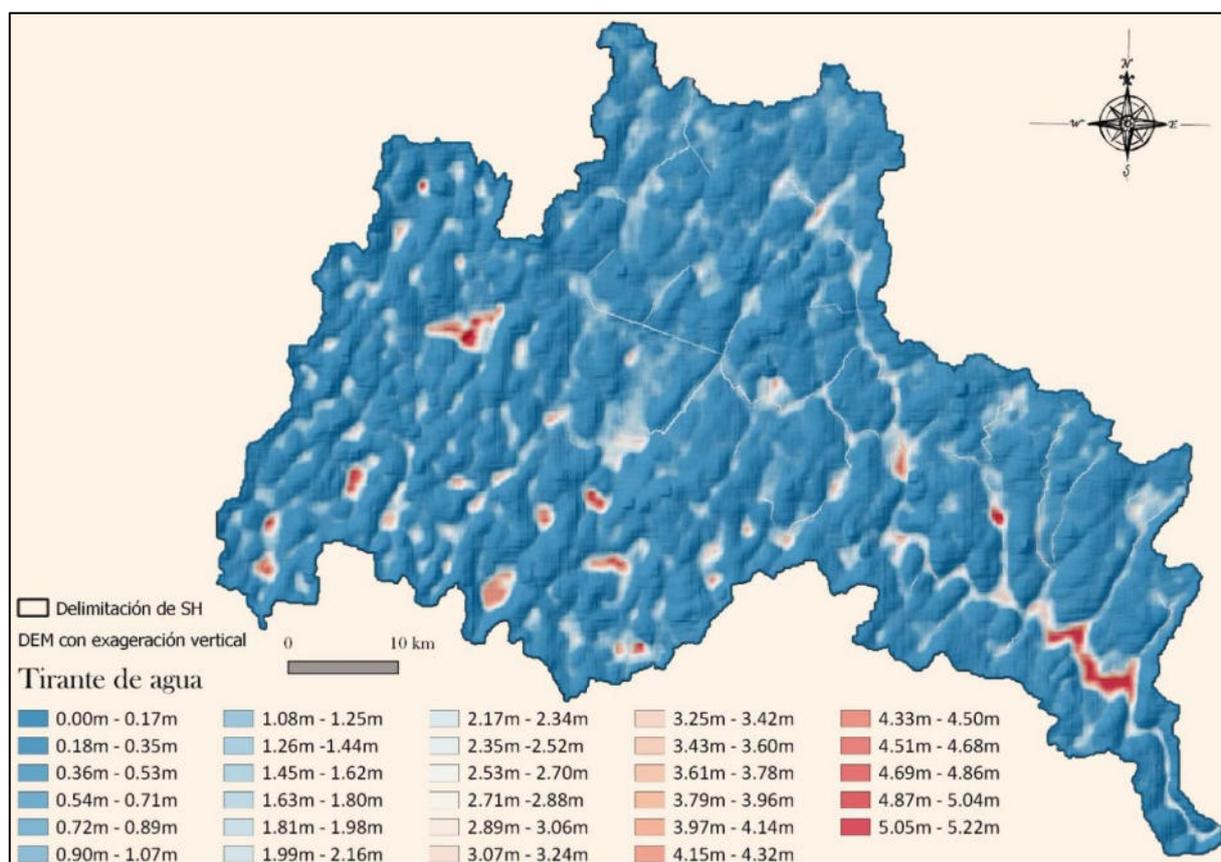
#### 4.2.4 DISCUSIÓN SOBRE DELIMITACIÓN DEL SH

Para elección de la delimitación del SH, tema que fue expuesto en el Apartado 4.1.1.1.3, se trabajó con la desarrollada en esta Tesis, después una exposición de delimitaciones existentes, pero se la consideró marginal puesto que se esperaba ver la respuesta del SH frente a los diferentes eventos climáticos para poder determinar de forma fehaciente la delimitación.

Acorde con lo esperado, en la Figura 89 se muestra en esquema de colores los tirantes de agua para una recurrencia de 100 años considerando el máximo coeficiente por CC planteado y condición de suelo cuasi-saturado (CN medio =95), vislumbrando de fondo el DEM corregido

con exageración vertical, para una mejor interpretación. Como puede observarse, todos los sectores del SH se encuentran interconectados, y en la mayoría de ellos para este evento de recurrencia de 100 años, presentan agua. Es por ello, que resulta apropiado considerar esta delimitación como correcta del SH, puesto que si bien es más extendida que la presentada por los organismos enunciados en el Apartado 4.1.1.1.3, contempla eventos que pueden acontecer, con lo cual ignorar el aporte que brindarían las áreas no incluidas, puede ocasionar problemas de gravedad.

Se aclara que esta delimitación no contempla el área anexada o suprimida producto de la canalización efectuada a la altura de la laguna N°16 que conecta ese sector a otro SH mediante el canal San Urbano en dirección noreste, puesto que no hay evidencia clara del sentido de escurrimiento del agua, y conforme las calibraciones para las simulaciones efectuadas, los resultados son aceptables bajo este esquema de funcionamiento del SH.



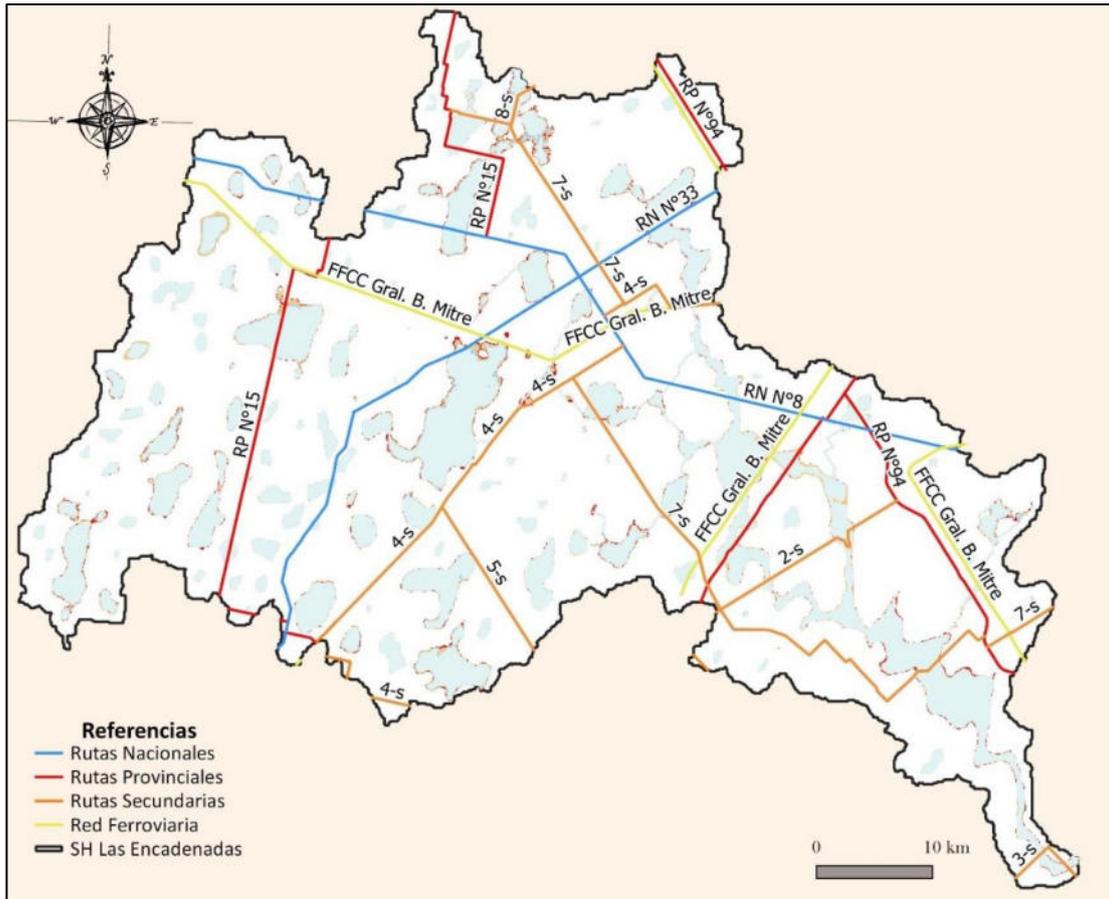
**Figura 89:** Mapa de validación de la delimitación del SH Las Encadenadas.

#### **4.2.5 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON AMENAZA, CONSTRUCCIÓN DE MAPAS Y CONTRASTACIÓN CON ÁREAS DE RIESGO HÍDRICO SEGÚN LEY 11,730**

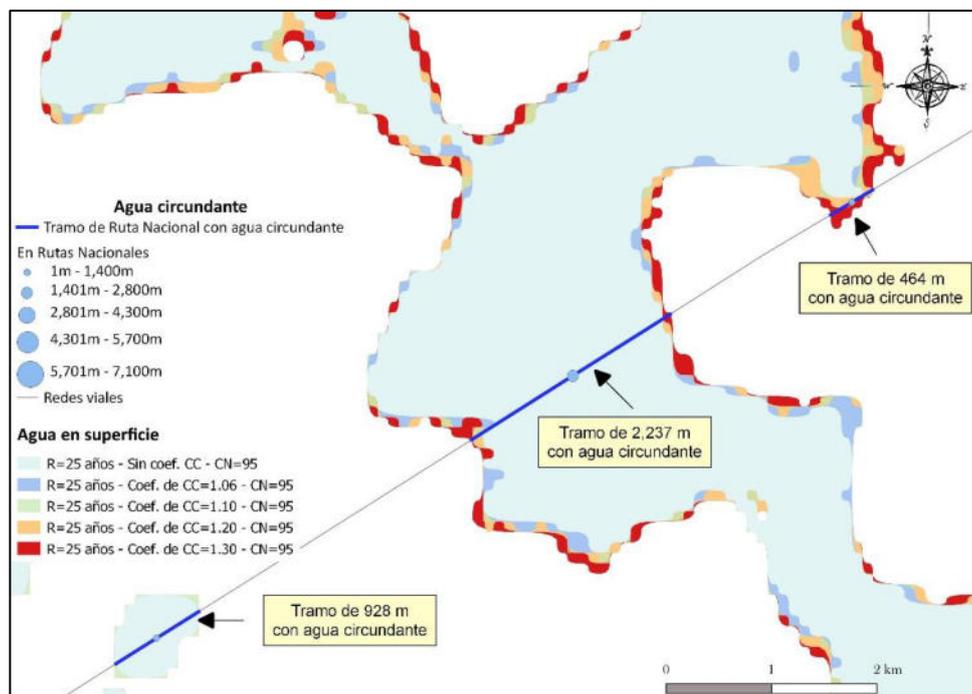
En este Apartado, de acuerdo con la información generada en los Apartados anteriores y mediante el empleo de herramientas de análisis lógico, se pretende identificar los sectores en riesgo producto de eventos climáticos que contemplan CC; generar diversos Mapas de Amenaza/ peligrosidad conforme distintos factores y realizar una contrastación de los mismos de acuerdo a las Áreas de Riesgo Hídrico según Ley 11,730.

La primera serie de mapas de amenaza/peligrosidad (Figuras 92 a 97) contempla las áreas máximas de agua superficial producto de eventos de recurrencia 25, 50 y 100 años considerando CC y cercanía de éstas a las redes viales. Para la confección de estos mapas es realizada, para cada una de las recurrencias, la unión de las capas de superficie de agua; producto de los distintos coeficientes por CC. Posterior a ello, son ejecutadas las disoluciones de dichas uniones, adquiriendo una sola figura por recurrencia e interceptando a las mismas con las distintas capas de tipo línea de las redes viales; dando como resultado una capa de tipo línea conformada por tramos de redes que se encuentran próximas a las superficies de agua. Para finalizar, con el objeto de lograr una interpretación eficaz de los mapas, se puntualizaron dichos tramos, fue aplicada una escala de tamaño de los puntos, conforme la longitud de los tramos próximos a agua superficial y se discriminaron en distintos colores, conforme la tipología de red.

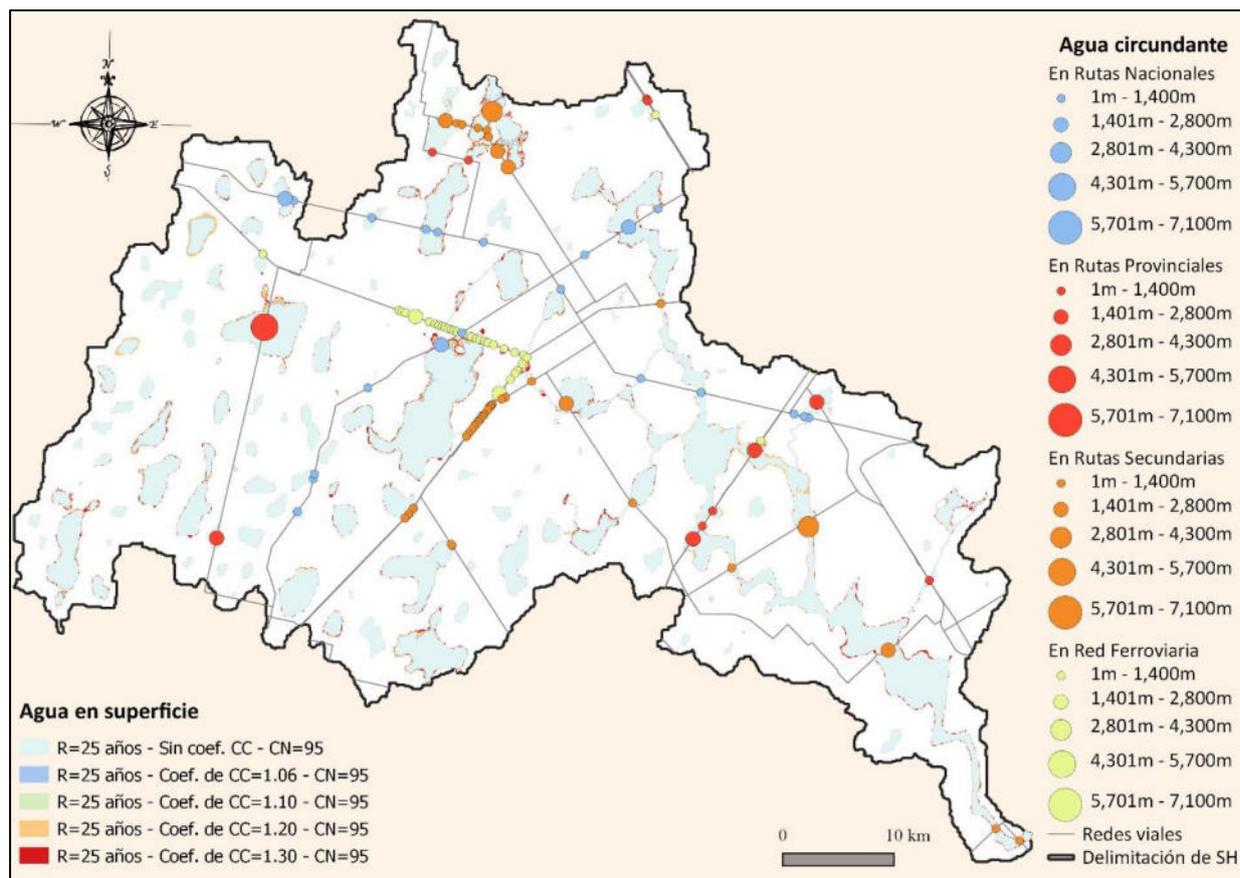
A continuación, en la Figura 90 se presentan los trazados de redes viales pertenecientes al SH Las Encadenadas; y en la Figura 91, se muestra un sector ampliado de uno de los mapas, con el objeto de facilitar a posteriori la comprensión de los mismos.



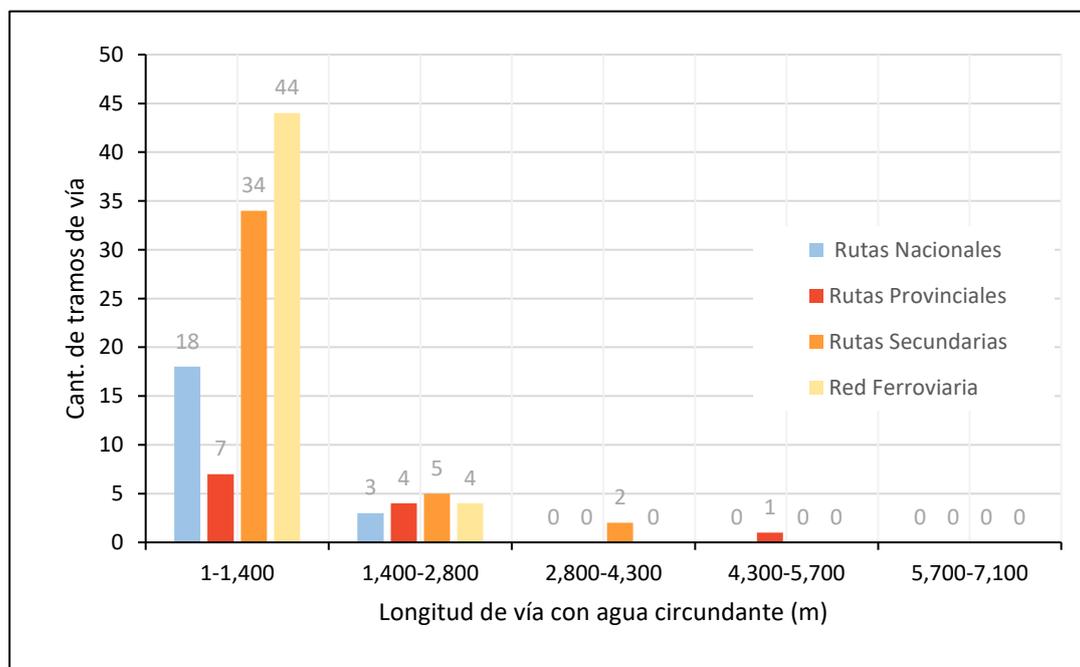
**Figura 90:** Mapa de trazados viales comprendidos en el SH Las Encadenadas.



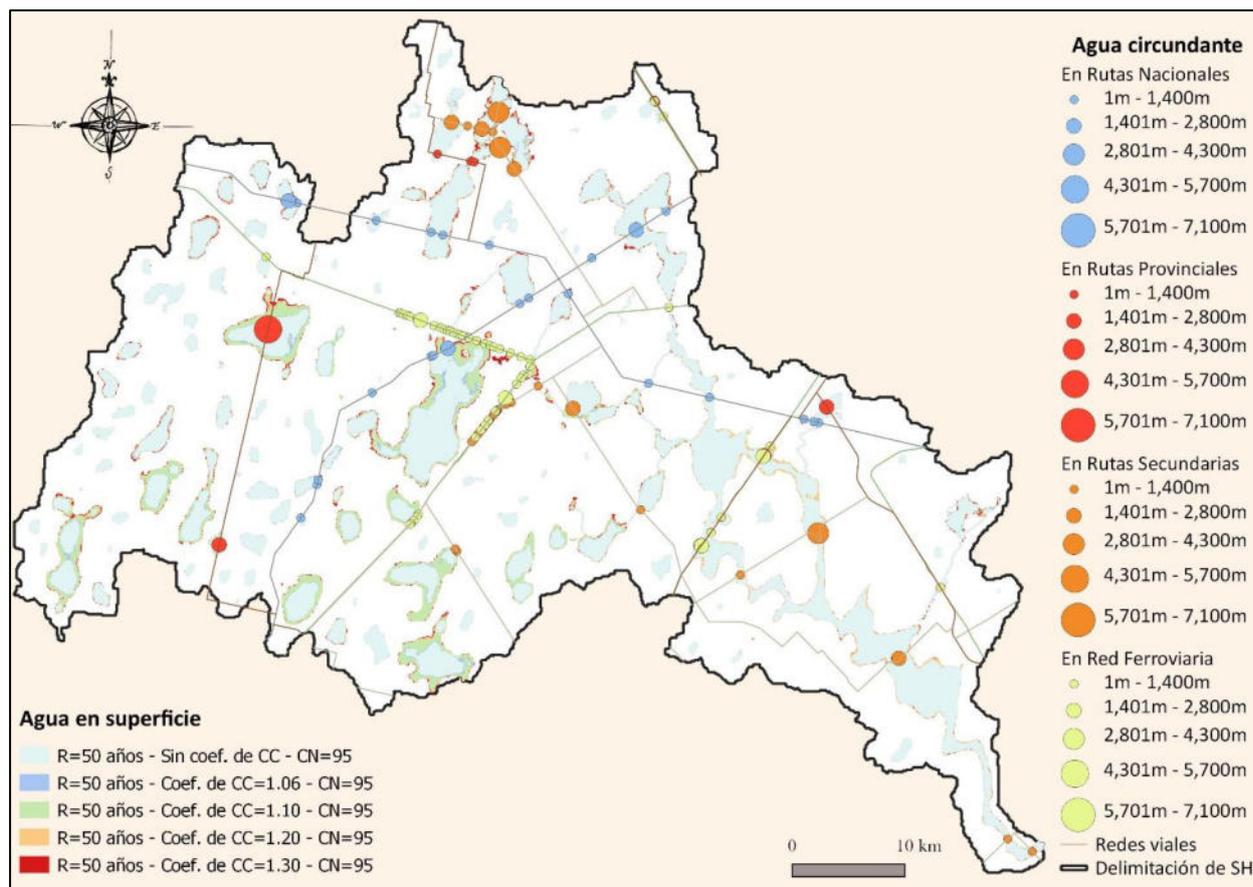
**Figura 91:** Ejemplo de caracterización de agua circundante a la red vial para un sector de una Ruta Nacional.



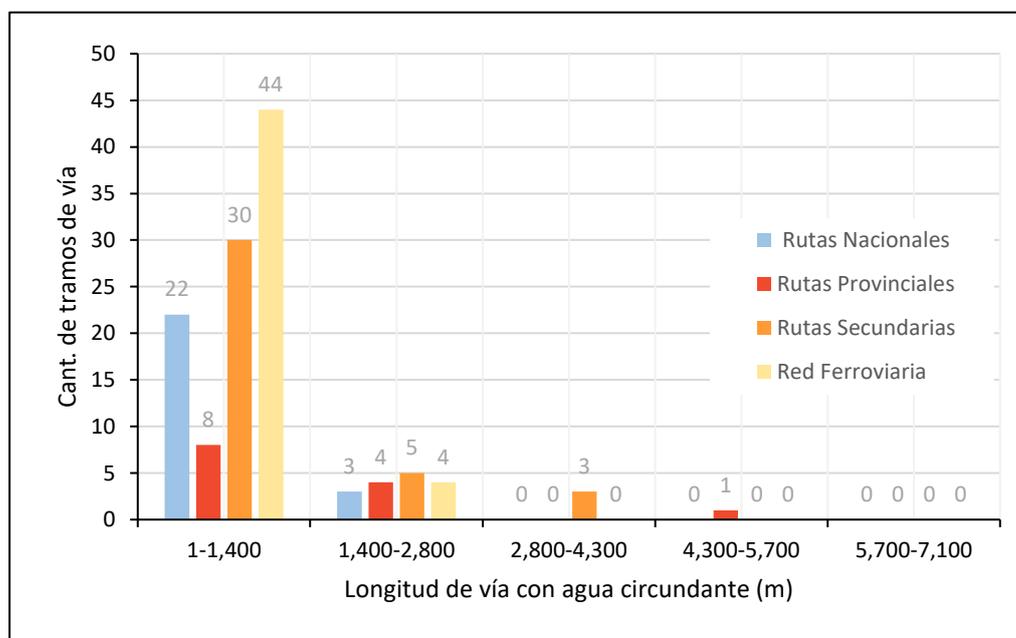
**Figura 92:** Mapa de amenaza por agua circundante en redes viales, debido a eventos climáticos considerando CC para una recurrencia de 25 años.



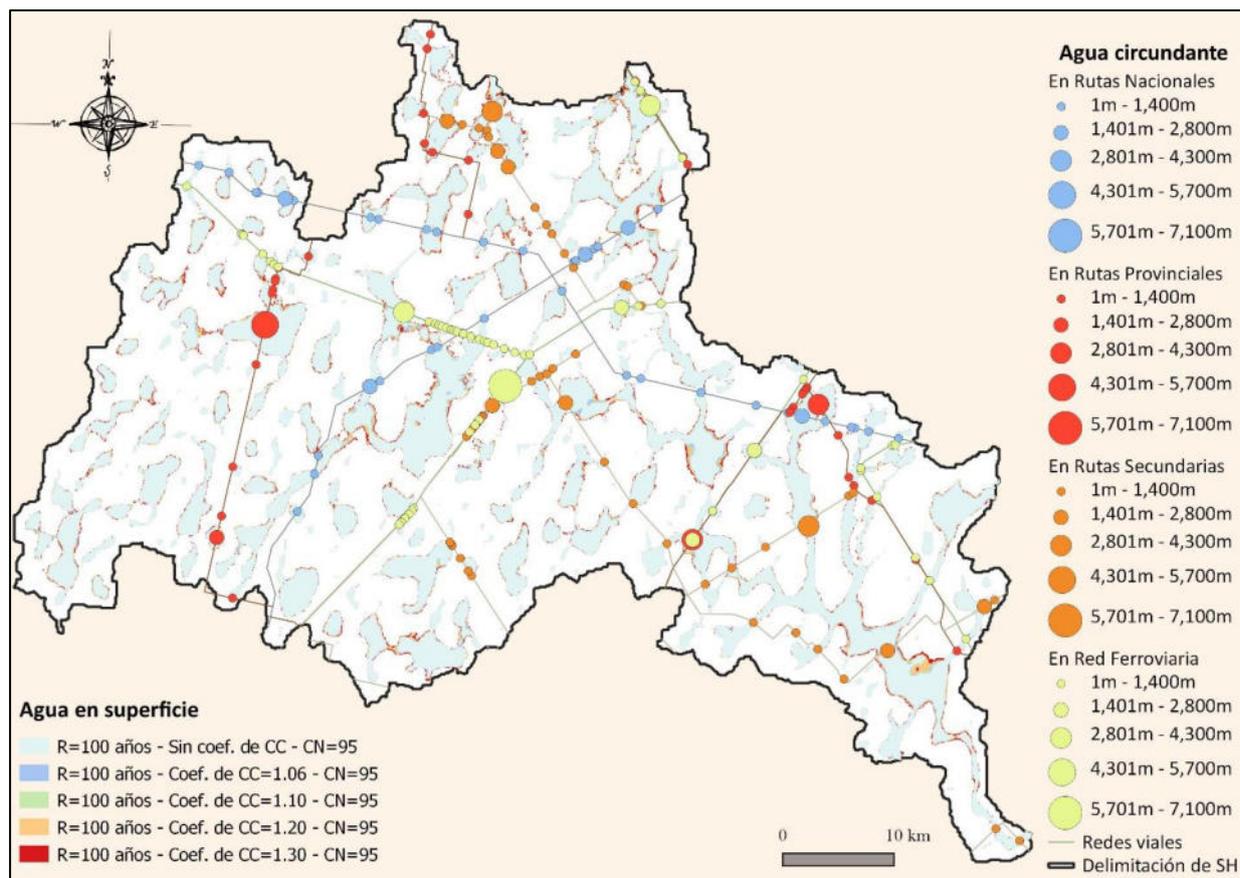
**Figura 93:** Cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 25 años, considerando CC.



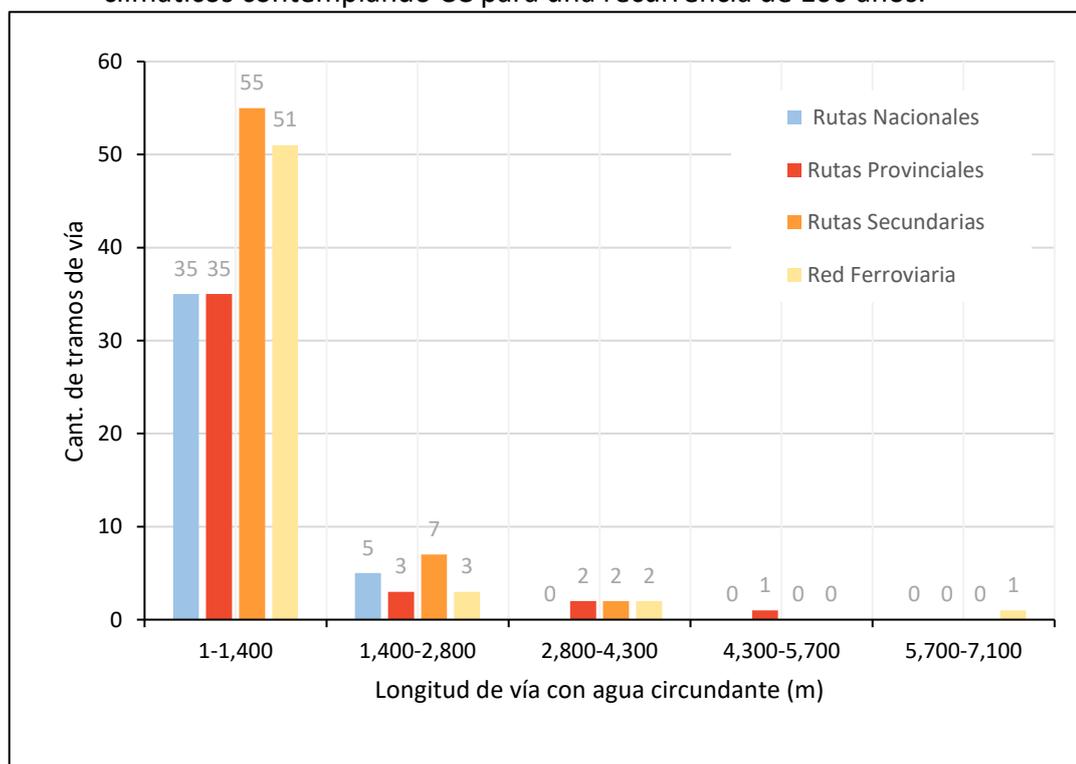
**Figura 94:** Mapa de amenaza por agua circundante en redes viales, debido a eventos climáticos contemplando CC para una recurrencia de 50 años.



**Figura 95:** Cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 50 años, considerando CC.

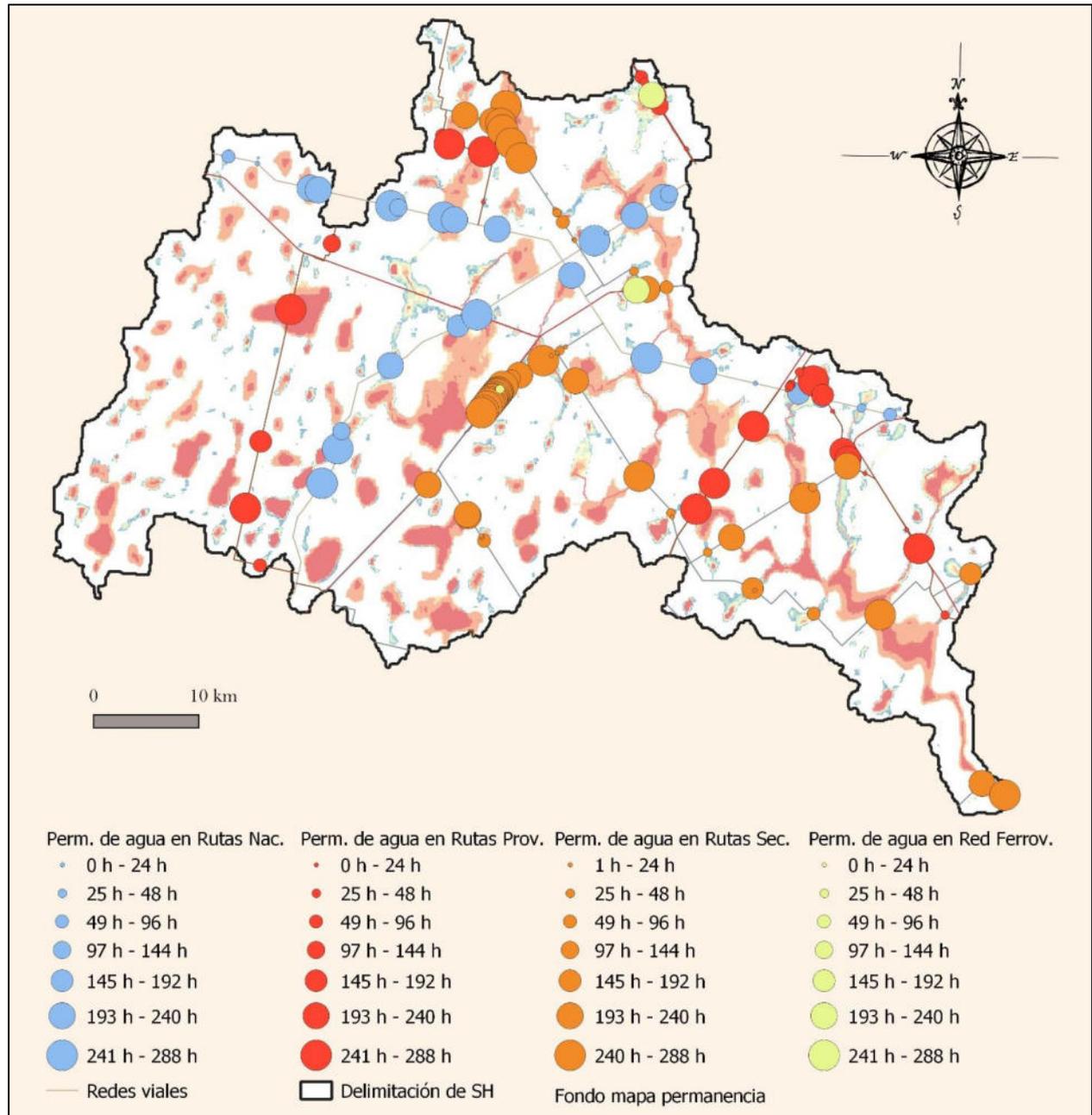


**Figura 96:** Mapa de amenaza por agua circundante en redes viales, debido a eventos climáticos contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

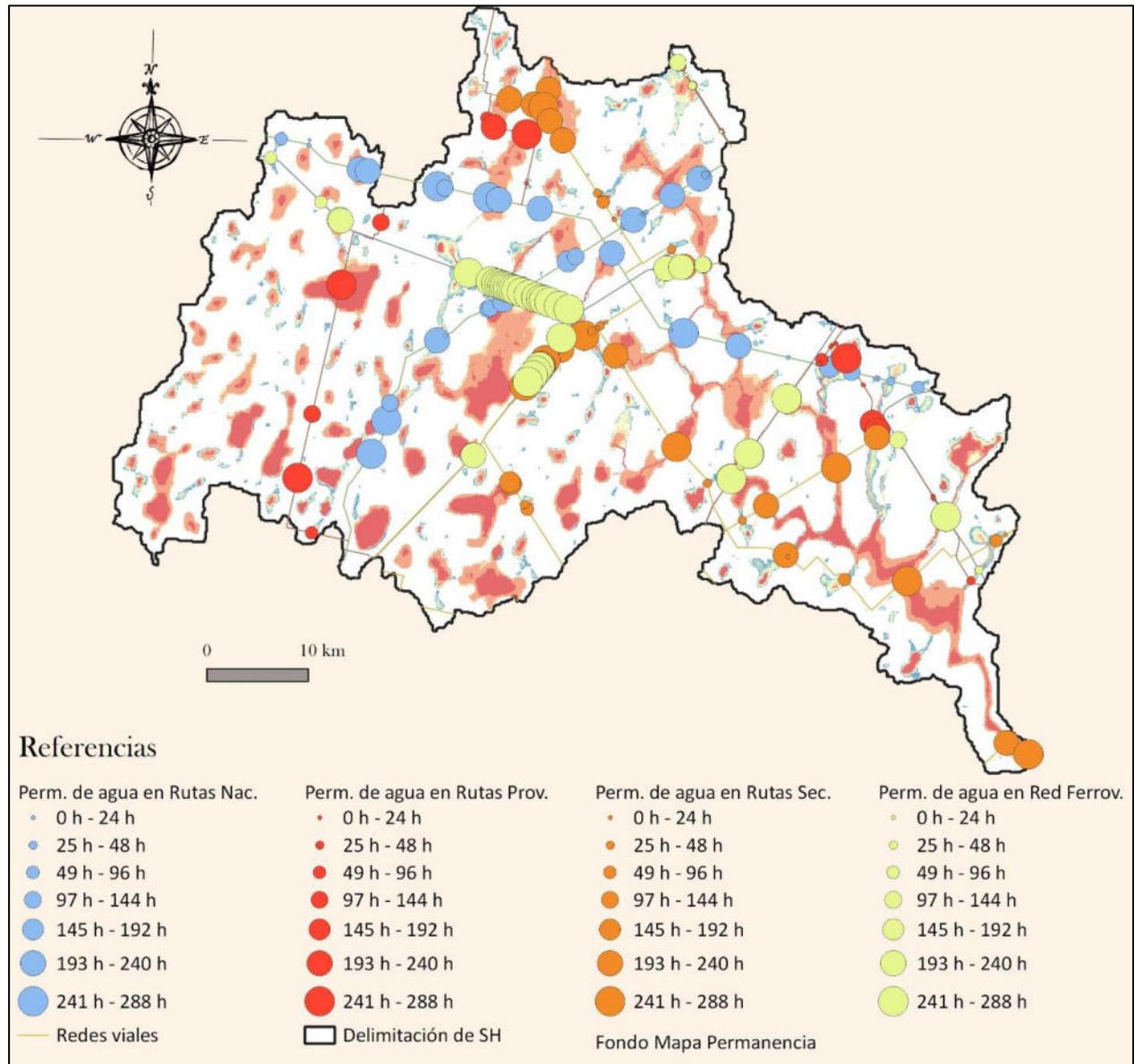


**Figura 97:** Cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 100 años, considerando CC.

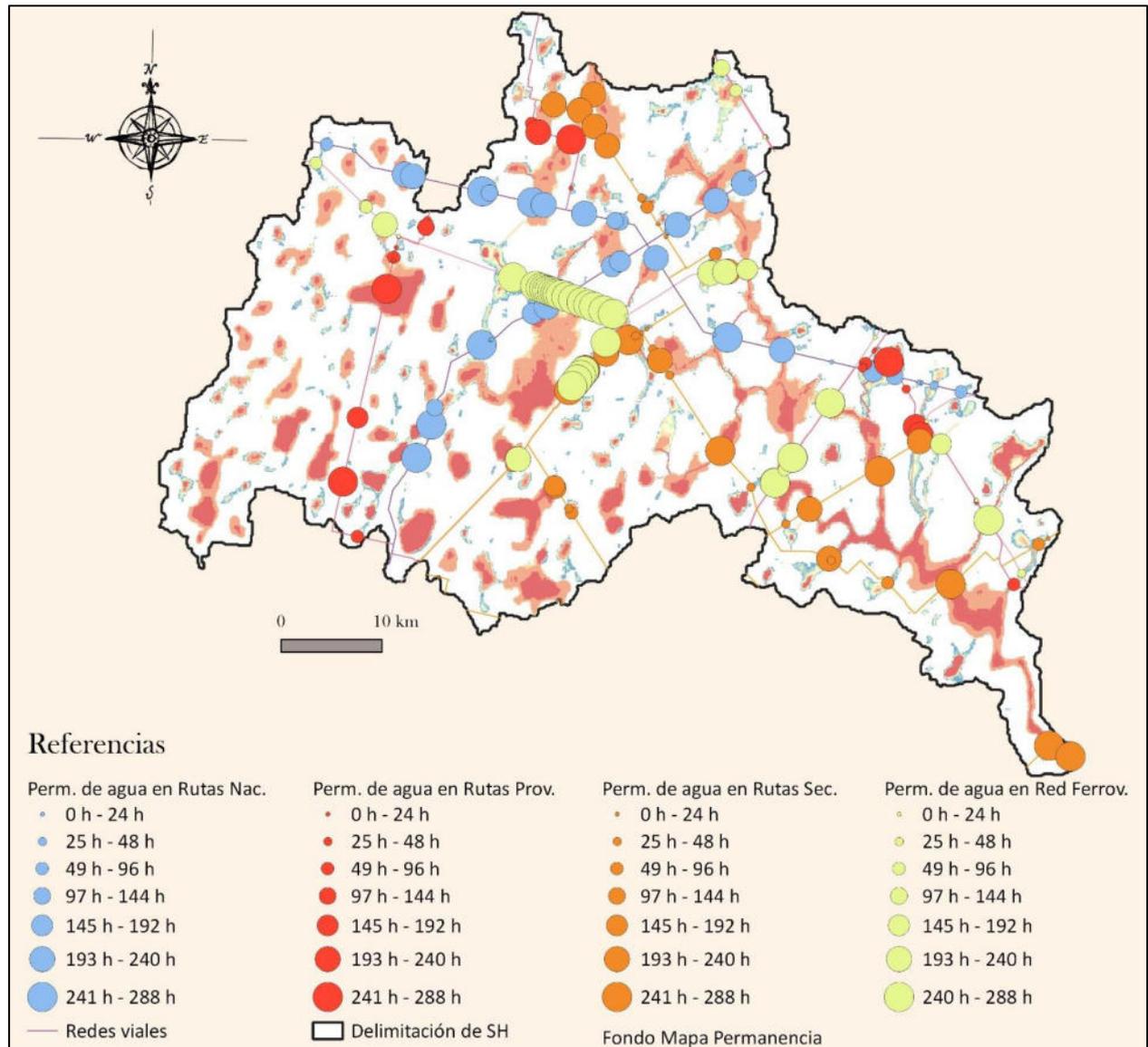
La segunda serie de mapas (Figura 98 a 100) consiste en representar los sectores de las redes viales en los cuales el agua aledaña presente posee una determinada permanencia luego de iniciada la lluvia de diseño. La metodología fue similar a la efectuada en la serie de mapas descritos arriba, a diferencia que en este caso son puntualizados los tramos que presentan cercanía a una determinada permanencia de agua, siendo representada esta permanencia en distintos tamaños sobre las puntualizaciones.



**Figura 98:** Mapa de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC para una recurrencia de 25 años.

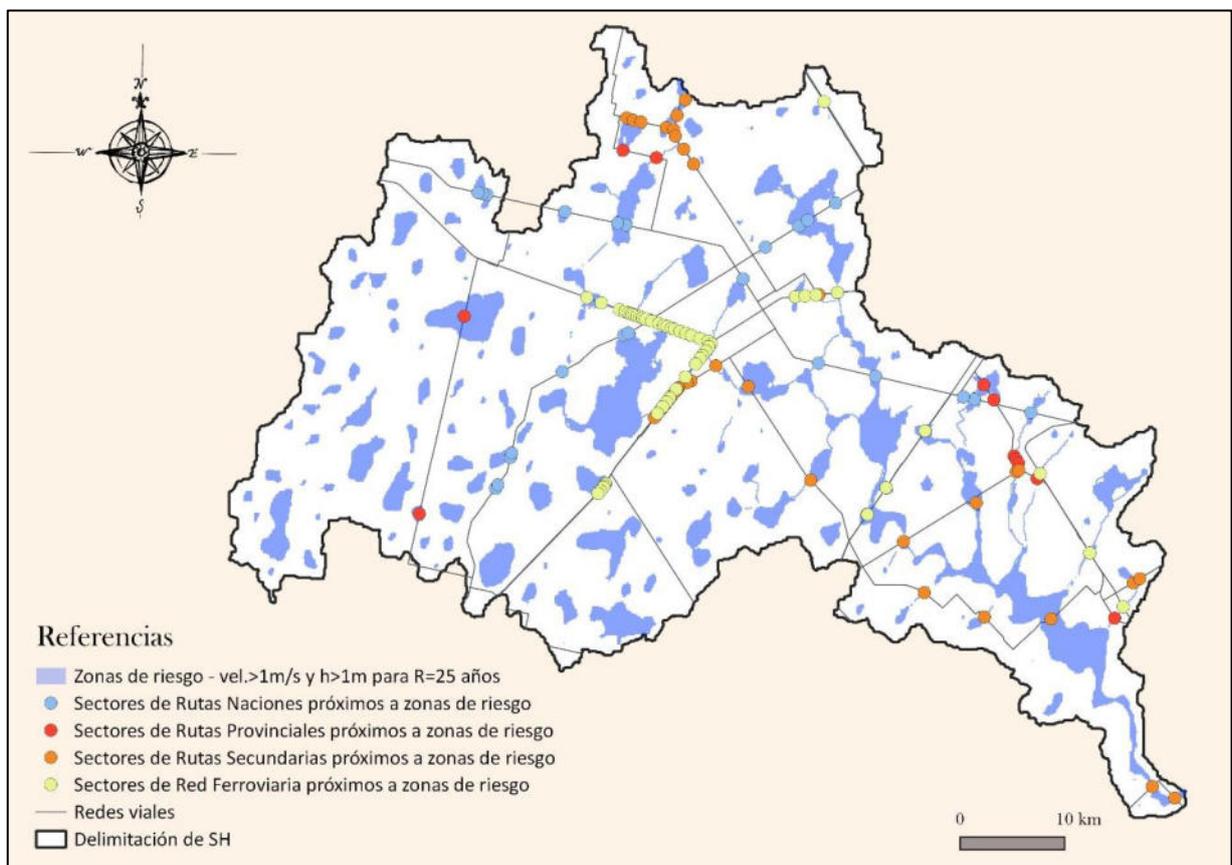


**Figura 99:** Mapa de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC para una recurrencia de 50 años.

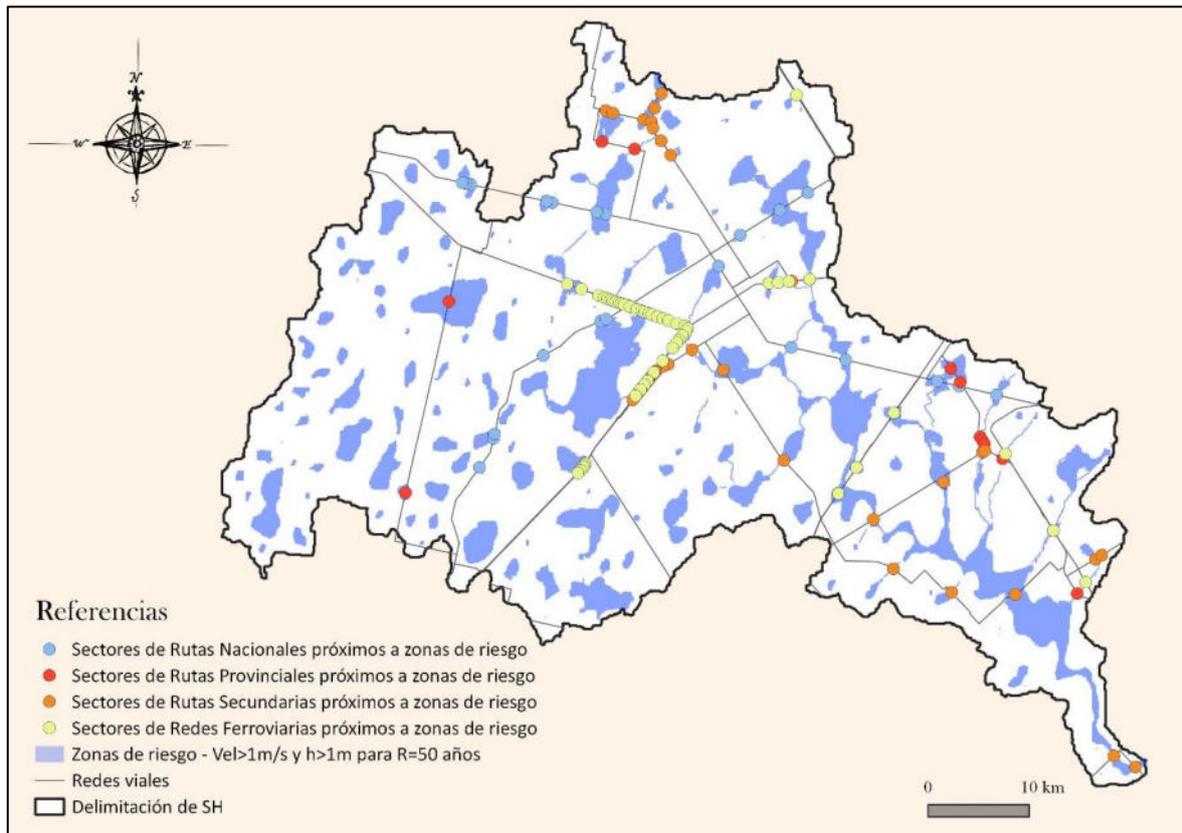


**Figura 100:** Mapa de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

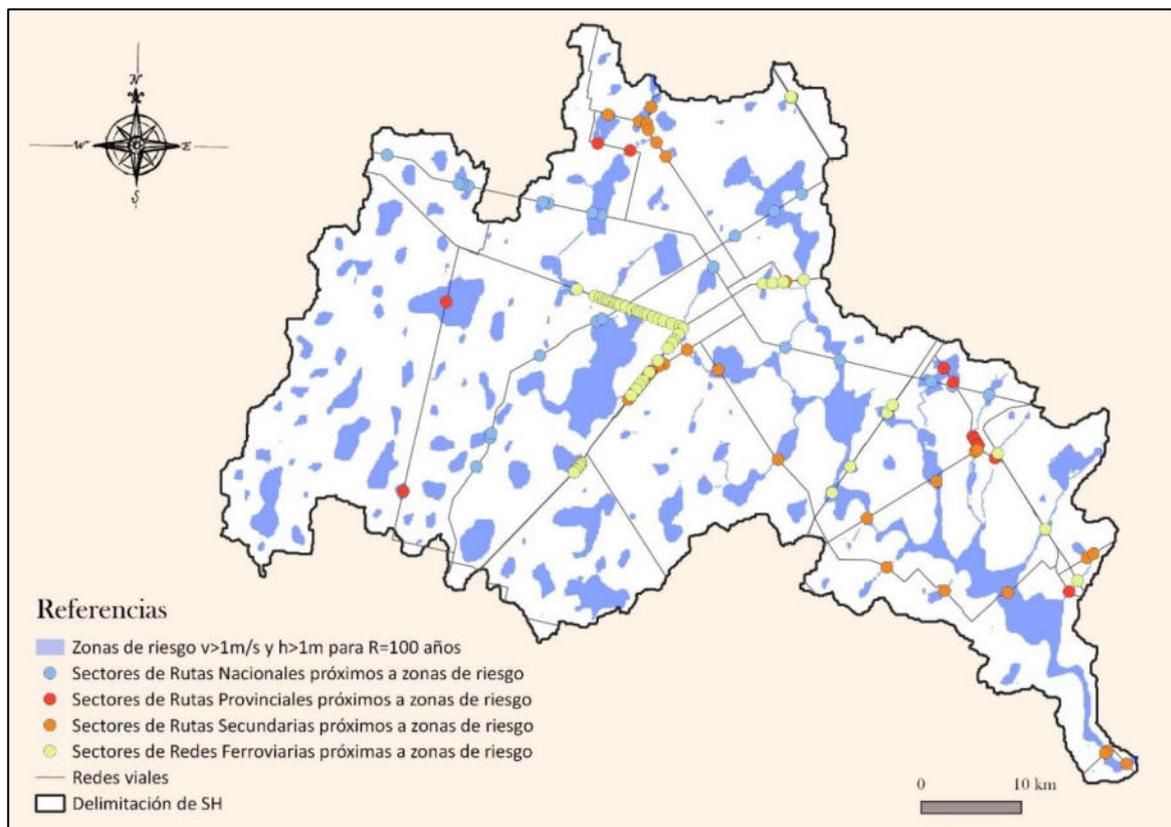
La tercera serie de mapas (Figura 101 a 103) resulta de un análisis de las simulaciones para recurrencias de 25, 50 y 100 años con el incremento del máximo coeficiente de CC. El análisis contempla la clasificación entre superficies que han superado el tirante de 1m de agua en algún momento de la simulación, juntamente con la superación de la velocidad de 1m/s en su escurrimiento, consideradas como zonas de riesgo; y las superficies que no han alcanzado dichos condicionantes. Posteriormente son consideradas las redes viales pertenecientes al SH, efectuando puntualizaciones en los tramos de éstas que presentan cercanía a las zonas de riesgo, con metodologías similares a las series de mapas anteriores.



**Figura 101:** Mapa de riesgo en redes viales contemplando CC para una recurrencia de 25 años.

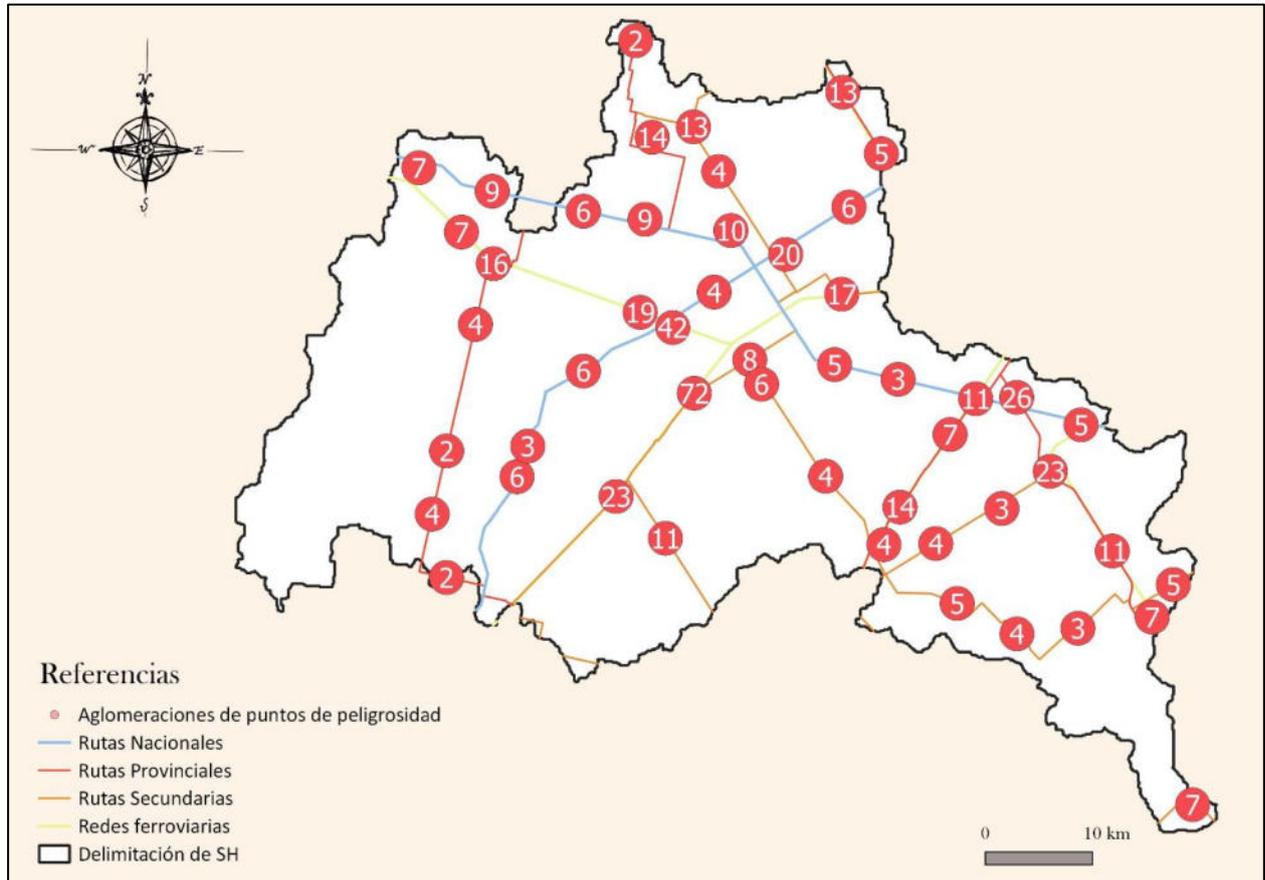


**Figura 102:** Mapa de riesgo en redes viales contemplando CC para una recurrencia de 50 años.



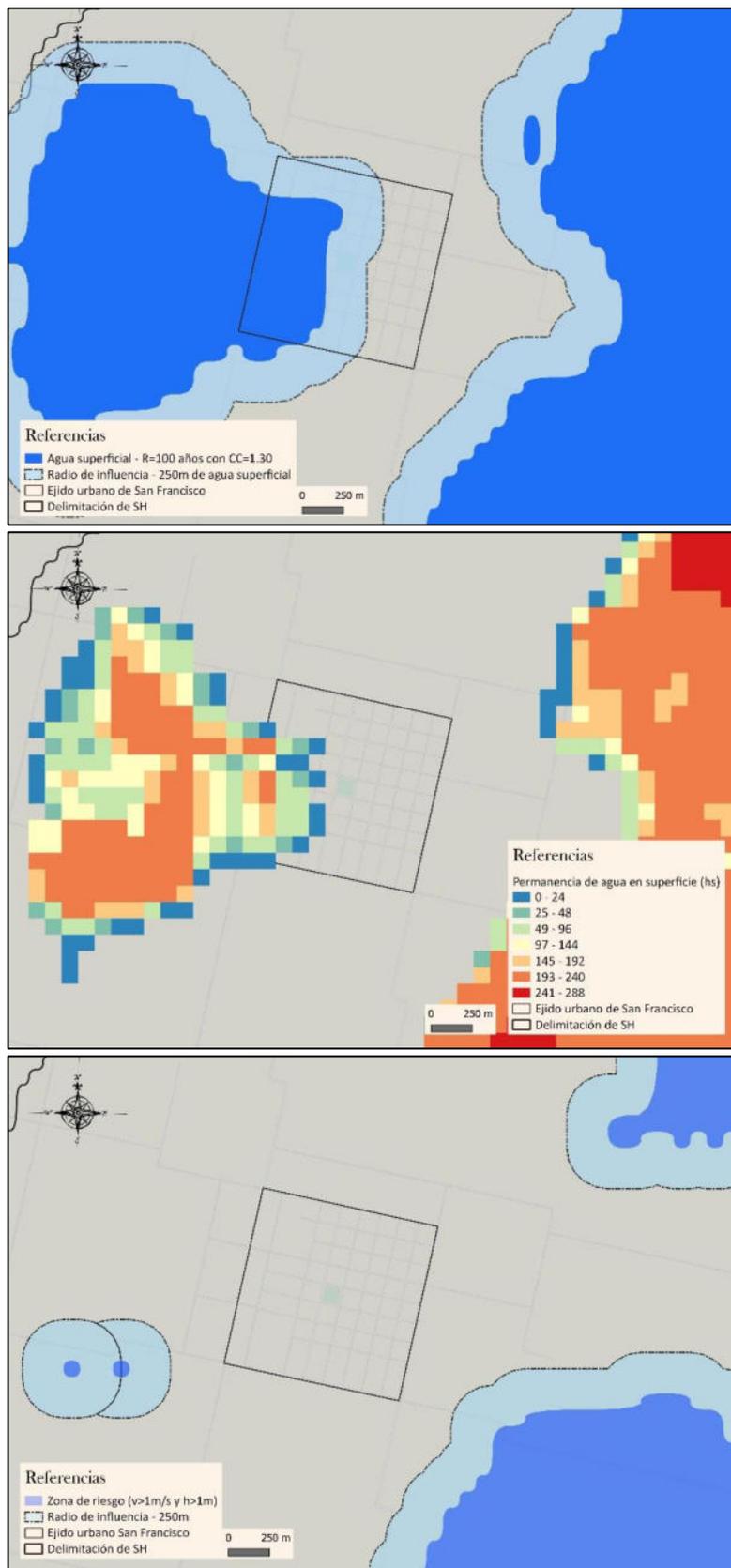
**Figura 103:** Mapa de riesgo en redes viales contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

Una cuarta tipología de mapa (Figura104) presenta un compendio de las puntualizaciones de los sectores de amenazas/peligrosidad presentados en las tres series anteriores aglomerando los puntos por cercanía, con el objeto de visualizar los sectores más comprometidos dentro del SH.



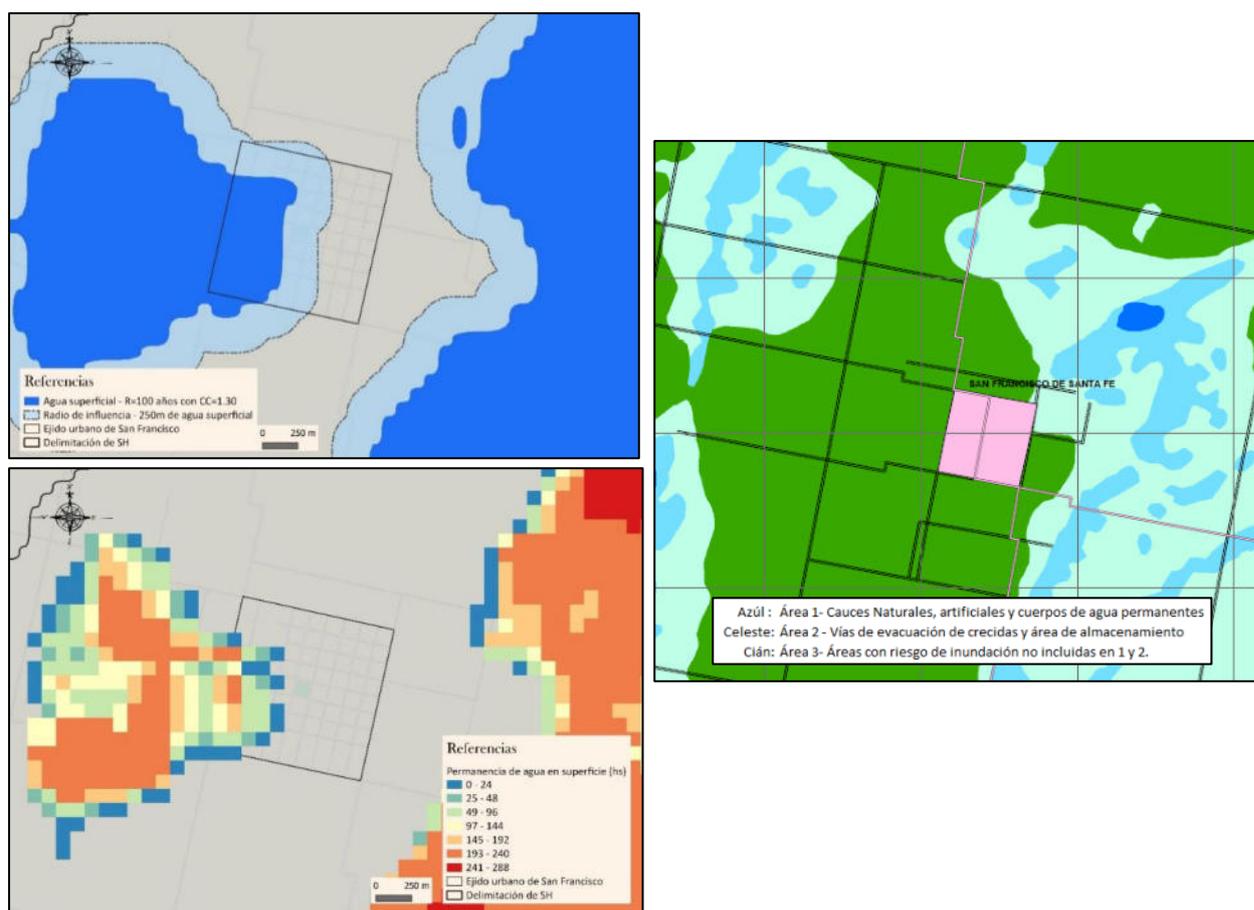
**Figura 104:** Mapa de detección de sectores del SH con peligrosidad frente a eventos con CC conforme agua superficial, su permanencia, tirante y velocidad.

Para finalizar, se presentan mapas de amenazas/peligrosidad de riesgo hídrico para las localidades pertenecientes íntegramente al SH Las Encadenadas. Dichos mapas contienen áreas de influencia a 250m a las manifestaciones de riesgo, lo cual brinda un panorama de la posible afectación urbana (Figuras 105, 107, 109, 111, 113, 115 y 117). Además, se realiza una comparativa entre las imágenes de amenaza realizadas en esta Tesis para algunas de las localidades, en conjunto con los Mapas de amenaza presentadas en el archivo de planos de la Ley 11,730 (Gobierno de la Provincia de Santa Fe, s.f.) sobre las cuales se presentan disimilitudes (Figuras 106, 108, 110, 112, 114, 116). Seguidamente, se realizan breves comentarios sobre dichas diferencias para cada localidad de análisis en particular.

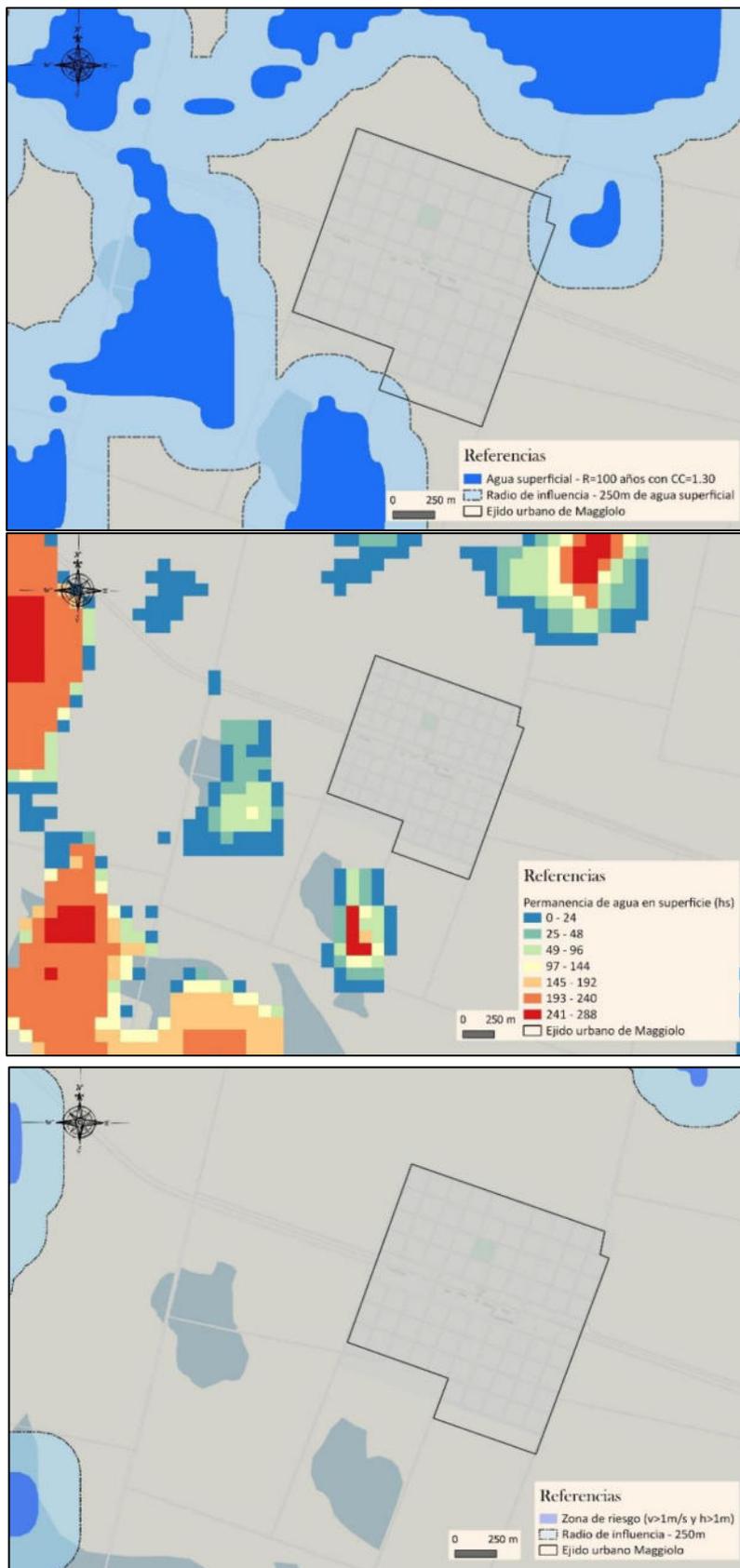


**Figura 105:** Mapa de amenaza para la localidad de San Francisco, producto de eventos climáticos considerando CC.

- **San Francisco:** Como puede apreciarse en la Figura 106, en esta Tesis el riesgo se presenta potencialmente desde la zona oeste a la localidad de San Francisco, y en la imagen obtenida por el atlas se presenta desde el este. Se considera que quizás, la diferencia radique en que, al tener esta Tesis una base de simulaciones de eventos y producto de esto, tal como lo expresa la imagen inferior izquierda presente en Figura 106, una aproximación sobre la permanencia de agua en superficie, dicha zona haya escapado al análisis del atlas, el cual utiliza una metodología quizás más estática basada en imágenes satelitales puntuales.

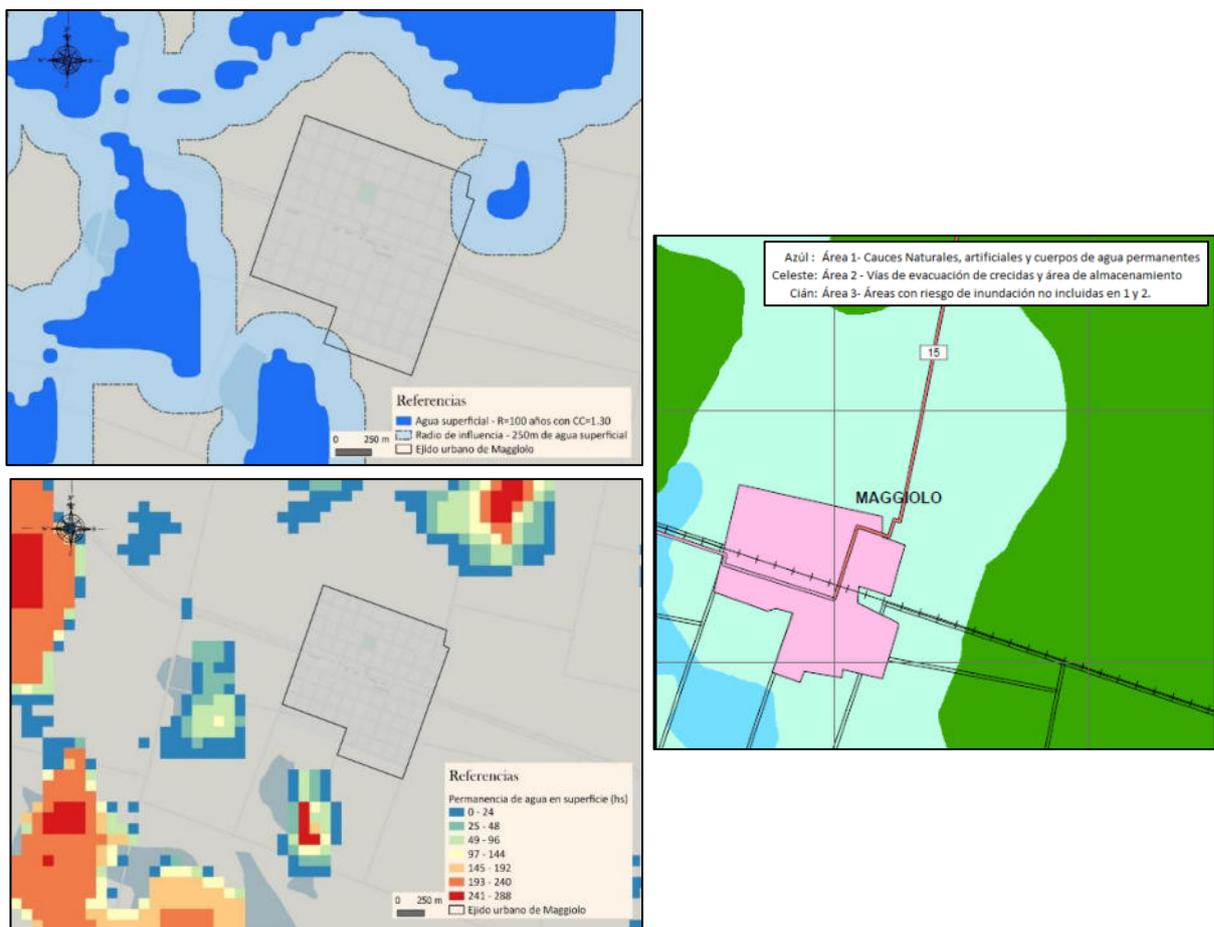


**Figura 106:** Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de San Francisco. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: Mapas del archivo de planos de la Ley 11,730.

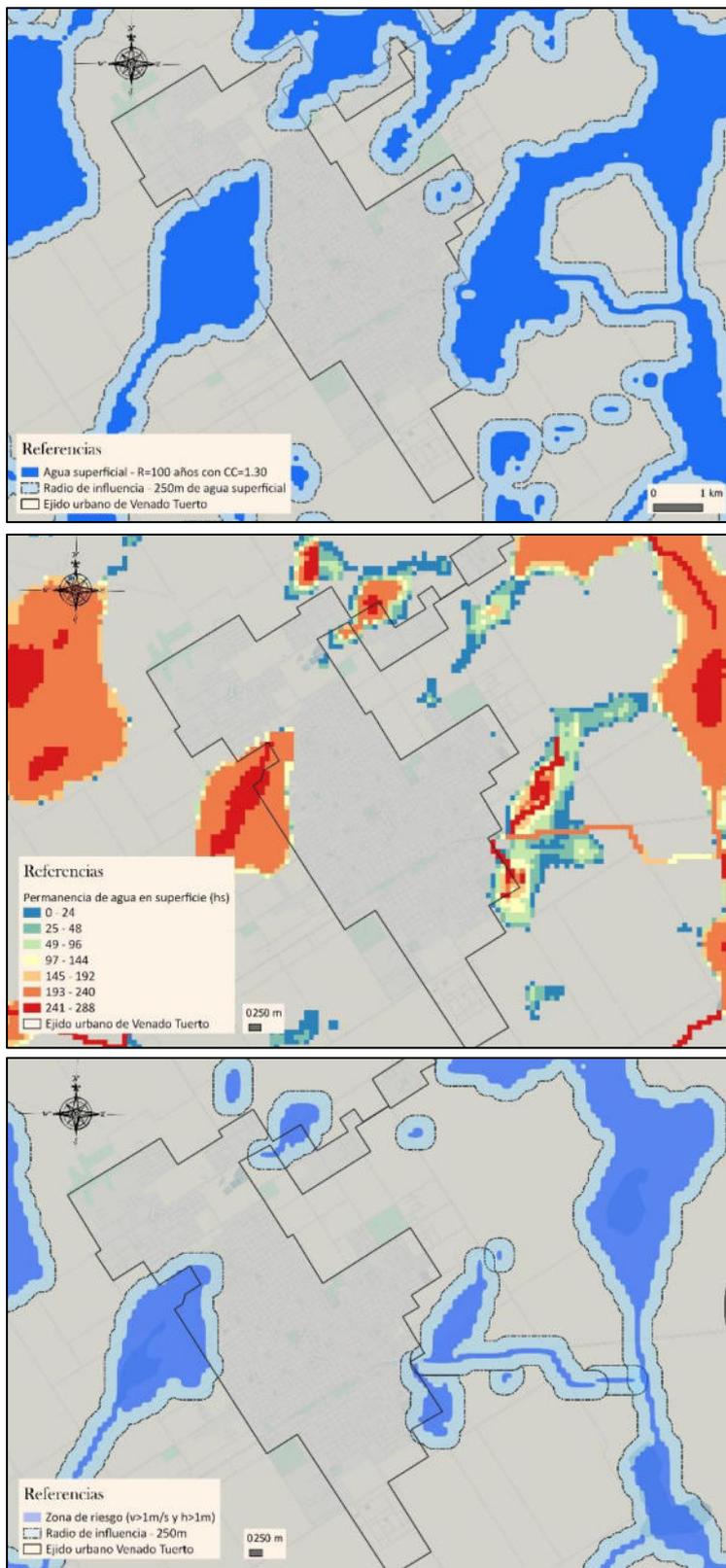


**Figura 107:** Mapa de amenaza para la localidad de Maggiolo, producto de eventos climáticos considerando CC.

- **Maggiolo:** Para esta localidad, desde lo realizado en esta Tesis se presenta cierta cercanía del riesgo, es decir, las zonas de mayor riesgo se encuentran a una distancia aproximada de 200m del agua en superficie; pero con respecto a la imagen presentada en el atlas, surgen dos interpretaciones: o bien dicha imagen considera que el riesgo se manifiesta por todos los frentes a la localidad, o bien no hay riesgo para la localidad, pero si para el área circundante. Desde lo realizado, puede observarse en la Figura 108, en la parte inferior izquierda, que el agua más próxima al poblado desaparece en el menor rango de tiempo presentado.

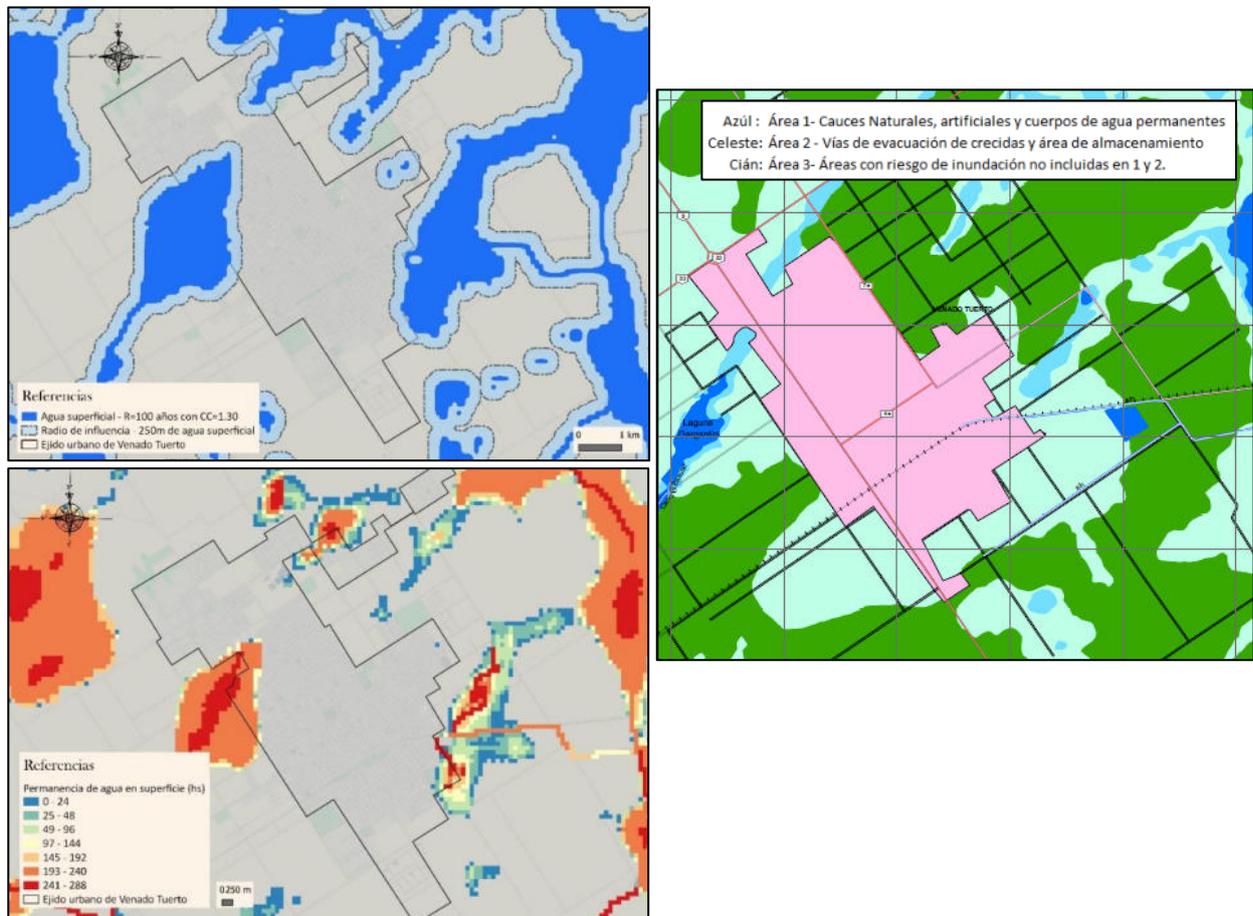


**Figura 108:** Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Maggiolo. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11,730.

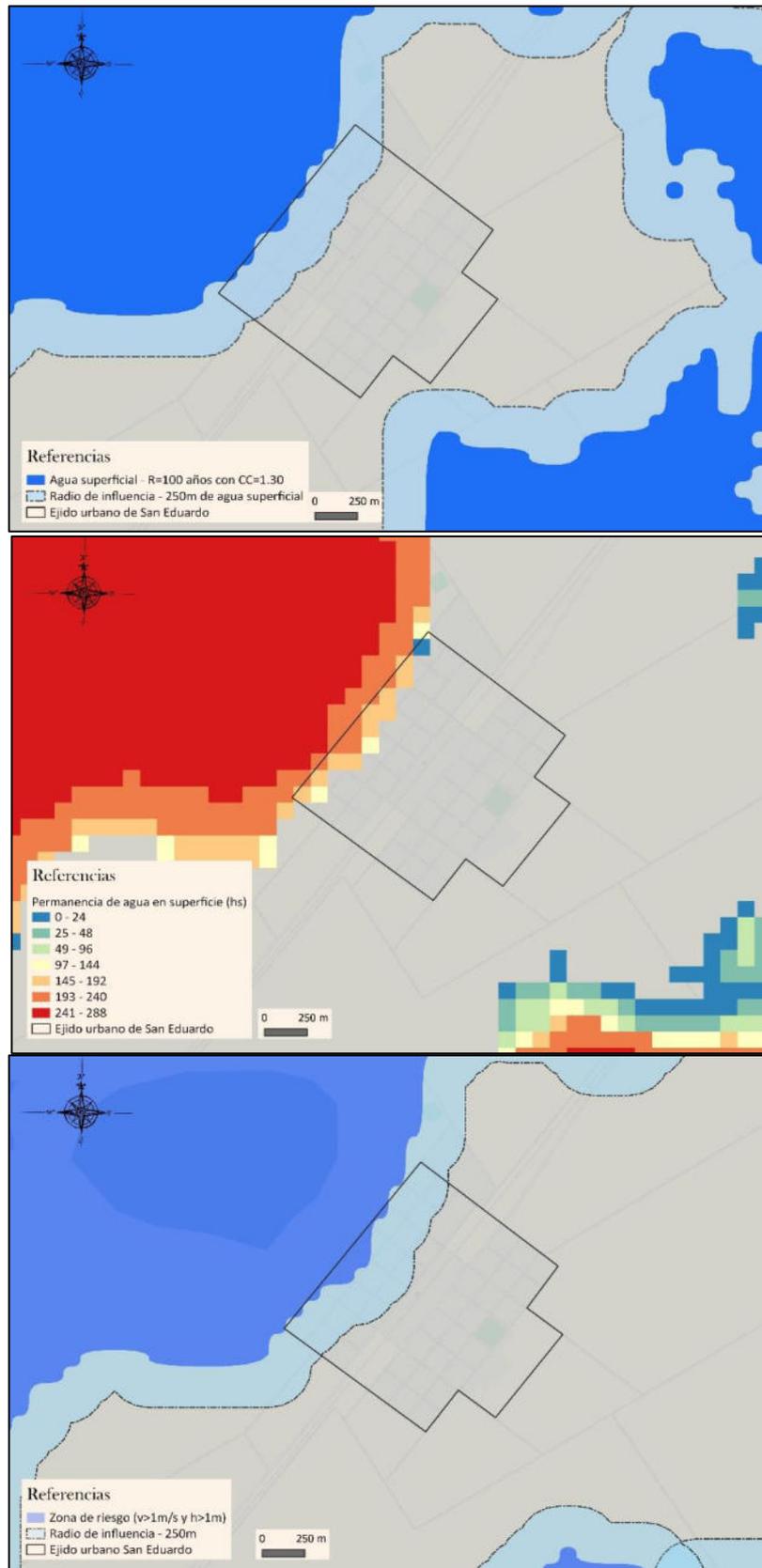


**Figura 109:** Mapa de amenaza para la localidad de Venado Tuerto, producto de eventos climáticos considerando CC.

- **Venado Tuerto:** En esta localidad, se presenta un caso similar al expuesto para la localidad de Maggiolo; en Figura 110 se evidencia que en el atlas no resulta claro si toda la ciudad se encuentra en riesgo de inundación, o si la ciudad se encuentra fuera de riesgo, pero el área circundante sí. En la Tesis, se visualizan zonas puntuales de riesgo, y una alerta de cuáles son las zonas en las cuales demorará considerablemente en escurrir el agua.

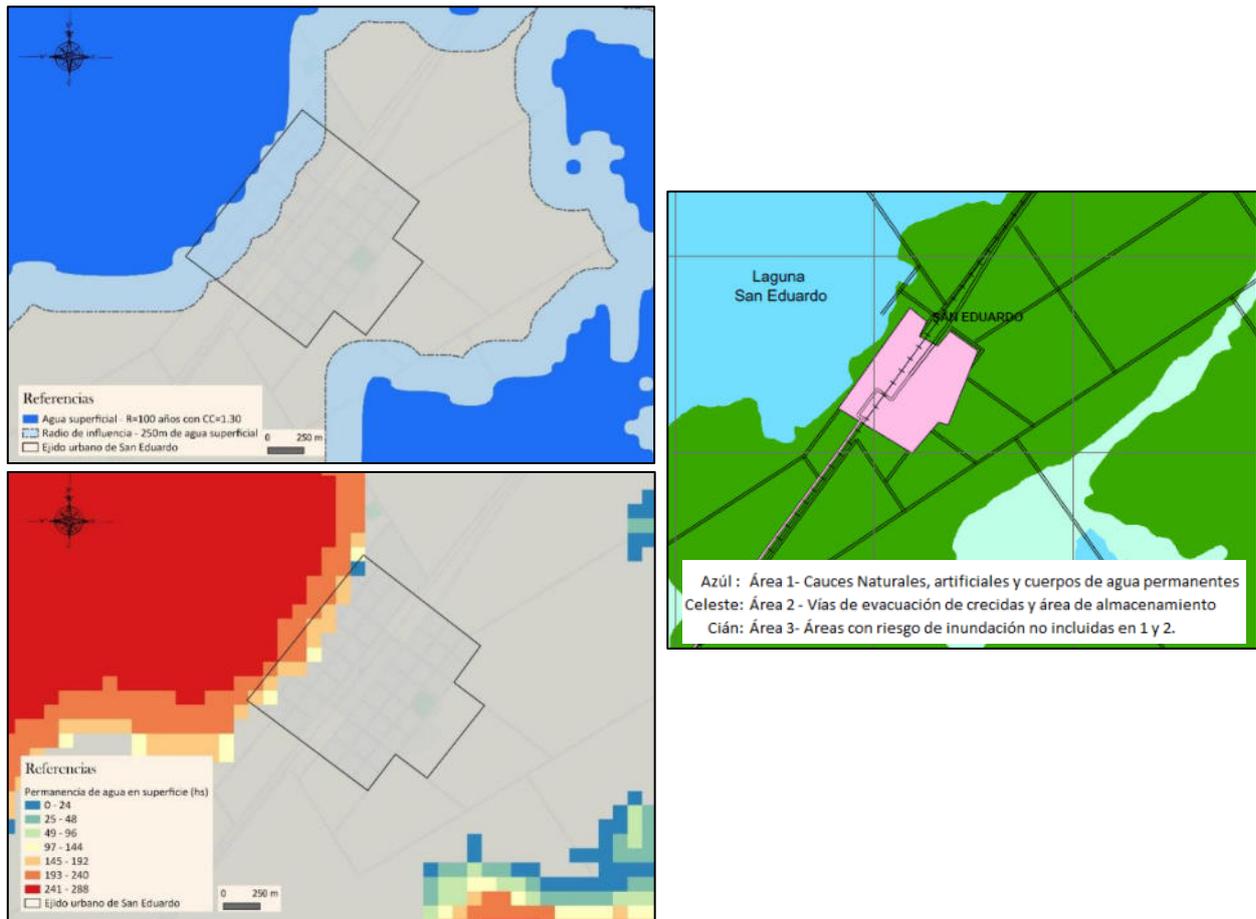


**Figura 110:** Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Venado Tuerto. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11,730.

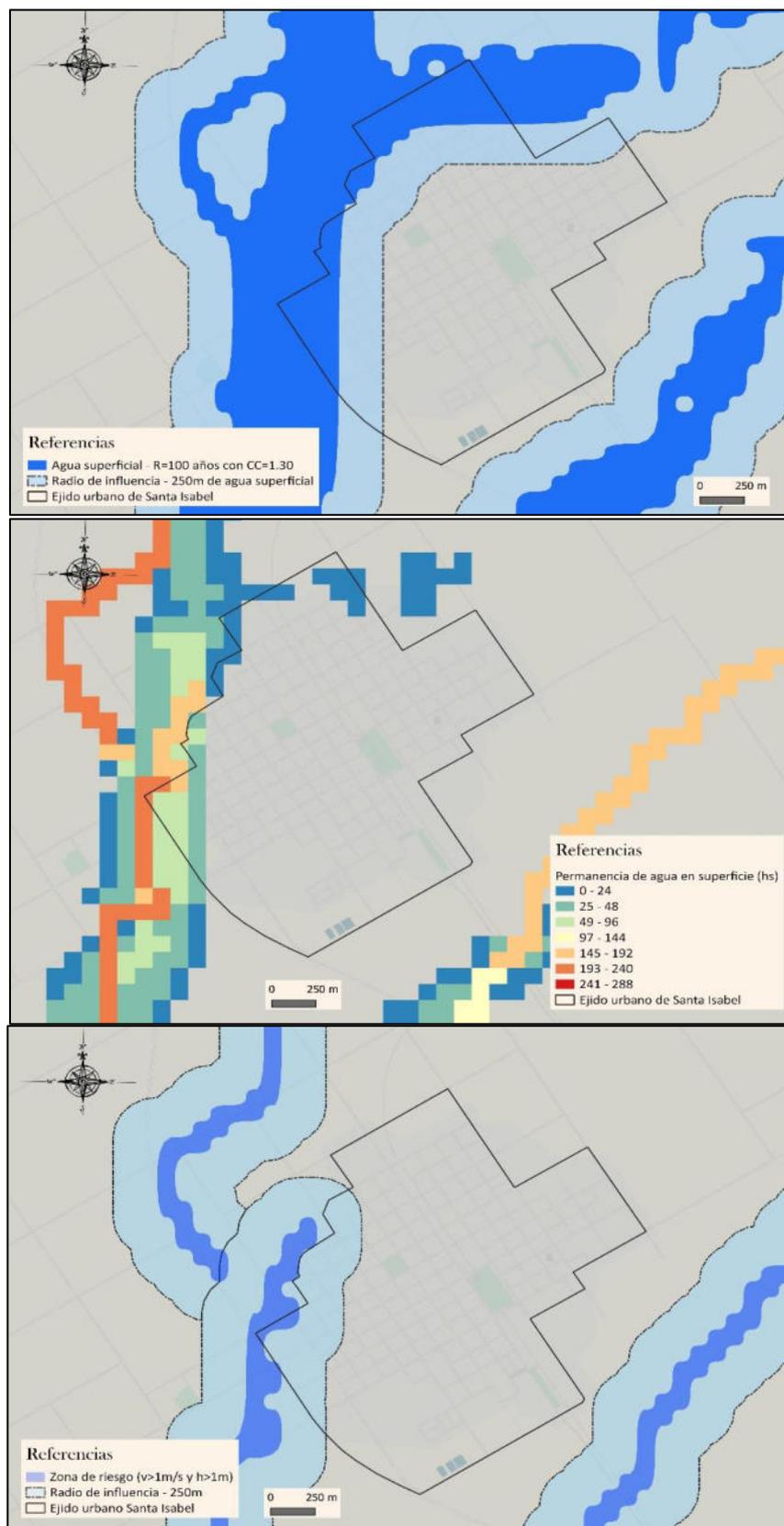


**Figura 111:** Mapa de amenaza para la localidad de San Eduardo, producto de eventos climáticos considerando CC.

- San Eduardo: Para esta localidad, si bien se evidencia en ambos mapas que el riesgo se manifiesta por el mismo sector al poblado, desde esta Tesis se resalta que el riesgo se presenta al límite del mismo, quedando una parte considerable de la localidad dentro de la zona de influencia. Además, como se evidencia en la Figura 112, en la parte inferior izquierda, el agua superficial demora mucho tiempo en escurrir, lo cual agrava la situación.

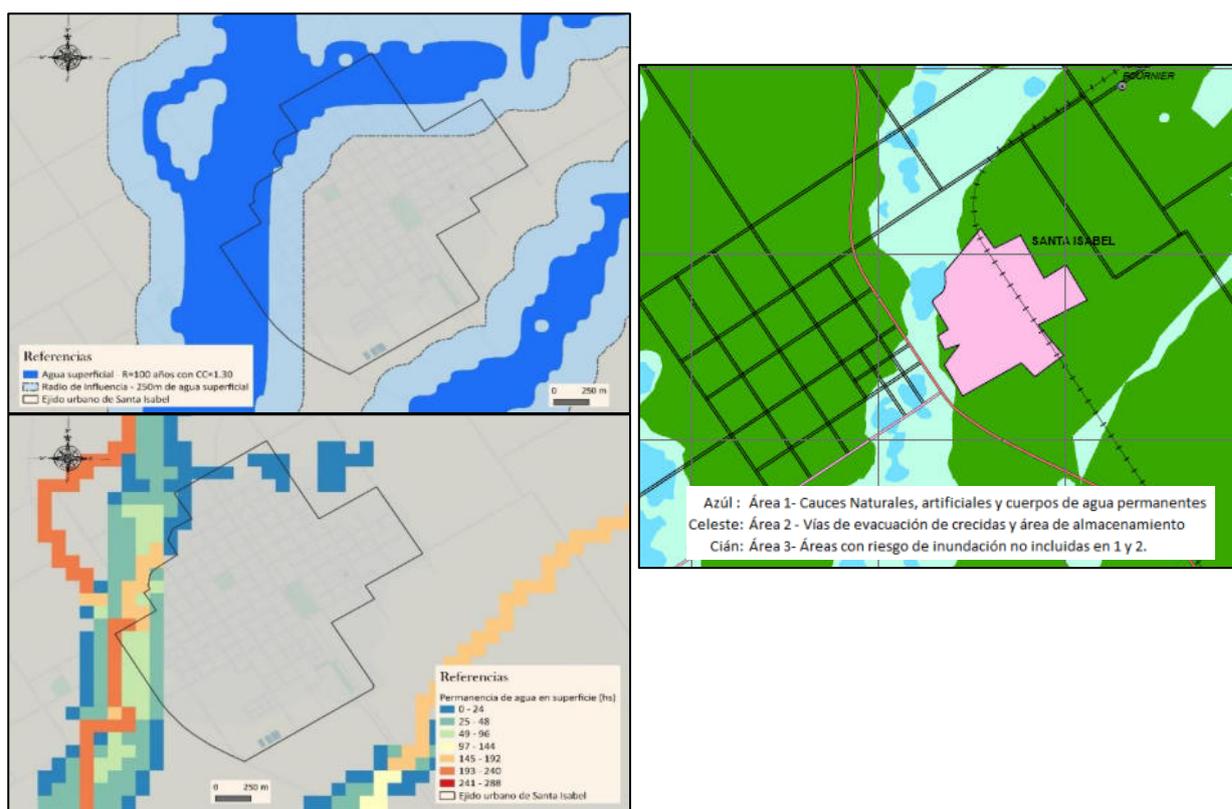


**Figura 112:** Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de San Eduardo. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11,730.

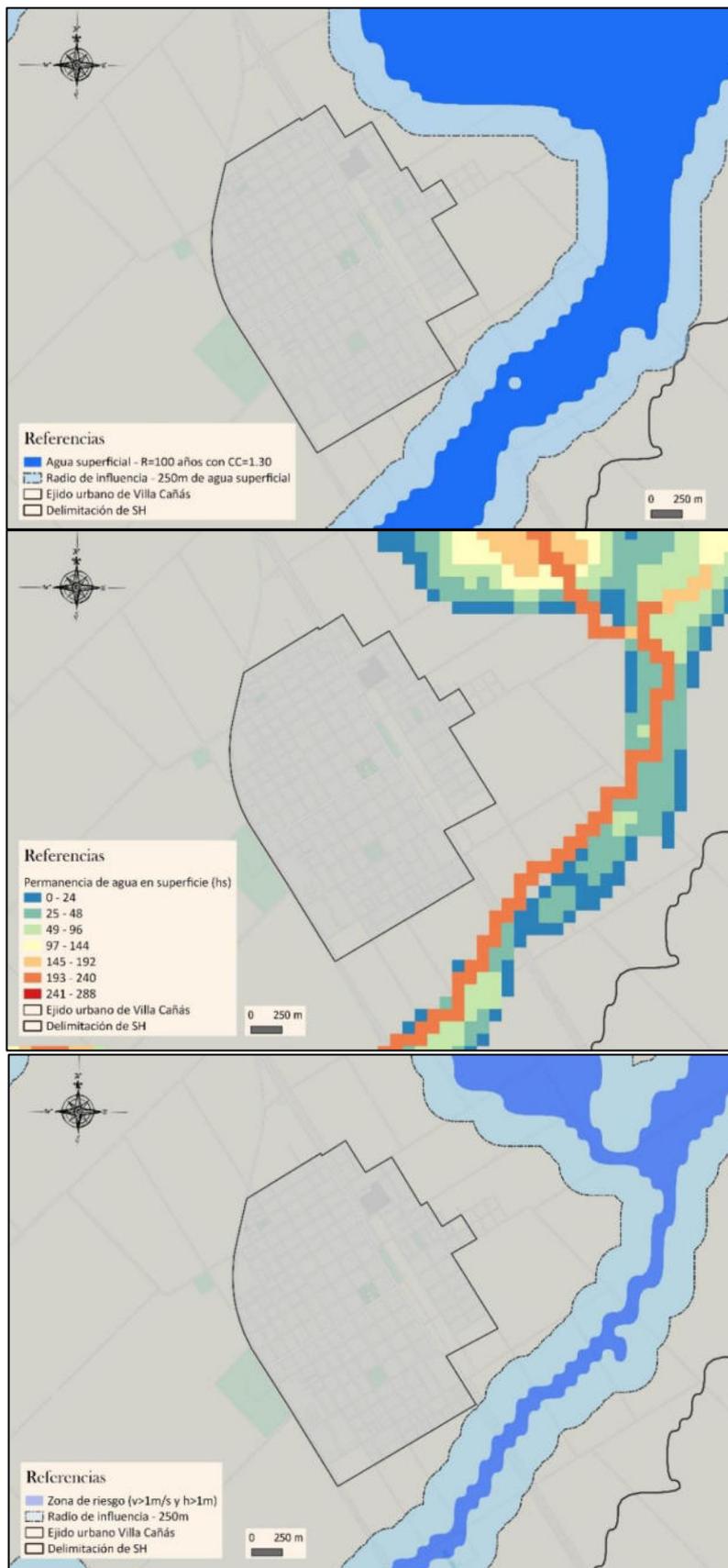


**Figura 113:** Mapa de amenaza para la localidad de Santa Isabel, producto de eventos climáticos considerando CC.

- Santa Isabel: En esta localidad ocurre una situación como la planteada para la localidad de San Eduardo. En Figura 114 se demuestra que los sectores por los que se manifiesta el riesgo son los mismos tanto en el trabajo como en la Tesis, pero en lo analizado por esta Tesis se presenta el riesgo dentro del pueblo, no sólo en cercanías; y tal como lo expresado en el caso de San Francisco, el agua que se presenta más cercana al poblado escurre en el menor rango de tiempo analizado, quizás por ello la disimilitud.

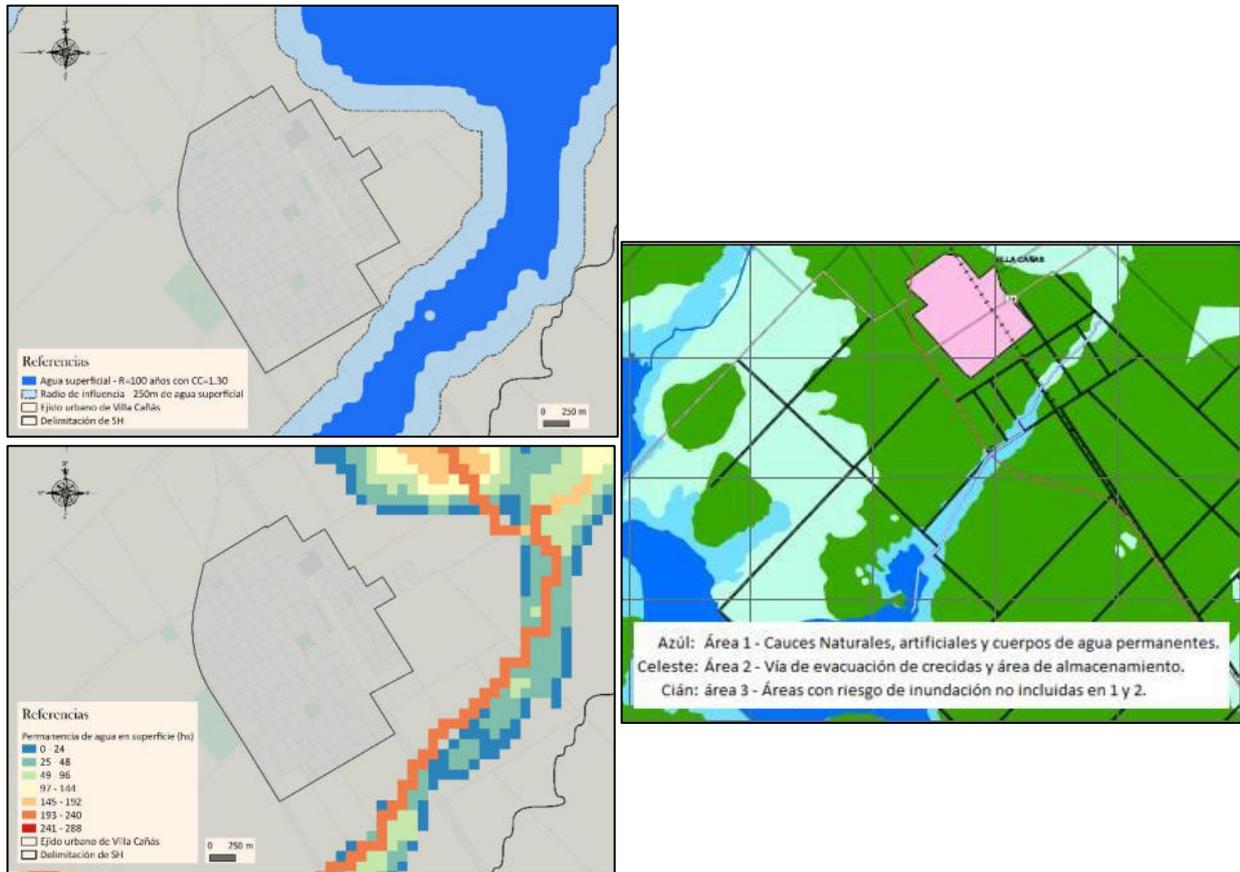


**Figura 114:** Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Santa Isabel. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11,730.

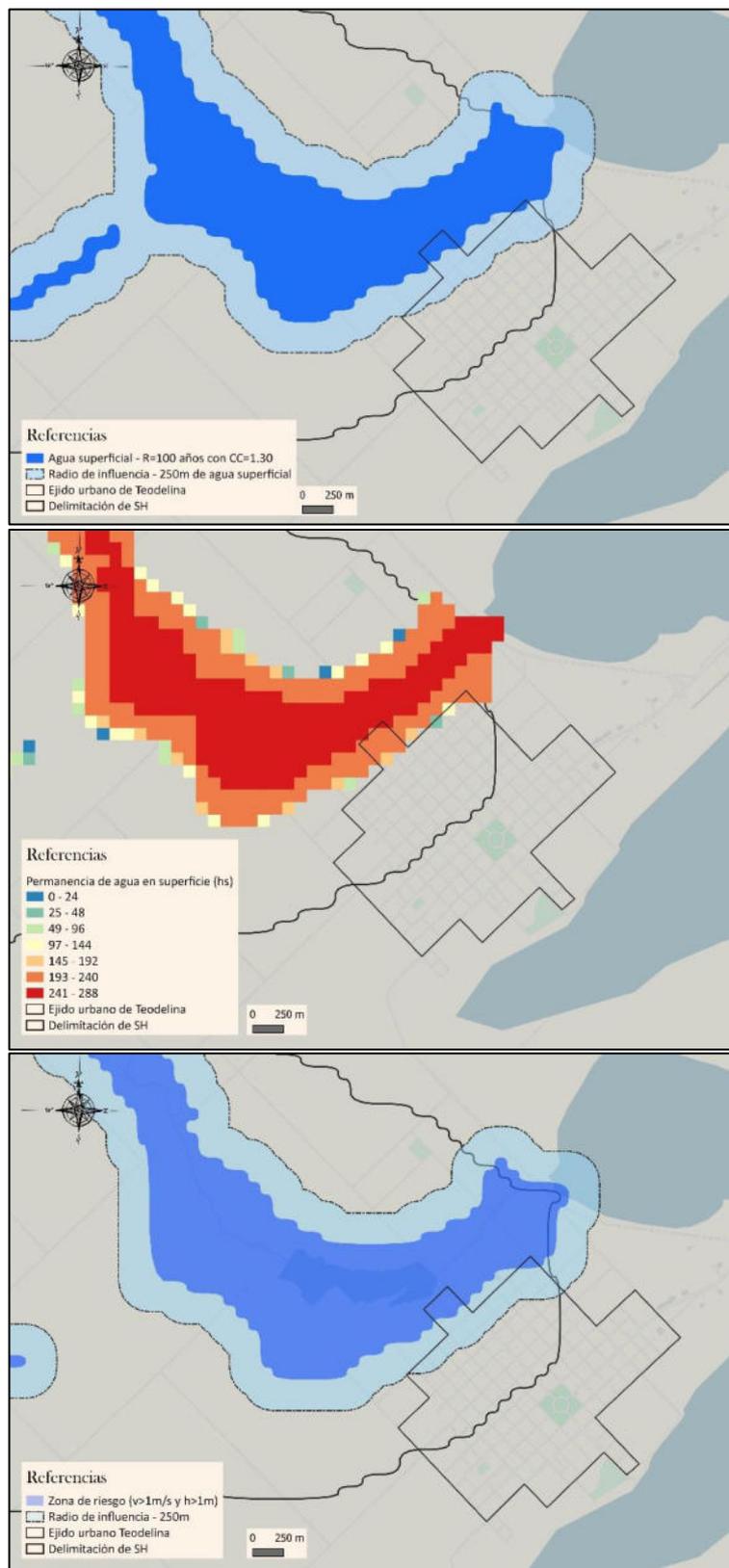


**Figura 115:** Mapa de amenaza para la localidad de Villa Cañás, producto de eventos climáticos considerando CC.

Villa Cañás: En este caso, puede observarse en la Figura 116, que la zona de riesgo y su área de influencia planteadas por esta Tesis, son semejantes a la planteada en el Mapa del archivo de planos de la Ley 11730, para la localidad de Villa Cañás.

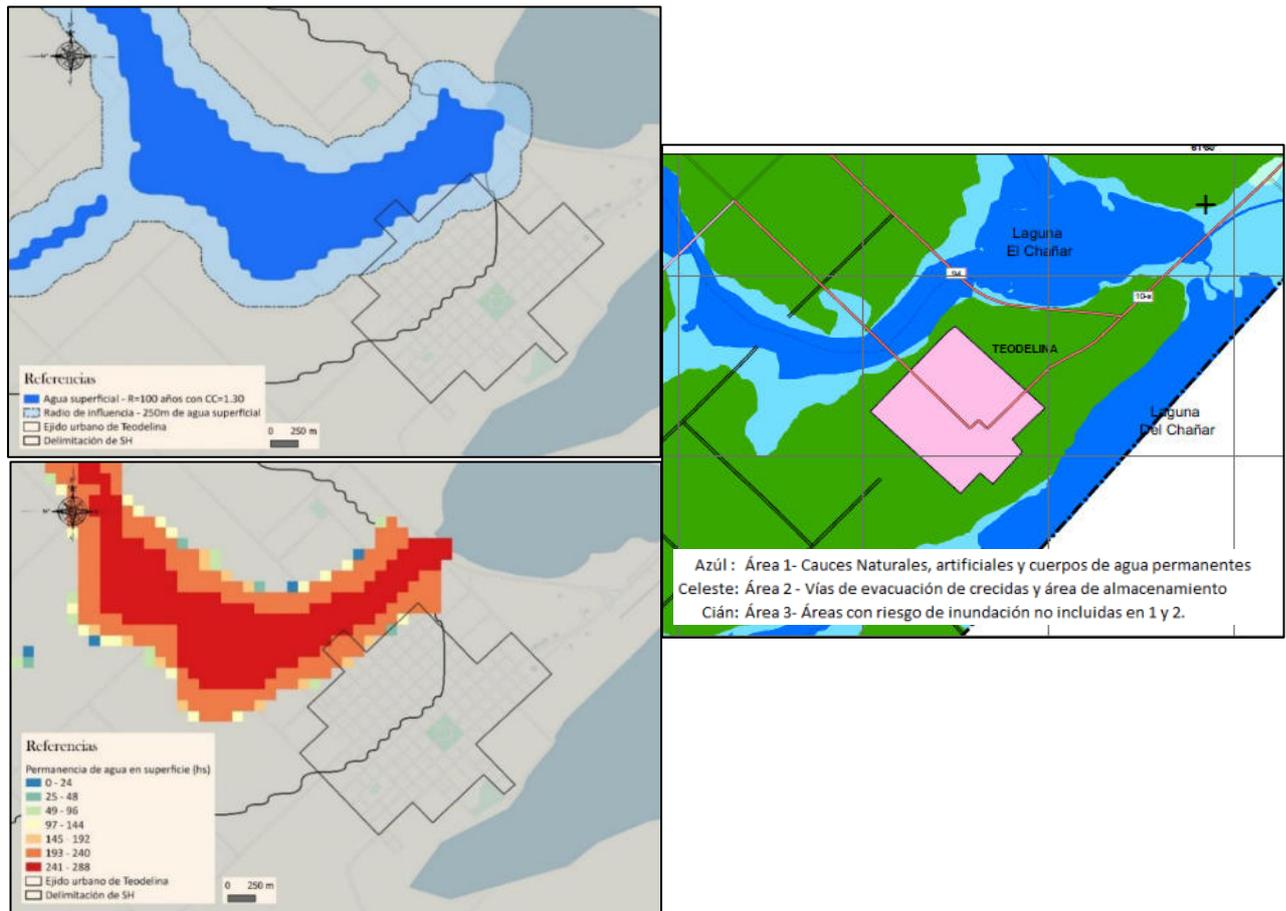


**Imagen 116:** Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Villa Cañás. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11,730.



**Figura 117:** Mapa de amenaza para la localidad de Teodelina, producto de eventos climáticos considerando CC.

- **Teodelina:** Este caso resulta similar a lo planteado para la localidad de San Eduardo. En Figura 118 se demuestra que la zona de riesgo y su área de influencia se presentan en contacto con la localidad, a diferencia de lo presentado en el atlas. Además, en esta Tesis se expone que el agua superficial presente manifiesta una permanencia importante antes del escurrimiento, lo cual resulta una situación significativa a considerar.



**Figura 118:** Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Teodelina. Izquierda: mapas elaborados en esta Tesis, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11,730.

Resulta conveniente aclarar en este Capítulo, tal como se fue visualizando a lo largo de la lectura de la Tesis, que el análisis realizado en esta Tesis fue basado en el proceso del ciclo hidrológico dominante, que es en este caso el horizontal. Resta para otros estudios analizar el comportamiento del SH en lapsos de tiempo mayores, que contemplen los procesos verticales.

## **5. CONCLUSIONES**

Como conclusión principal, puede decirse que se ha cumplido con el objetivo general de la presente Tesis, el cual es estudiar la dinámica hídrica de SH de llanura, mediante la conceptualización de los procesos relevantes involucrados y la simulación hidrológica-hidráulica correspondiente; incorporando la incertidumbre asociada a diferentes escenarios de CC.

Como principales resultados del trabajo, fue lograda la cuantificación y mapeo de superficies de agua y caudales presentes en el SH, la permanencia del agua superficial y la cercanía de la misma a ejidos urbanos y redes viales, para recurrencias con y sin consideración del efecto por CC.

En cuanto a la superficie del SH Las Encadenadas para una recurrencia de 25 años, en condiciones de suelo normales y sin considerar CC, se alcanza las 45,236 ha (el 13.97% de la superficie del SH) y caudales pico del orden de los 40 m<sup>3</sup>/s; mientras que en peores condiciones (suelo cuasi-saturado y Coef. de CC=1.30) alcanza las 60,267 ha (18.61% de la superficie del SH) y caudales pico del orden de los 80 m<sup>3</sup>/s. Para una recurrencia de 50 años, en condiciones de suelo normales y sin considerar CC se tienen 47,498 ha de la superficie del SH ocupadas con agua (14.67% del total de la superficie del SH) y caudales pico próximos a los 50 m<sup>3</sup>/s; siendo que para condiciones de suelo cuasi-saturado y Coef. de CC de 1.30, se tienen 62,396 ha ocupadas con agua (19.27% del total del SH) y caudales pico cercanos a los 250 m<sup>3</sup>/s. Para recurrencias de 100 años, en condiciones de suelo normales y sin considerar CC se tienen 49,220 ha del SH ocupadas con agua (15.20% de la superficie del SH) y caudales pico próximos a los 60 m<sup>3</sup>/s; mientras que para condiciones de suelo cuasi-saturado y Coef. de CC de 1.30 se tiene una superficie de 64,514 ha ocupadas con agua (19.92% de la superficie total del SH) y caudales pico del orden de los 320 m<sup>3</sup>/s.

En cuanto a la permanencia del agua en la superficie, se obtuvo que para una recurrencia de 25 años, sin considerar el efecto del CC, sólo el 8% del agua superficial escurre dentro de las primeras 24 h de iniciado el evento climático, mientras que más del 47% de la superficie con agua presente tiene una demora superior a 193 h en escurrir y; considerando la peor condición de CC (Coef. de CC=1.30) se tiene que el 10.5% del agua presente escurre dentro de las 24 h y más del 53%, después de las 193 h. Para una recurrencia de 50 años, sin considerar el efecto del CC, se tiene que el 10.1% del agua presente en el SH escurre dentro de las 24 h

de iniciado el evento climático, y más del 52% del agua, posterior a las 193 h y; teniendo en cuenta el peor efecto por CC (Coef. CC=1.30) se tiene que el 11.1% escurre dentro de las 24 h y más del 53% pasadas las 193 h. En cuanto a la recurrencia de 100 años, sin considerar CC, se tiene que el 10.7% del agua presente en el SH escurre dentro de las 24 h y más del 52% del agua presente, después de las 193 h. En cuanto a la recurrencia de 100 años, pero considerando el peor efecto por CC se tiene que el escurrimiento del agua presente que se da dentro de la primeras 24 h es del 11.6% y el 51.2% pasadas las 193 h.

Con respecto a los tramos con agua en sus proximidades, se presenta para una recurrencia de 25 años, la existencia de 122 tramos, de los cuales 48 corresponden a redes ferroviarias, 21 a rutas nacionales, 12 a rutas provinciales y 41 a rutas secundarias; resultando 19 de los 122 tramos, con longitud superior a los 1400 m. Para una recurrencia de 50 años, son 124 los tramos con agua en cercanías, de los cuales 20 superan los 1,400 m de longitud y; para una recurrencia de 100 años, son 202 los tramos que poseen agua en sus cercanías, conformados de la siguiente manera: 40 pertenecen a rutas nacionales, 41 a rutas provinciales, 64 a rutas secundarias y 57 a redes ferroviarias. Cabe destacar que 26 de los 202 tramos para la recurrencia de 100 años poseen una longitud superior a los 1,400 m.

Toda esta información también presentada espacialmente en el SH mediante mapas permite una clara y rápida comprensión de la amenaza/peligrosidad en la cual se encuentra el SH frente a determinadas condiciones climáticas, lo cual favorece a la toma de decisiones de los actores correspondientes.

Otro resultado que merece sea mencionado, es la obtención de una nueva delimitación del SH, más extensa a las actualmente vigentes (3,237 km<sup>2</sup> respecto a ~1,680 km<sup>2</sup> del INA y ~2,130 km<sup>2</sup> del Ministerio de Infraestructura y Transporte) la cual como fue demostrado, contempla superficies que aportan al SH frente a eventos del orden de los 100 años de recurrencia o superiores.

Además, se realiza un aporte concreto en la región del SH a un mejor detalle en la zonificación y regulación del uso del suelo en áreas inundables en sistemas hídricos de la provincia de Santa Fe de acuerdo con ley 11,730 en referencias a la definición de áreas con Riesgo Hídrico.

Como aporte de la Tesis en el avance del conocimiento, se resalta la contribución respecto a la representación de la dinámica del escurrimiento superficial en una cuenca compleja, donde no había antecedentes de calibración y explotación de un modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado, para simulación de eventos, del tipo utilizado en la Tesis.

Resulta muy importante también la contribución que se logra en estos estudios hidrológicos-hidráulicos desde la Geomática, en la obtención y manipulación de datos y resultados en cuencas escasamente aforadas.

Cabe destacar que es implementada una novedosa metodología para la determinación de las topobatimetrías de las lagunas y correspondientes curvas nivel-almacenamiento.

También se resalta la contribución (inédita en el SH) de la calibración a partir del entrecruzamiento de áreas inundadas simuladas (con un modelo apropiado para la representación de la dinámica del escurrimiento en zonas de llanura) y áreas inundadas obtenidas de imágenes satelitales. En sistemas hidrológicos de este tipo, la calibración con mediciones puntuales de caudal en un lugar o en algunos puntos específicos, no necesariamente puede capturar la dinámica de los procesos de almacenamiento y escurrimiento superficial en toda la cuenca; lo cual es posible solo con un modelo del tipo aquí utilizado juntamente con dicha estrategia de calibración. Esta metodología, de evaluar niveles de lagunas en calibración/validación, resulta un gran avance de la Tesis, puesto que se trata de las condiciones iniciales y de borde predominantes, necesarias para una correcta simulación por eventos; ya que el almacenamiento superficial es en este tipo de SHNT gravitante en la valoración de la posible amenaza de inundación en cualquier evento, en variables como altura de agua y permanencia de inundación.

Esta Tesis puede considerarse como un avance para estudios futuros, mediante la implementación de modelos que incorporen otros aspectos del ciclo hidrológico (modelos continuos). En esta Tesis se optó por representar la dinámica de los procesos de almacenamiento y escurrimiento superficial asociados a eventos de lluvias máximas de 5 días de duración, similares a eventos ya acontecidos, los cuales han puesto en emergencia diferentes rutas y poblaciones dentro de la cuenca. Justamente uno de esos eventos (diciembre 2016) fue utilizado en la calibración del modelo.

Además, se realiza un aporte a la rasterización de diversos tipos de información (meteorológica, hidrológica, hidráulica, morfológica, cobertura de suelo, usos de suelo, etc)

del SH en estudio para su posible ensamblaje futuro con todo tipo de sistema de información geográfica.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

- Arango, M., Bacigaluppo, S., Castellarin, J., Craviotto, R., De Emilio, M., Gallo, V., & Gerster, G. R. (2019). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Trigo : un cultivo que debe volver al sur de Santa Fe. Retrieved from <https://inta.gob.ar/documentos>
- Arreguín Cortés, F., & Rubio Gutierrez, H. (2014). Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el período 1995-2010. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, V(3), 5–32.
- Barrera Escoda, A., & Cunillera, J. (2011). Climate change projections for Catalonia (NE Iberian Peninsula). Part I: Regional climate modeling. *Tethys, Journal of Weather and Climate of the Western Mediterranean*, 75–87. <https://doi.org/10.3369/tethys.2011.8.08>
- Barros, V., & Camilloni, I. (2020). *La Argentina y el Cambio Climático, de la física a la política* (2nd ed.). Buenos Aires, Argentina: Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- Barros, V., Menéndez, Á., & Nagy, G. (Eds.). (2005). *El cambio climático en el Río de la Plata* (1st ed.). Retrieved from [http://www.cima.fcen.uba.ar/~lcr/libros/Cambio\\_Climatico-Texto.pdf](http://www.cima.fcen.uba.ar/~lcr/libros/Cambio_Climatico-Texto.pdf)
- Barrucand, M., & Rusticucci, M. (2007a). Argentina y el cambio climático: algunas características de la humedad y nubosidad. In Aurora Besalú Parkinson (Ed.), *Primeras Jornadas Interdisciplinarias de la Universidad de Buenos Aires sobre Cambio Climático y Global* (pp. 157–159).
- Barrucand, M., & Rusticucci, M. (2007b). Argentina y el cambio climático: algunas características sobre las temperaturas extremas y la frecuencia de ocurrencia. In Aurora Besalú Parkinson (Ed.), *Primeras Jornadas Interdisciplinarias de la Universidad de Buenos Aires sobre Cambio Climático y Global* (pp. 160–161).
- Basile, P. (2008). Mediciones hidrológicas. In H. Orsolini, E. Zimmermann, & P. Basile (Eds.), *Hidrología, Procesos y Métodos* (2nd ed., pp. 19–48). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., Palutikof, J. P., & Eds. (2008). *El cambio climático y el agua* [Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC]. Ginebra.
- Beltramino, T. (2018). Naturaleza, riesgo y sociedad. La construcción social de las inundaciones en Santa Fe (1982-83/2003). *Pampa*, 31–54.

- Besalú Parkinson, A (Ed.). (2007). Cambio Climático observado en las sequías de Argentina en la última mitad del siglo XX. In *Primeras Jornadas Interdisciplinarias de la Universidad de Buenos Aires sobre Cambio Climático y Global* (pp. 254–255).
- Bobba, A. G., Singh, V. P., Jeffries, D. S., & Bengtsson, L. (1997). Application of a watershed runoff model to north-east pond river, Newfoundland: To study water balance and hydrological characteristics owing to atmospheric change. *Hydrological Processes*, *11*, 1573–1593. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(19971015\)11:12<1573::aid-hyp491>3.0.co;2-v](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19971015)11:12<1573::aid-hyp491>3.0.co;2-v)
- Caamaño Nelli, G., Fertanoni, M., Prendes, H., & Quinodoz, H. (1979). *Analysis of Non Typical Hydrological Systems. Theoretical Bases and Methodology Criteria* [Departamento de Hidrología General y Aplicada]. Santa Fe, Argentina.
- Calbó, J., Sanchez-Lorenzo, A., Barrera-Escoda, A., & Cunillera, J. (2012). Climate change projections for Catalonia (NE Iberian Peninsula). Part II: Integrating several methodologies. *Tethys*, *9*, 13–24. <https://doi.org/10.3369/tethys.2012.9.02>
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., Gomez, M., & Valdes Abellan, J. (2015). Efectos del cambio climático y usos del suelo sobre los recursos hídricos de la cuenca del río Tordera (Barcelona, España). *Aqua-LAC*, *7*(1), 1–10.
- Cardona, O. D. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión. In *Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos*. Retrieved from [http://www.desenredando.org/public/articulos/2003/rmhcvr/rmhcvr\\_may-08-2003.pdf](http://www.desenredando.org/public/articulos/2003/rmhcvr/rmhcvr_may-08-2003.pdf)
- CARE International. (2010). *Manual para el análisis de Capacidad y Vulnerabilidad Climática (CVCA)* (1st ed.; A. Dazé, K. Ambrose, & C. Ehrhart, Eds.). Retrieved from [www.careclimatechange.org/cvca](http://www.careclimatechange.org/cvca)
- Chacón Cancino, P., & Postigo, J. (2012). Cambio Climático: Riesgo o Comunidad en la Crisis Ambiental. In J. Postigo Macdowall (Ed.), *Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas* (1st ed., pp. 126–147). Santiago de Chile: ICAL.
- Chow, V. te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada* (1 traducid). Santa Fé de Bogotá, Colombia.: McGRAW-HILL Interamericana S.A.
- Chow, V. T. (1959). *Hidráulica de canales abiertos*. Diana, México: Mac Graw-Hill, Edit.

- Chow, V. T. (2004). Desarrollo del flujo uniforme y sus ecuaciones. In M. Suárez (Ed.), *Hidráulica de canales abiertos* (pp. 109–111). McGRAW-HILL / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Chuvieco Salnero, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. In *(Fundamentals of remote sensing from space* (2nd ed.). Madrid, España: Ediciones RIALP S.A.
- Climate change and desertification* [WMO Publications]. (2007).
- CONAE. (2016). *Índices Espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI* [Guía de usuario]. Retrieved from <https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf>
- Cunge, E. (1975). *Two dimensional modelling of flood plains. Cap. 17 Unsteady flow in open channels* (K. Mahmood & V. Yevjevich, Eds.). Water Resources Publications.
- Elliott, S. (2010). *El río y la forma - Introducción a la geomorfología fluvial* (1st ed.). Retrieved from RIL website: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#InteractiveAtlas>
- Espindola, A.; Godagnone, R.; Havrylenko, S.; de la Fuente, J.C.; Mercuri, P. (2014). Generación de bases de datos de suelos para modelos hidrológicos a escalas regionales. *XXIV Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo, 000*.
- EVARSA. (1995). *Obras de evacuación laguna El Basural* [Proyecto ejecutivo. Informe Final. Tomo I].
- Fernández Cirelli, A., Volpedo, A., & Moscuza, H. (2007). Vulnerabilidad de los sistemas de producción agropecuaria. In A. Besalú Parkinson (Ed.), *Primeras Jornadas Interdisciplinarias de la Universidad de Buenos Aires sobre Cambio Climático y Global* (pp. 41–43).
- Fertanoni, M., & Prendes, H. (1983). Hidrología en áreas de llanura. Aspectos conceptuales teóricos y metodológicos. In M. C. Fuschini Mejía (Ed.), *Hidrología de las grandes llanuras - Coloquio de Olavarría* (pp. 119–156). Buenos Aires, Argentina: Comité Nacional Argentino para el Programa Hidrológico Internacional en conjunto con UNESCO.
- Figuroa Gallegos, J. A. (2016). Índices de cambio climático en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Aqua-LAC*, 8, 36–41. Retrieved from <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/PHI->

04ArticuloJoseFiguroa.pdf

- Ford, J. D., Keskitalo, E. C. H., Smith, T., Pearce, T., Berrang-Ford, L., Duerden, F., & Smit, B. (2010). Case study and analogue methodologies in climate change vulnerability research. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(3), 374–392. <https://doi.org/10.1002/wcc.48>
- Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., & Huang, X. (2010). *MODIS Collection 5 cobertura global del suelo: refinamiento de algoritmos y caracterización de nuevos conjuntos de datos* [Collection 5.1 IGBP Land Cover]. Boston University, Boston, MA, USA.
- Fuschini Mejía, M. C. (1994). *El agua en las llanuras* (1st ed.). Montevideo, Uruguay: UNESCO - ORCYT.
- Füssel, H. M., & Klein, R. J. T. (2006). Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 75, 301–329. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-0329-3>
- Geraldi, A., Piccolo, C., & Perillo, G. (2010). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigación Geográfica*, 16(30), 215–225. <https://doi.org/10.4067/S0718-09342002005100014>
- Gidahatari. (2016). Conoce QSWAT, el modelo hidrológico SWAT en QGIS. Retrieved January 16, 2019, from <http://gidahatari.com/ih-es/conoce-qswat-el-modelo-hidrologico-swat-en-qgis>
- Giraut M., Lupano C., Soldano, Á., R. C. (2008). *Cartografía Hídrica Superficial Digital de la Provincia de Santa Fe* [Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina]. Buenos Aires.
- Giunta, R. (2002). *Índice de rendimiento esperado en la agricultura santafesina*. Santa Fe, Argentina: Gobierno de la Provincia de Santa Fe Ministerio de Agricultura, Ganadería, Industria y Comercio Secretaría de Agricultura, Ganadería y Recursos Naturales Dirección General de Programación y Coordinación Económica Financiera.
- Gobierno de la Provincia de Santa Fe. (n.d.). Mapas de áreas afectadas por inundaciones. In *Informe final sobre la implementación de la Ley provincial N°11730 Zonificación y regulación del uso del suelos en áreas inundables en sistemas hídricos de la Provincia de*

*Santa Fe.*

- González-Gaudiano, E. J. (2012). La Representación Social Del Cambio Climático. *Revista Mexicana de ...*, 17(55), 1035–1062. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=14056666&AN=91024841&h=ggWq38GH8AwhJOVejjkci2TkoWM4C17gE7AY4mf4uXevF/pl66MmR12pU80VXNn09w6g9HwXlxQs72foYmrRw==&crl=c>
- GRASS. (2019). GRASS GIS Llevando tecnologías geoespaciales avanzadas al mundo. Retrieved from <https://grass.osgeo.org/>
- Grossi Gallegos, H., & Righini, R. (2007). Atlas de energía solar de la República Argentina. In *Energía Solar; Recursos Energeticos; Instrumentos Meteorologicos; Cartografia*. (1st ed.). Argentina.
- Hurtado, R., Faroni, H., Vich, H., Spescha, L., & Barnatán, I. (2007). Comportamiento de las isoyetas trimestrales medias estivales en la Argentina 1971-2000. In A. Besalú Parkinson (Ed.), *Primeras Jornadas Interdisciplinarias de la Universidad de Buenos Aires sobre Cambio Climático y Global* (pp. 231–232).
- INA Centro Regional Litoral. (2016). *Estudio hidrológico-hidráulico y propuestas de obras para el control, regulación y gestión de los aportes a la laguna "El Chañar"* [Informe técnico]. Santa Fe, Argentina: Instituto Nacional del Agua.
- INTA. (n.d.). Serie Venado Tuerto ( VT ). Retrieved from [http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/\\_\\_series/vt/index.htm](http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/__series/vt/index.htm)
- IPCC. (2012). Resumen para responsables de políticas. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, ... P. M. Midgley (Eds.), *Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático* (pp. 1–19). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Nueva York, Estados Unidos de América: Informe especial de los Grupos de trabajo I y II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2013). AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [FIFTH ASSESSMENT REPORT]. Retrieved from

[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_SPANISH.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf)

- IPCC. (2014a). *Cambio climático 2014 Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. [Quinto informe de cambio climático - Resumen para responsables de políticas]. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>
- IPCC. (2014b). Resumen para responsables de políticas. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, ... J. C. Minx (Eds.), *Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América: Cambridge University Press.
- IPCC. (2021a). AR6 Cambio Climático 2021: La Base de la Ciencia Física.
- IPCC. (2021b). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. . Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press. In Press.
- IPCC. (2021c). The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Iriondo, M. (2010). *Geología del Cuaternario en la Argentina* (1era.). Corrientes, Argentina: Moglia Ediciones.
- Kokot, R. (2007). Cómo los cambios del nivel del mar afectarán las costas argentinas. *Primeras Jornadas Interdisciplinarias de La Universidad de Buenos Aires Sobre Cambio Climático y Global*, 109–111. Besalú Parkinson, A.
- Kröhling D.; Brunetto E. (2013). Marco Geológico y Geomorfología de la cuenca del Arroyo Cululú , provincia de Santa Fe ( Argentina ). In *Bases Conceptuales y Metodológicas para el Ordenamiento Territorial en el Medio Rural* (1era ed., pp. 485–512). Rio Cuarto, Córdoba, Argentina: Libroclíc Ediciones.
- Kruse, E., & Zimmermann, E. D. (2002). Hidrogeología De Grandes Llanuras. Particularidades En La Llanura Pampeana (Argentina). *Workshop Groundwater and Human Development*, 2(1), 2025–2038.

- Lagos Zuñiga, M. A., & Vargas Mesa, X. (2014). Potenciales influencias del cambio climático en crecidas pluviales en una cuenca andina. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 5(2), 19–38.
- Larsen, K., & Gunnarsson-Östling, U. (2009). Climate change scenarios and citizen-participation: Mitigation and adaptation perspectives in constructing sustainable futures. *Habitat International*, 33(3), 260–266. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2008.10.007>
- Lavell, A. (1997). VIVIENDO EN RIESGO. Comunidades vulnerables y prevención de desastres en America Latina. Buenos Aires: Red de estudios Sociales en Prevencion de Desastres en America Latina. LA RED. In *Capítulo 3: Aspectos teórico-metodológicos y propositivos*. Autores: López, I. y Etulain, J. (p. 288). Buenos Aires: Editorial Espacio.
- Lezama, J. (2008). *La construcción social y política del medio ambiente*. México, D.F.: El coelgio de México, Centro de estudios demográficos y desarrollo urbano.
- Linsley, R. K. J., Kholer, M. A., & Paulus, J. L. H. (1977). *Hidrología para ingenieros* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1001/jama.1938.02790300058032>
- López, I., Fisch, S., Giusso, C., & Carluccio, B. (2019). Territorios en riesgo hídrico: proyecto territorial y multiescalaridad: caso: Gran La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *XI Seminario Internacional de Investigación En Urbanismo, Barcelona-Santiago de Chile, Junio 2019*. <https://doi.org/10.5821/siiu.6582>
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulangeer, J. P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., ... Vicuña, S. (2014). Central and South América. In V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, ... L. L. White (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1499–1566). <https://doi.org/10.1177/136346157100800221>
- Marcos-Garcia, P., & Pulido-Velazquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación? *Ingeniería Del Agua*, 21(1), 35. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361>
- Martín, R. (2014). *Meteorología Regional* (1era.). Rosario, Argentina: Iracema Ediciones.
- Martínez Austria, P., & Irula Lutzow, F. (2016). Tendencias de precipitación y cambio climático en la cuenca del río Conchos, México. *Aqua-LAC*, 8, 79–88.

- Máxima Formación. (2021). Qué es software R. Retrieved from <https://www.maximaformacion.es/blog-dat/que-es-r-software/>
- Meira Cartea, P., Arto Blanco, M., Heras Fernández, F., & Montero Souto, P. (2011). *La sociedad ante el cambio climático. Conocimientos, valoraciones y comportamientos en la población española, 2011*. Madrid: Fundación MAPFRE.
- Ministerio de Infraestructura y Transporte. (n.d.). *Comités de cuencas de la Provincia de Santa Fe* [Ministerio de Infraestructura y Transporte, Secretaría de Recursos Hídricos, Subsecretaría Operativa, Dirección Provincial de Coordinación de Comité de Cuencas, Dirección General de Comité de Cuencas y Talleres].
- Montero-Martínez, M. J., Ojeda-Bustamante, W., Santana-Sepúlveda, J. S., Prieto-González, R., & Lobato-Sánchez, R. (2013). Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 4(2), 113–128.
- Natenzon, C. (2017). Riesgo hídrico, vulnerabilidad social y participación ciudadana. *III Jornadas Nacionales de Política Hídrica*. Buenos Aires, Argentina.
- Olaya Ferrero, V. (2004). *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno*. 391. <https://doi.org/10.3201/eid1507.081083>
- Orozco, I., Ramírez, A. I., & Francés, F. (2018). Modelación de los impactos del Cambio Climático sobre los flujos y almacenamientos en una cuenca de alta montaña. *Ingeniería Del Agua*, 22(3), 125. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8931>
- Orsolini, H. (2008). Estadística hidrológica. Lluvias de diseño. Hidrograma de diseño. In H. Orsolini, E. Zimmermann, & P. Basile (Eds.), *Hidrología, Procesos y Métodos* (2nd ed., pp. 262–336). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Orsolini, H., Zimmermann, E. D., & Basile, P. A. (2008). *Hidrología procesos y métodos.pdf* (2da.). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Paoli, C., Bolzicco, J., & Cacik, P. (1996). *Análisis de frecuencia de variables hidrológicas*. UNL - FICH.
- Paoli, C., & Giacosa, R. (1983). Necesidades de investigaciones hidrológicas en áreas de llanura. In M. C. Fuschini Mejía (Ed.), *Hidrología de las grandes llanuras - Coloquio de Olavarría* (pp. 395–432). Buenos Aires, Argentina: Comité Nacional Argentino para el Programa Hidrológico Internacional en conjunto con UNESCO.

- Pedraza, R., Morresi, M. V., Pusineri, G., & D'Elía, M. (2010). Efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos en la región Litoral-Mesopotamia (Argentina). *Ingeniería Del Agua*, 17(2).
- Piñuel Raigada, J. L. (2013). El discurso hegemónico de los Media sobre el "Cambio Climático" (Riesgo, Incertidumbre y Conflicto) y estrategias de intervención. *Actas de Las Jornadas Internacionales Medios de Comunicación y Cambio Climático*, 27–44. Sevilla, España.: Fénix editora.
- Pizarro, R., Balocchi, F., Vera, M., Aguilera, A., Morales, C., Valdés, R., ... Olivares, C. (2013). Influencia del cambio climático en el comportamiento de los caudales máximos en la zona Mediterránea de Chile. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 4(2), 5–19.
- Podest, E. (2017). *Procesamiento y Análisis de Imágenes SAR* [Applied Remote Sensing Training Program ARSET]. Retrieved from National Aeronautics and Space Administration website: <https://arset.gsfc.nasa.gov/disasters/webinars/intro-SAR>
- Portela, M. M., & Quintela, A. de C. (2001). A diminuição da precipitação em épocas do ano como indicio de mudança climática: casos estudados em portugal continental. *Ingeniería Del Agua*, 8(1), 79–92.
- QGIS. (2021). Sitio web oficial de QGIS. Retrieved from <https://www.qgis.org/es/site/>
- Ragonese, A. (1941). La Vegetación en la provincia de Santa Fe. *Darwiniana*, 369–428.
- Ramirez, N. (2011). La comunicación del riesgo vinculada al contexto de la agriculturización en Argentina. *Pampa*, 7(sup.esp.), 237–265. [https://doi.org/10.14409/pampa.v1i7\\_sup.3211](https://doi.org/10.14409/pampa.v1i7_sup.3211)
- Reisinger, A., Howden, M., Vera, C., Garschagen, M., Hurlbert, M., Kreibiehl, S., ... Ranasinghe, R. (2020). *The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: a summary of cross-working group discussions* [Guidance for IPCC authors]. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/event/guidance-note-concept-of-risk-in-the-6ar-cross-wg-discussions>
- República Argentina. (2021a). Cambio Climático.
- República Argentina. (2021b). Informe país: la situación del Cambio Climático en Argentina. Retrieved from <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/informe-pais>
- Ribera Masgrau, L. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. *Documents d'anàlisi*

- Geogràfica*, 43, 153–171. Retrieved from <https://ddd.uab.cat/pub/dag/02121573n43/02121573n43p153.pdf>
- Riccardi, G. (1997). El mapeo de riesgo de inundación por medio de la modelación matemática hidrodinámica. *Revista Ingeniería Del Agua*, 4(3), 45–46.
- Riccardi, G. (2001). *Un sistema de simulación hidrológica-hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. (Tesis Doctoral). FCEFyN-UNC, Córdoba.
- Riccardi, G. A., Basile, P. A., Zimmermann, E. D., Stenta, H. R., Scuderi, C. M., & Garcia, M. L. (2008). El modelado de escurrimiento superficial en cuencas del sur de la prrovincia de Santa Fe, Argentina. In *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura*. (1era., pp. 3–20). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Riccardi, G., Scuderi, C., & Stenta, H. (2002). Modelado de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina. *XIX Congreso Nacional Del Agua*, T33.
- Riccardi, G., Zimmermann, E., Mancinelli, A., Scuderi, C., Basile, P., Rentería, J., & García, P. (2009). *Rehidrología y modelo de simulación a tiempo real en sistema de alerta hidrológico en las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo* [Informe de avance N°4]. Rosario, Argentina.
- Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M., Bussi, G., Francés, F., & Bréthaut, C. (2015). Climate change impacts on discharges of the Rhone River in Lyon by the end of the twenty-first century: model results and implications. *Regional Environmental Change*, 15(3), 505–515. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0707-8>
- Ryan, D., Scardamaglia, V., & Canziani, P. (2018). Brechas de conocimiento en adaptación al cambio climático. Informe de Diagnóstico Argentina. In *Red Regional de Cambio Climático y Toma de Decisiones. Programa UNITWIN de UNESCO, Proyecto LatinoAdapta*.
- Schardong, A., Simonovic, S., & García, J. (2014). O possível efeito de mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluências em sistemas de recursos hídricos. *Revista de Gestão de Água Da América Latina*, 11(2), 53–65. <https://doi.org/10.21168/reg.v11n2.p53-65>
- Scioli, C. (2009). *Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura : Implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.

- Scuderi, C. M., Stenta, H. R., & Riccardi, G. A. (2008). Uso de imágenes satelitales y SIG en la generación de mapas de CN y evaluación de la agregación espacial de este parámetro mediante modelación. In G. Riccardi, P. Basile, E. Zimmermann, H. Stenta, C. Scuderi, J. Rentería, & M. García (Eds.), *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (1st ed., pp. 79–111). Rosario, Argentina.
- Serio, L., & Martin, P. (2007). Cambios en los valores centrales y extremos de las distribuciones mensuales de precipitación en el centro-este de Argentina. In A. Besalú Parkinson (Ed.), *Primeras Jornadas Interdisciplinarias de la Universidad de Buenos Aires sobre Cambio Climático y Global* (pp. 328–329).
- Setegn, S., & Donoso, M. C. (2017). Water Resources ' response to climate change in the Trou du Nord Watershed , Haiti. *Aqua-LAC*, 9(1), 72–86.
- SIGSA. (2021). ENVI. Retrieved from <https://www.sigsa.info/productos/envi/plataforma-envi>
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering.*, 7, 270–292.
- Soria, M. (2019). *Caracterización morfológica y análisis de riesgo hidrológico en la parte alta del sistema hidrológico de llanura Las Encadenadas mediante aplicación de herramientas geomáticas* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Entre Ríos, Facultad de Ciencia y Tecnología.
- Soria, M., Basile, P., & Riccardi, G. (2020). Calibración de simulaciones bi-dimensionales mediante imágenes radar. In Universidad Nacional de Rosario (Ed.), *XIV Jornadas de Ciencia, Tecnologías e Innovación*. Rosario, Argentina.
- Soria, M., Medina, F., & Reyes, D. (2019). Elaboración de material educativo mediante herramientas geomáticas para la Cátedra de Hidrología y Obras Hidráulicas , de la Carrera Ingeniería Civil . *Jornadas de Educación SELPER 2019*. Buenos Aires, Argentina.
- Soria, M., Piñero, V., Ledesma, N., & Basile, P. (2018). Estudio de la dinámica lagunar en el distrito de Venado tuerto mediante herramientas geomáticas. In E. Lecertua, L. Castro, J. Bernal, M. Morale, N. Ortíz, & M. Vullo (Eds.), *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica* (pp. 1499–1506). Buenos Aires, Argentina.
- Soria, M., Piñero, V., Ledesma, N., Basile, P., & Riccardi, G. (2017). Análisis batimétrico de lagunas poco profundas mediante técnicas de Teledetección y SIG: aplicación a la laguna

- La Victoria. *Cuadernos Del CURIHAM*, 23, 51–61.
- Stenta, H., Rentería Beltrán, J., & Riccardi, G. (2005). Plataforma Computacional Para Gestion De Información En La Simulación Hidrológica-Hidraulica Del Esgurrimiento Superficial. *XX Congreso Nacional Del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos Del Cono Sur*, Cap. Hidrología 1-13. Retrieved from [https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/wp-content/uploads/2018/11/cna-2005\\_-stenta-renteria-riccardi.pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/wp-content/uploads/2018/11/cna-2005_-stenta-renteria-riccardi.pdf)
- Stenta, H., Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile, P., Scuderi, C., Rentería, J., & Odicini, L. (2010). Modelación matemática distribuida del escurrimiento superficial en zona de llanura y su utilización en sistema de alerta contra inundaciones en la Cuenca del A° Ludueña. In M. Varni, I. Entraigas, & L. Vives (Eds.), *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras* (pp. 539–546). Mar del Plata, Argentina.
- Stenta, H., Zimmermann, E., Riccardi, G., Basile, P., Rentería, J., & Scuderi, C. (2010). Comparación de la respuesta hidrológica en una cuenca de llanura mediante el uso del modelo HEC-HMS y el modelo de aproximación difusiva VMMHH 1.0. In M. Varni, I. Entraigas, & L. Vives (Eds.), *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras* (pp. 555–562). Azúl, Buenos Aires, Argentina: Editorial Martín.
- Taboada, M. A. (2007). Emisiones directas de óxidos de nitrógeno desde suelos agrícolas argentinos. In A. Besalú Parkinson (Ed.), *Primeras Jornadas Interdisciplinarias de la Universidad de Buenos Aires sobre Cambio Climático y Global* (pp. 50–51).
- United Nations Climate Change. (2021). "Process and meetings." Retrieved from <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-convention/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. In *SWAT Soil and Water Assessment Tool* [Guía de uso de SWAT adaptado de Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation. Grassland, Soil and Water Research Laboratory –Agricultural Research Service. Blackland Research Ce]. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Van Der Linden, S. (2015). The social-psychological determinants of climate change risk perceptions: Towards a comprehensive model. *Journal of Environmental Psychology*,

41(0272–4944), 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.11.012>

Velázquez, J. A., Troin, M., & Caya, D. (2015). Hydrological Modeling of the Tapaon River in the Context of Climate Change. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(5), 17–30. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222015000500002&lang=pt%5Cnhttp://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n5/v6n5a2.pdf](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000500002&lang=pt%5Cnhttp://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n5/v6n5a2.pdf)

Zamparoni, C., & Gonçalves, P. (2012). Riscos e desastres naturais em ambiente urbano: o exemplo de Cuiabá/MT. *Revista Brasileira de Climatologia*, 10(2237–8642), 7–20. Retrieved from <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima>

Zimmermann, E. (2004). *Modelos matemáticos en hidrología superficial* [Análisis de sistemas hidrológicos - Curso de posgrado - Unidad 2.].

Zimmermann, E., & Orsolini, H. (2008). Infiltración y exceso de lluvia. In 2 (Ed.), *Hidrología, pr* (pp. 89–107). Rosario, Argentina: Orsolini, H.Zimmermann, E. Basile, P.

Zimmermann, Erik, & Mecca, C. (2010). Aplicación del modelo SHALL en los sistemas hidrológicos de las lagunas don Tomás y bajo Giuliani ( La Pampa , Argentina ) para la evaluación de impactos provocados por efluentes y escurrimientos. *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. Azul, Buenos Aires, Argentina.

Zucarelli, A., París, M., & Macor, J. (2019). Estructura de variación de las precipitaciones en la provincia de Santa Fe (Argentina). *Cadernos Do Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Revista de Xeoloxía Galega e Do Hercínico Peninsular*, 41, 59–73. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2019.41.0.5814>

# ANEXOS

# Anexo A

## **Anexo A**

Descripción del modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0. Extraído de (Riccardi et al., 2009).

### **A.1. INTRODUCCIÓN**

El VMMHH 1.0 permite obtener como resultado de la modelación matemática las variables de flujo: alturas y cotas de agua, caudales y velocidades de flujo en todo el dominio espacial de una cuenca y en cualquier tiempo, entre otros resultados.

El VMMHH 1.0 está constituido por el modelo matemático hidrológico-hidráulico (Riccardi, 2001) y de la plataforma computacional (Stenta et al., 2005). En forma general, el modelo matemático realiza la modelación matemática del escurrimiento superficial y la plataforma computacional opera como entorno visual para facilitar el ingreso y la definición de datos en una cuenca y para la visualización de los resultados.

### **A.2. ELEMENTOS**

- Elemento Tipo Valle: Este elemento se utiliza para modelar zonas de escurrimiento de aporte a los cursos de agua (flujo predominante mantiforme).
- Elemento Tipo Río: Este elemento se utiliza para modelar zonas de escurrimiento encauzado y mantiforme (red de cursos con sus respectivos valles de inundación).

### **A.3 VINCULACIONES**

Sección que permite la continuidad entre dos elementos contiguos. Se la caracteriza con parámetros dimensionales e hidráulicos según su tipología. Estas pueden ser: vinculaciones por defecto y vinculaciones restringidas.

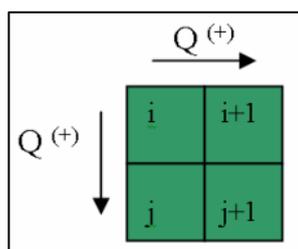
#### **A.3.1 Vinculaciones Por Defecto**

Las vinculaciones por defecto las define internamente el programa. Estas pueden ser del tipo valle – valle, valle – río y río – río, dependiendo de los tipos de elementos que la definan. Estas vinculaciones caracterizan físicamente la continuidad entre dos elementos, no existiendo ningún tipo de obstáculos al escurrimiento entre ellos.

### A.3.2 Vinculaciones Restringidas

En este tipo de vinculación la transferencia de agua a través de los elementos que la definen se encuentra, como su nombre lo indica, restringida por medio de los siguientes mecanismos: tipo alcantarilla – vertedero, aquí se produce la transferencia de agua en la vinculación a través de una constricción; tipo terraplén, en este caso no se produce transferencia de agua en la vinculación mientras no se supere la cota de coronamiento del mismo y desvinculación, la característica de este tipo de vinculación es que no permite la transferencia de agua entre los elementos involucrados en la misma.

Para los tipos de vinculaciones antes mencionadas el sentido positivo para la transferencia de agua (Figura A.1) entre elementos (vector caudal) está definido desde el elemento de menor número al de mayor número (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo).



**Figura A1:** Sentido positivo de caudales.

### A.4. ESTRUCTURA DE OPERACIÓN DEL MODELO VMMHH1.0

El programa se encuentra estructurado en tres partes. Las mismas son:

- Diseño - Ingreso de Datos. Aquí se realiza todo lo relacionado con la definición y caracterización del sistema, definición de condiciones de borde, asignación de parámetros, etc. Se ha conferido a VMMHH 1.0 a través del uso del sistema de ventanas (WINDOWS) toda su potencialidad permitiendo el ingreso de datos en distintas formas: manual, con base de datos previamente definidas, mediante el mouse; logrando también la visualización completa de datos en pantalla, a través de impresiones y como complemento de salidas representadas en archivos CAD y rutinas de extracción de información debidamente organizada para ser utilizada con programas de análisis topográfico.
- Procesamiento y Cálculo. Esta es la operación en la cual a partir de datos geométricos e hidráulicos e información de estado inicial y condiciones de borde de la cuenca se computa

mediante cálculos numéricos los caudales intercambiados entre elementos y las alturas de agua en cada elemento.

- Post Proceso – Visualización de Resultados. Aquí se pueden visualizar en forma gráfica y en tablas los valores resultantes de la corrida del programa, además dichos resultados pueden ser exportados para ser interpretados con otros programas tales como planillas de cálculo.

#### **A.5 DESCRIPCION DEL MODELO MATEMATICO**

El modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi-bidimensional de parámetros distribuidos (Riccardi, 2001), resulta apto para la modelación de los procesos hidrológicos dominantes involucrados en la transformación lluvia-caudal, la propagación de crecidas en ambientes rurales y urbanos; y la simulación hidromorfológica en cursos de agua.

El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por (Cunge, 1975). Actualmente, el sistema permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación. Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas (Riccardi et al., 2002).

La cuenca resulta constituida en celdas que representan las áreas tributarias a los cursos de agua (celdas valle) y celdas que constituyen los cursos de agua (celdas río).

#### **A.6 ECUACIONES GOBERNANTES**

El modelo simula el escurrimiento mediante el intercambio de flujo entre celdas con cualquier dirección contenida en el espacio, pero con leyes de intercambio de tipo unidimensional.

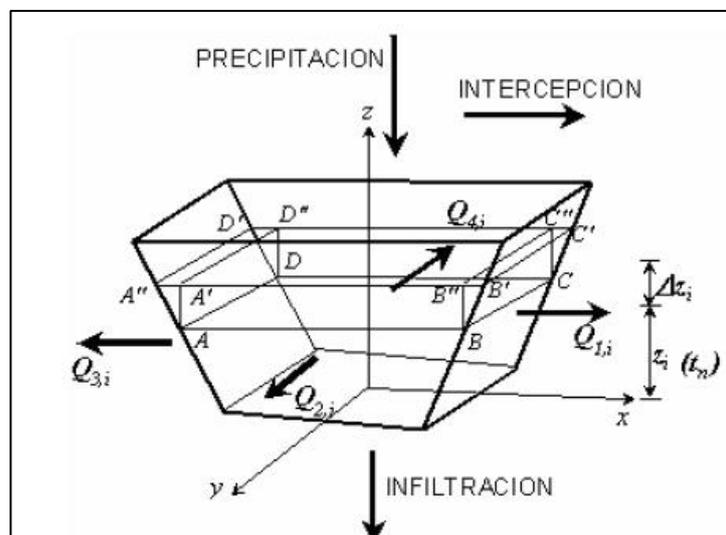
Las ecuaciones gobernantes son la de continuidad y las de descarga entre celdas vinculadas, deducidas a partir de la ecuación de cantidad de movimiento.

Las dos hipótesis fundamentales sobre las cuales están basadas las ecuaciones gobernantes son:

- El volumen  $V_i$  de agua almacenado en la celda  $i$  está directamente relacionado con el nivel  $Z_i$  de la celda:  $V_i = V_{(Z_i)}$  (Cunge, 1975).
- La descarga entre dos celdas adyacentes  $k$  e  $i$  en un tiempo dado  $(n)$   $\Delta t$  depende en cada caso de la aproximación asumida en la vinculación:
  - Aproximación Onda Cinemática: El caudal es una función del nivel de agua en la celda origen  $Z_k^{(n)}$ :  $Q_{k,i}^{(n)} = f(z_k^{(n)})$  (Riccardi, 1997).
  - Aproximación Onda Difusiva: el caudal se considera una función de los niveles en las celdas origen y destino (Cunge, 1975)  $Q_{k,i}^{(n)} = f(z_k^{(n)}, Z_i^{(n)})$

#### A.6.1 Ecuación de continuidad

El planteo de la ecuación de continuidad está basado en la formulación presentada por (Cunge, 1975). Si consideramos la celda  $i$  (Figura A2) y se supone un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , de modo que un tiempo conocido puede se puede escribir:  $t_n = n \Delta t$ , el nivel de agua en la celda es  $z_i(t_n)$  y la correspondiente área de la superficie de agua (ABCD) es igual a  $A_{Si}(t_n)$ , que es el área de la superficie de agua en el plano horizontal de la celda.



**Figura A2:** Continuidad de masa en una celda.

En el tiempo  $t_{n+1} = t_n + \Delta t = (n+1) \Delta t$  el nivel de agua es  $z_i(t_{n+1})$  y la superficie de agua alcanza a  $A'B'C'D'$  igual a  $A_{Si}(t_{n+1}) = A_{Si}(t_n) + \Delta A_{Si}$ .

El incremento de nivel de agua de una celda durante un intervalo  $\Delta t$  se deberá:

- Al intercambio de caudales debido a procesos naturales y artificiales tales como precipitación neta caída sobre la celda, evaporación, infiltración, etc., que se agrupan en el término  $P_i^{(n)}(t)$ .
- A las descargas  $Q_{k,i(n)}$  provenientes de las celdas adyacentes.

El incremento de volumen de agua almacenada en una celda  $i$  durante un cierto intervalo de tiempo  $\Delta t$  puede definirse desde condiciones geométricas ecuación (a.1) y desde condiciones de descarga ecuación (a.2):

$$\Delta V_i = \int_{Z_i(t_n)}^{Z_i(t_{n+1})} A_{Si}(Z_i) dZ_i \quad (a.1)$$

$$\Delta V_i = \int_t^{t_{n+1}} P_i(t) dt + \sum_{k=1}^j \int_{t_n}^{t_{n+1}} Q_{k,i}(Z_i, Z_k) dt \quad (a.2)$$

El subíndice  $k$  representa a las distintas celdas vinculadas a celda  $i$  y  $j$  representa el número total de celdas vinculadas a  $i$ .  $P_i(t)$  representa la precipitación caída en la celda  $i$  en el instante  $t$ .

Suponiendo que la superficie  $A_{Si}(t_n)$  varía con un incremento varios órdenes de magnitud menor a la superficie, cuando el nivel de agua pasa de  $z_i$  a  $z_i + \Delta z_i$  (ver Figura A2) el volumen de agua en el tiempo  $t_{n+1}$  puede aproximarse como  $V_{ABCD} \approx A_{Si}(t_n) \Delta z$ .

Esta relación reemplaza el incremento integral de volumen calculado desde la consideración geométrica ecuación (a.1) y corresponde a una aproximación de primer orden en la cual:

$$\Delta A_{Si} / A_{Si} \ll 1.$$

Por lo tanto efectuando el promedio de las integrales ecuación (a.2) en el escalón de tiempo  $\Delta t$  y comparando el incremento de volumen que definen las ecuaciones (a.1) y (a.2) se llega a:

$$A_{Si(z_i)} \Delta z_i = P_i(t) \Delta t + \Delta t \sum_{k=1}^j Q_{k,i}(Z_i(t), Z_k(t)) \quad (a.3)$$

Si  $\Delta z \rightarrow 0$  y  $\Delta t \rightarrow 0$  la ecuación (a.3) puede ser escrita en forma diferencial:

$$A_{Si} \frac{dz_i}{dt} = P_{it} + \sum_{k=1}^j Q_{k,i} \quad (a.4)$$

Existirán tantas ecuaciones (a.4) como celdas  $i$  e incógnitas  $z_i(t)$  integren el modelo. Para  $N$  celdas, el sistema de  $N$  ecuaciones diferenciales ordinarias es establecido para  $N$  funciones desconocidas  $z_i$  de la variable independiente  $t$ . La solución de este sistema existe y es única (Cunge, 1975) si el grupo de condiciones iniciales  $z_i(t)$  puede ser calculado numéricamente,

como también las descargas entre celdas  $Q_{k,i(n)}$ , ya que su expresión es explícita en función de los niveles  $z_i$  y  $z_k$  y de las condiciones en el tiempo  $n$ . Las condiciones de frontera variarán en el tiempo y deben ser preestablecidas.

#### A.6.2 Leyes de descarga entre celdas

- Unión cinemática

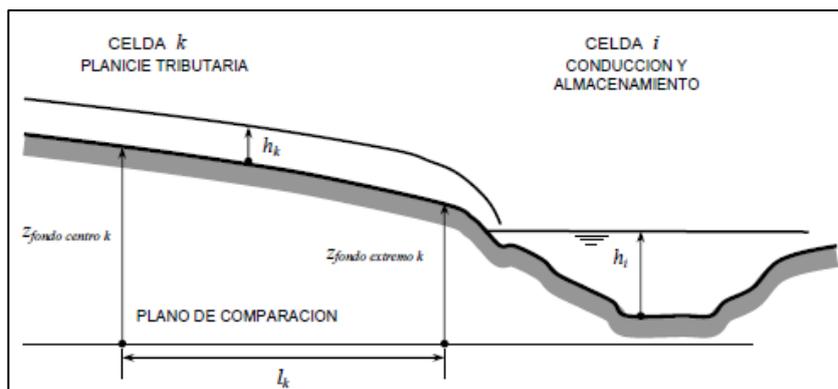
Esta unión se utiliza en vinculaciones donde la pendiente de la superficie libre del agua se aproxima a la pendiente topográfica del fondo, pudiéndose asumir que la fuerza gravitatoria se equilibra con la fuerza de fricción. Esto ocurre mayormente en vinculaciones de celdas tributarias, es decir que solo aportan escurrimiento a cursos principales, donde la información del mecanismo hidrodinámico se propaga solamente hacia adelante (Figura A.3). La formulación de la descarga  $Q_{k,i(n)}$  se hace a partir de la aproximación de onda cinemática de la ecuación de cantidad de movimiento y se arriba a una expresión de caudal función del tirante en la celda de aporte:

$$\frac{Q^2}{K^2} = S_0 \quad (a.5)$$

$$\frac{Q_{k,i}^2}{k_{k,i}^2} = \frac{\Delta Z_{fondo\ k}}{l_k} \quad (a.6)$$

$$Q_{k,i}^{(n)} = K_{k,i} \sqrt{\frac{Z_{fondo\ centro\ k} - Z_{fondo\ extremo\ k}}{l_k}} \quad (a.7)$$

donde  $K_{k,i}$  es el coeficiente de transporte definido como  $K_{k,i} = k_{k,i} A_{k,i} R_{k,i}^{2/3}$  con  $k_{k,i}$  coeficiente de rugosidad de Strickler-Manning ( $1/\eta$ ),  $A_{k,i}$  área de la sección transversal al flujo,  $R_{k,i}$  radio hidráulico de la sección transversal y  $l_k$  es la distancia fija entre los centros de las celdas  $i$  y  $k$  (Figura A.3). La variable cota de agua  $z$  (o la altura relativa de pelo de agua  $z - z_{fondo}$ ) se define en la celda, en tanto que el caudal  $Q$  y el coeficiente de transporte  $K$  son definidos en la vinculación. El supraíndice  $(n)$  indica la variable temporal.



**Figura A3:** Unión cinemática.

- Unión tipo río simple

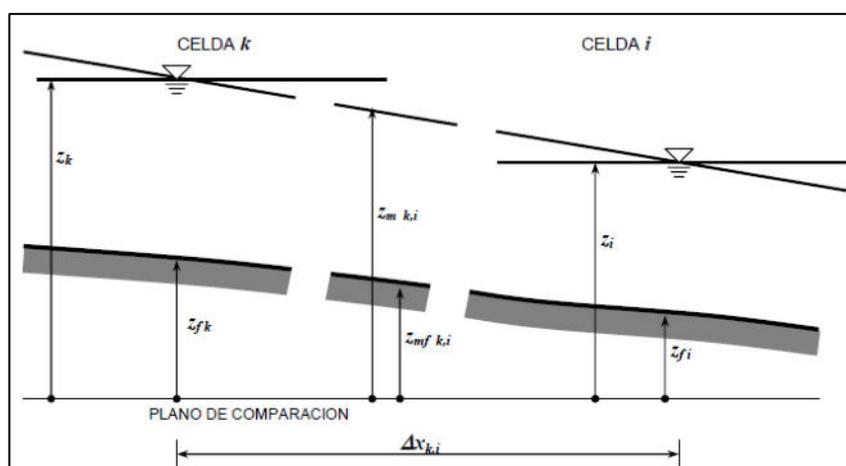
Esta unión es apta para escurrimientos con preponderancia de las fuerzas de gravedad, presión hidrostática y fricción. La expresión del caudal  $Q_{k,i}(n)$  se deduce por discretización de la ecuación de cantidad de movimiento para flujo con fuerzas inerciales despreciables y considerando la ecuación de resistencia de Manning (Figura A. 4):

$$\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \quad (\text{a.8})$$

$$\frac{\Delta Z_{k,i}}{\Delta x_{k,i}} + \frac{Q_{k,i}|Q_{k,i}|}{K^2_{k,i}} = 0 \quad (\text{a.9})$$

$$Q_{k,i}^n = \text{signo}(Z_k^{(n)} - Z_i^{(n)}) \frac{K_{k,i}}{\sqrt{\Delta x_{k,i}}} \sqrt{|Z_k^{(n)} - Z_i^{(n)}|} \quad (\text{a.10})$$

donde  $Z_i^{(n)}$  y  $Z_k^{(n)}$  son la cotas de agua de las celdas. La cota  $z_m$  para la cual se define  $K$  es promedio ponderado de los niveles  $z_i$  y  $z_k$ , valuado en función de los signos de las derivadas de  $Q$  respecto a los niveles.



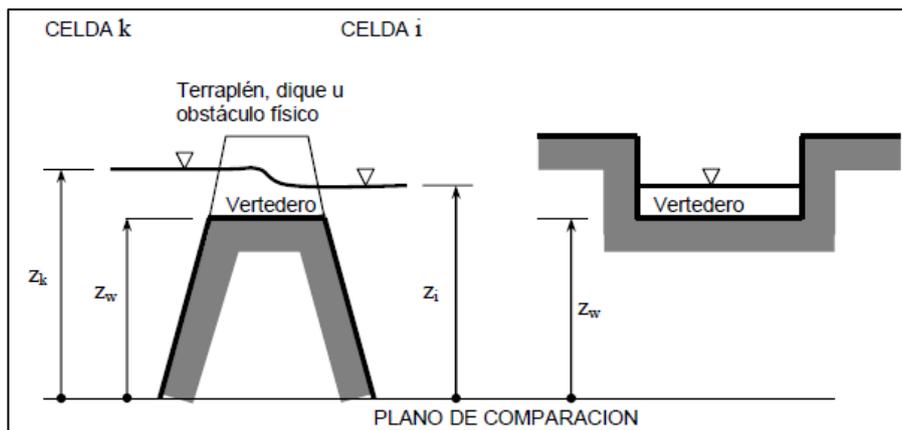
**Figura A4:** Unión tipo río simple.

- Unión tipo vertedero / terraplén

Este tipo de unión es utilizada para representar vinculaciones entre celdas donde se evidencia un límite físico. Tal es el caso de celdas separadas por terraplenes de rutas, vías, caminos, etc; además puede utilizarse como vinculación entre las celdas del cauce principal de un curso de agua y los valles laterales. La fórmula utilizada es la clásica para vertederos de cresta ancha (Figura A.5) (Cunge, 1975), con  $b$  ancho efectivo del vertedero,  $\mu_1$  y  $\mu_2$  coeficientes de descarga de vertederos y  $z_w$  cota de fondo de vertedero:

$$Q_{k,i}^{(n)} = \mu_1 b \sqrt{2g} (z_k^{(n)} - z_w^{(n)})^{3/2} \quad \text{Descarga libre} \quad (\text{a.11.I})$$

$$Q_{k,i}^{(n)} = \mu_2 b \sqrt{2g} (z_k^{(n)} - z_w) \sqrt{(z_k^{(n)} - z_i^{(n)})} \quad \text{Descarga sumergida} \quad (\text{a.11.II})$$

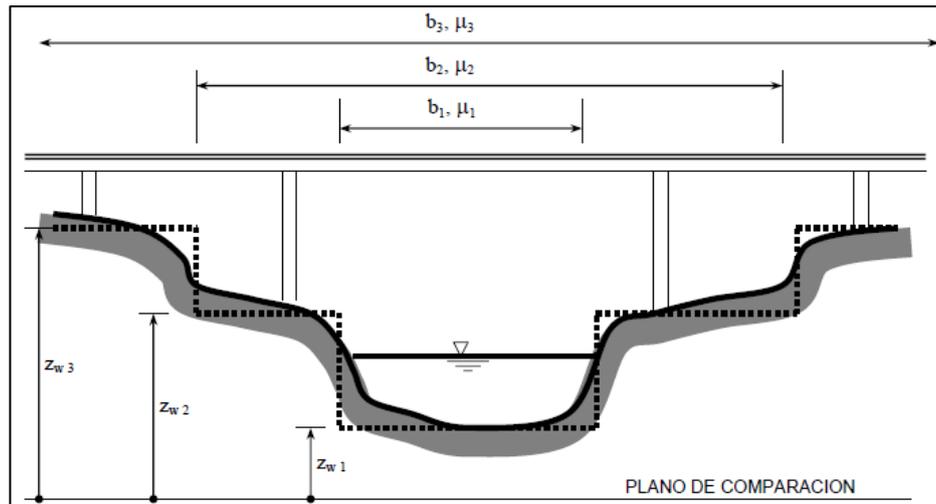


**Figura A.5:** Unión tipo vertedero.

El modelo permite en cada vinculación de este tipo la incorporación de varios anchos de descarga asociados a cotas y coeficientes de descarga, con lo cual es posible representar secciones compuestas (asimiladas a rectángulos), habitualmente presentes en los ambientes físicos modelados (Figura A.6).

- Unión tipo puente

En estos casos se utiliza la expresión de caudal prevista para vertederos (a.11. I y II), teniendo en cuenta múltiples anchos y escalón de fondo nulo (Figura A.5) y coeficiente de gasto de acuerdo con la formulación que presentó Chow (1959), en sus estudios referidos a flujo a través de constricciones. También se utiliza esta modalidad de vinculación para alcantarillas de gran tamaño.



**Figura A6:** Unión tipo puente.

## A.7 FORMULACIÓN Y SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LAS ECUACIONES

### A.7.2 Formulación Numérica

La formulación numérica de las ecuaciones de flujo está basada en aquella que propusiera (Cunge, 1975) en su trabajo sobre modelación con esquemas de celdas.

En primer lugar se explicita la función del caudal entre celdas para luego introducirla en la ecuación de continuidad ecuación (a.4). Se supone que el caudal entre dos celdas vinculadas  $Q_{k,i}(Z_i(t), Z_k(t))$  es de un valor intermedio entre  $Q_{k,i}^{(n)}$  y  $Q_{k,i}^{(n+1)}$  con  $\tau$  variando entre  $(n) \Delta t \leq \tau \leq (n+1) \Delta t$ .

$$Q_{k,i}(z_k(\tau), z_i(\tau)) = \phi Q_{k,i}^{(n+1)} + (1-\phi) Q_{k,i}^{(n)} \quad (\text{a.12})$$

donde  $\phi$  es un coeficiente de ponderación temporal y asume valores  $0 \leq \phi \leq 1$ . Introduciendo la función del caudal en la ecuación de continuidad ecuación (a.3):

$$\Delta z_i A_{S_i} = \Delta t \left\{ P_i + \left[ \phi \sum_{k=1}^j Q_{k,i}^{(n+1)} + (1-\phi) \sum_{k=1}^j Q_{k,i}^{(n)} \right] \right\} \quad (\text{a.13})$$

Suponiendo que los incrementos de cota  $\Delta z_i$  serán pequeños en cada  $\Delta t$ , la formulación del caudal en el tiempo  $(n+1)$  se puede aproximar con series de Taylor, despreciando términos de orden superior:

$$Q_{k,i}^{(n+1)} = Q_{k,i}^{(n)} + \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_i} \Delta z_i + \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_k} \Delta z_k \quad (\text{a.14})$$

Sustituyendo la ecuación (a.14) en la ecuación (a.13) y operando algebraicamente se llega a

$$\Delta z_i \frac{A_{Si}}{\Delta t} = P_i + \sum_{k=1}^j Q_{k,i}^{(n)} + \phi \left[ \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_i} \Delta z_i + \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_k} \Delta z_k \right] \quad (\text{a.15})$$

Con el objeto de evitar condicionamientos para la estabilidad numérica se propone un coeficiente de peso  $\phi = 1$  con lo que resulta un esquema implícito en la variable incrementos de cotas. Con este valor se asegura un sistema incondicionalmente estable en diferencias finitas (Cunge, 1975). Introduciendo el valor  $\phi = 1$  en la ecuación (a.15) se llega a una expresión que representa un sistema de ecuaciones algebraicas lineales:

$$A_{Si} \frac{\Delta z_i}{\Delta t} = P_i + \sum_{k=1}^j Q_{k,i}^{(n)} + \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_i} \Delta z_i + \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_j} \Delta z_j \quad (\text{a.16})$$

Las funciones AS, Pi y Q<sub>k,i</sub> son conocidas en el tiempo  $t = (n) \Delta t$  y los incrementos  $\Delta z_i$  y  $\Delta z_k$  son las incógnitas. El valor j es la cantidad total de celdas vinculadas a la celda i. Existirán tantas incógnitas como celdas i tenga el modelo. El sistema se completa con las condiciones de contorno. Las derivadas son calculadas de manera numérica en todos los casos, de acuerdo a la expresión:

$$\frac{\partial Q_{k,i}}{\partial z} = \frac{Q(z + \Delta z) - Q(z)}{\Delta z} \quad (\text{a.17})$$

#### A.7.2 Solución Numérica de las Ecuaciones

Se utiliza un algoritmo basado en la resolución matricial por el método de Gauss-Seidel en un sistema de m x m ecuaciones, donde m representa la cantidad de celdas internas del modelo. Antes de ser resuelta la matriz es reducida eliminando los elementos nulos, por lo que el ancho de banda máximo estará dado por la mayor distancia (mayor cantidad de celdas) entre dos celdas vinculadas según el ordenamiento establecido en la discretización espacial y topológica. Los términos de la ecuación (a.16) se reagrupan para permitir el planteo de cada fila matricial del sistema, resultando el término de la diagonal principal, de los elementos no diagonales y no nulos y el término independiente de la manera siguiente:

$$\left[ \frac{-A_{Si}}{\Delta t} + \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{k,i}^{(n)}}{\partial z_i} \right] \Delta z_i \quad \text{Termino de diagonal principal} \quad (\text{a.18.l})$$

$$\left[ \sum_{k=1}^j \frac{\partial Q_{kj}^{(n)}}{\partial z_j} \right] \Delta z_j \quad \text{Termino de diagonales no nulos} \quad (\text{a.18.II})$$

$$- \left[ P_i + \sum_{k=1}^j Q_{kj}^{(n)} \right] \quad \text{Término independiente} \quad (\text{a.18.III})$$

En cada paso de tiempo se resuelve la matriz, con lo que se determinan los correspondientes  $\Delta z$ ; con estos valores se calculan los niveles de agua en cada celda:  $Z_i^{(n+1)} = Z_i^{(n)} + \Delta Z_i$ . Posteriormente se calculan en forma explícita los caudales entre las celdas:  $Q_{k,i}^{(n+1)}$ .

## **A.8 CONDICIONES DE BORDE, INICIALES E INTERCAMBIO DE CAUDAL EXTERNO**

### **A.8.1 Condiciones de Borde**

Para el escurrimiento líquido, es condición necesaria y suficiente imponer los niveles  $z(t)$  en las fronteras geográficas del área a modelar (Cunge, 1975). Generalmente esto no es siempre posible por lo que en el modelo se plantean las tres típicas condiciones de borde:

- Cota de pelo de agua en función del tiempo:  $z(t)$ ;
- Relación cota - caudal:  $Q = f(z)$

La condición  $z(t)$  se establece en celdas y la relación  $Q = f(z)$  se define en una vinculación, por lo que también debe recurrirse a una celda ficticia de frontera.

### **A.8.2 Condiciones Iniciales**

El modelo requiere la especificación de las alturas de agua en todas las celdas en el tiempo inicial de simulación. Cuando el sistema hídrico a modelar comprende una gran cantidad de celdas correspondientes a cursos de agua, valles, conductos, etc., de las cuales cierta parte de ellas contienen agua inicialmente, estando el resto sin agua, debe prestarse especial cuidado a la fijación de las condiciones iniciales. En los casos en que las alturas de agua iniciales no son compatibles con un estado físico real del ambiente de modelación existe una alta probabilidad de que se produzcan fuertes oscilaciones numéricas que estropearán inmediatamente la respectiva corrida del modelo.

### **A.8.3 Intercambio de Caudal Externo**

El término  $P_i(t)$  de la ecuación de continuidad ecuación (a.4) permite la adición o extracción de flujo externo en cada celda. El modelo tiene incorporado dos tipos de intercambios. El

primero se utiliza para la descripción de los procesos de precipitación, interceptación e infiltración y el segundo puede utilizarse para representar otros tipos de intercambios, a saber: aportes de desagües pluviocloacales de zonas no abarcadas en la modelación, aportes de cursos tributarios, extracción de agua para riego, condiciones de borde con flujo entrante o saliente, etc. En todos los casos debe suministrarse al modelo en cada celda la correspondiente relación en función del tiempo:

$$P_i(t) = Q_{\text{intercambio}}(t).$$

## **A.9 IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL**

El sistema computacional está constituido por un módulo principal que comprende:

- Rutinas auxiliares que realizan la preparación y ordenamiento de datos en archivos;
- Programa principal que realiza la simulación hidrodinámica;

En primer lugar, las rutinas auxiliares realizan un tratamiento de la información topográfica e hidráulica de todas las celdas y vinculaciones que componen el modelo. Se generan archivos tabulares de las características topográficas e hidráulicas según sea el incremento de altura fijada. Además se realizan testeos básicos de compatibilidad de información de los elementos componentes.

El programa almacena en disco mediante archivos tabulados los datos computados de alturas y cota de agua vs. tiempo en cada celda; caudal, velocidad y número de Froude vs. tiempo en cada vinculación; hidrogramas y limnigramas en vinculaciones de frontera y/o preestablecidas.

En cada simulación de cada evento se realizan verificaciones que contemplan controles de cierre en términos de volúmenes (continuidad), ausencia de inestabilidades y otras perturbaciones numéricas.

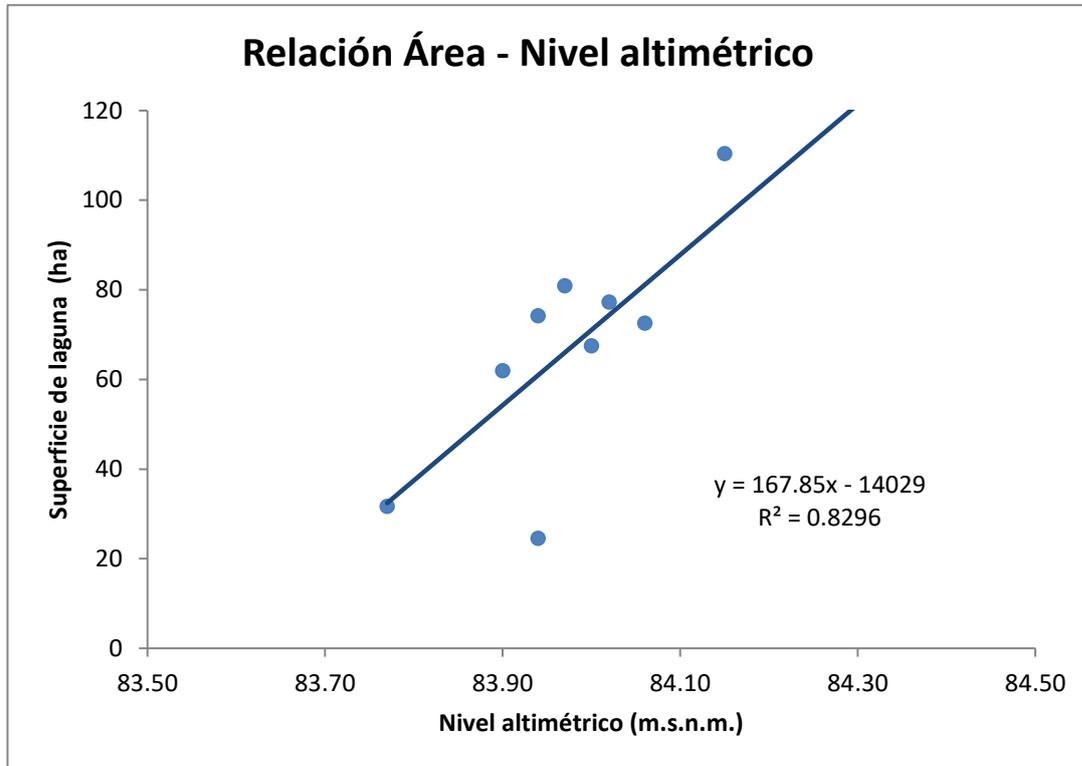
Para el caso de simulaciones parciales el programa permite almacenar la historia antecedente y poder arrancar desde cualquier tiempo ya computado anteriormente.

Todo el sistema computacional fue desarrollado en lenguaje Fortran 90.

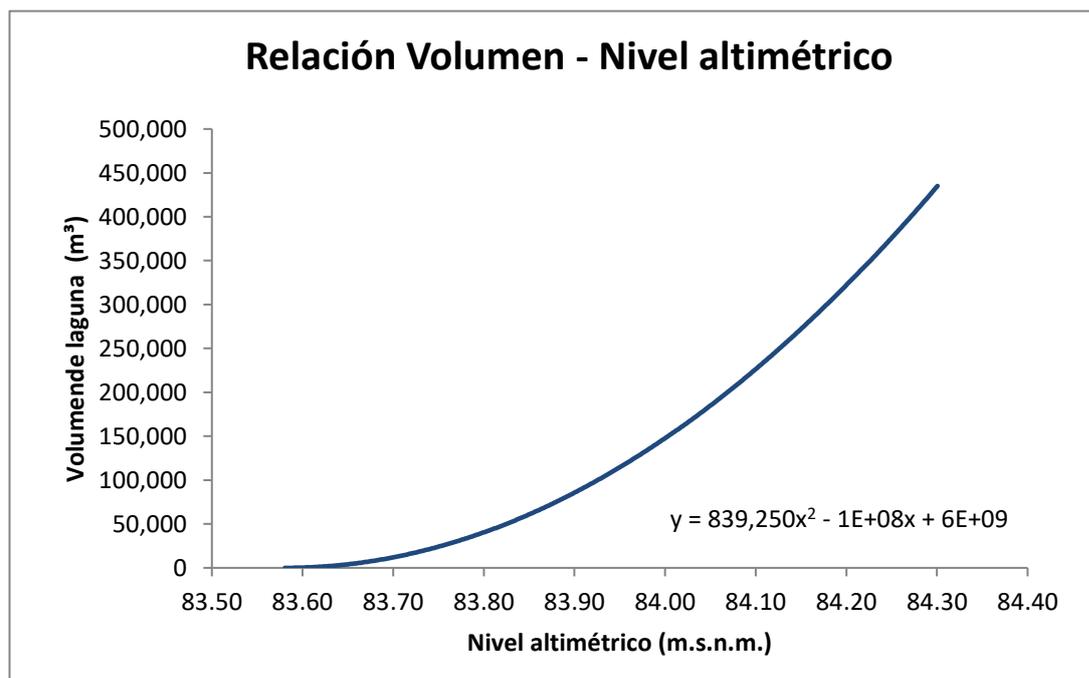
## Anexo B

## ANEXO B

### Laguna N°01



**Figura B01:** Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°01.



**Figura B02:** Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°01.

## Laguna N°02

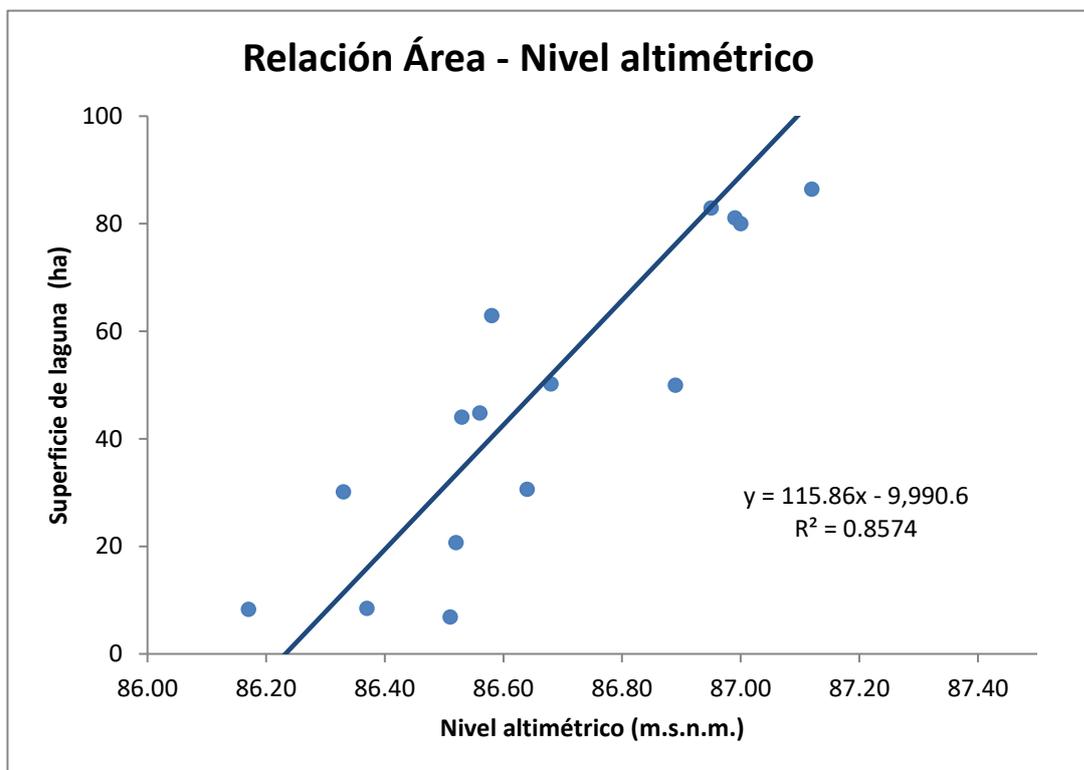


Figura B03: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°02.

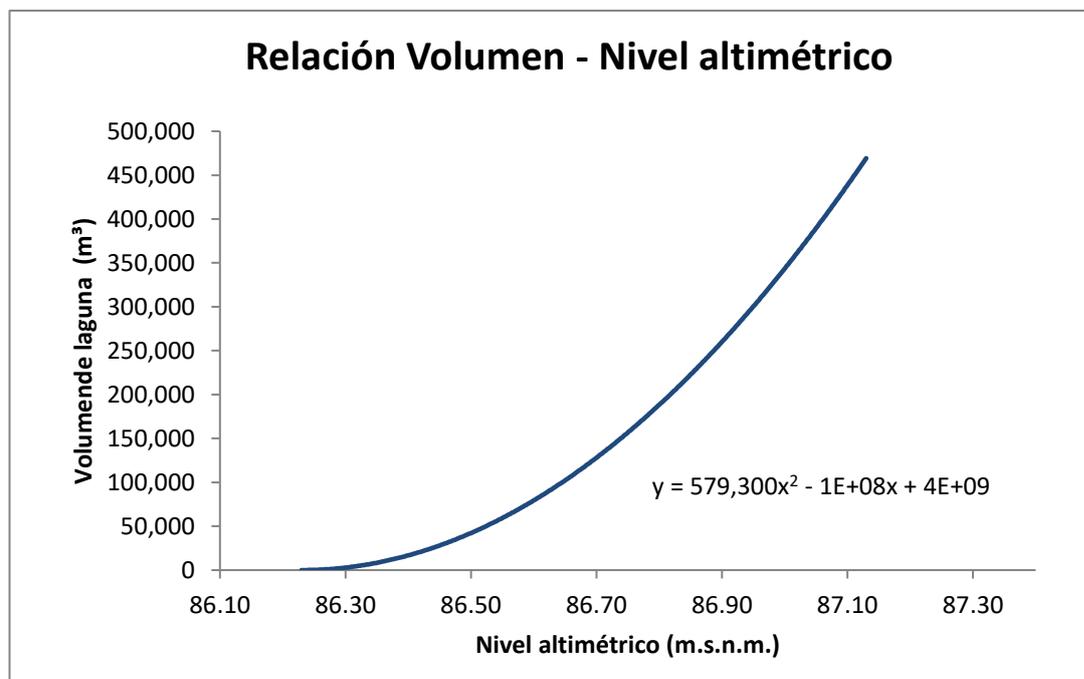


Figura B04: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°02.

### Laguna N°03

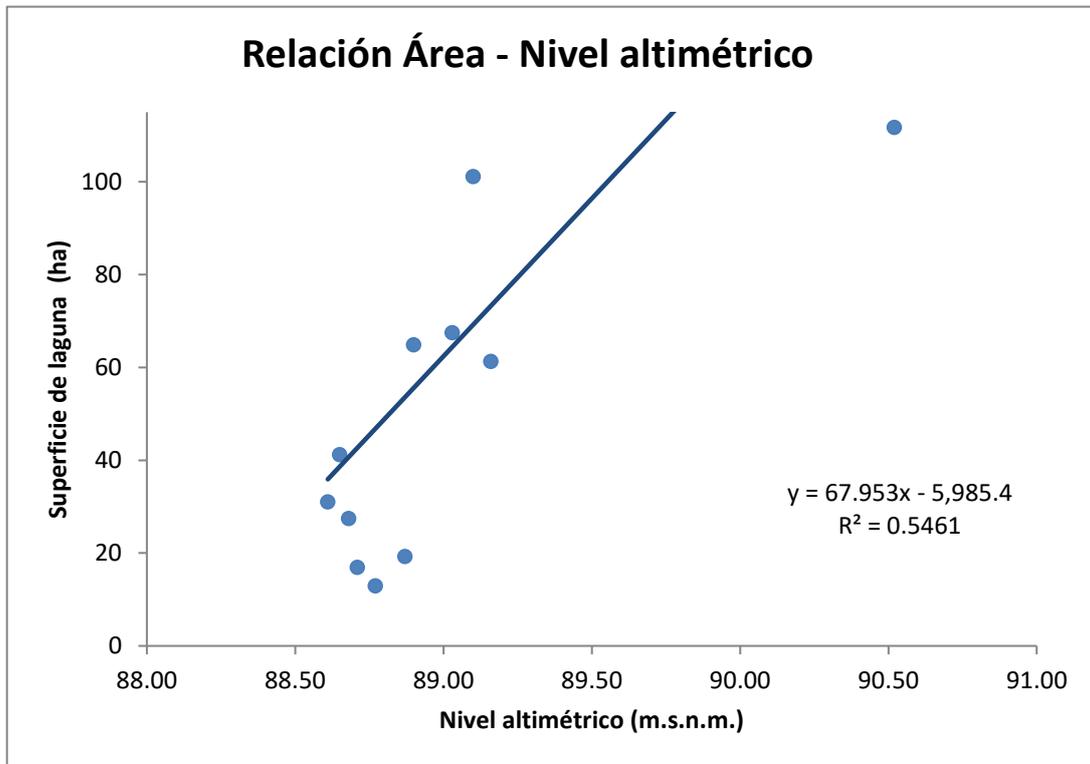


Figura B05: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°03.

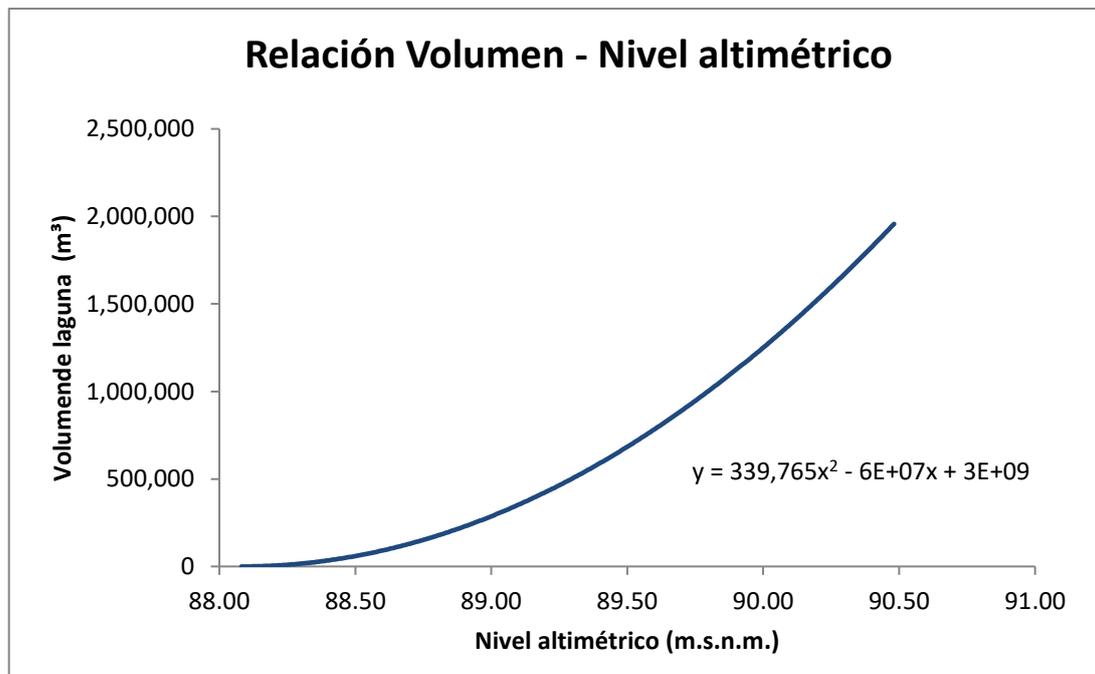


Figura B06: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°03.

## Laguna N°04

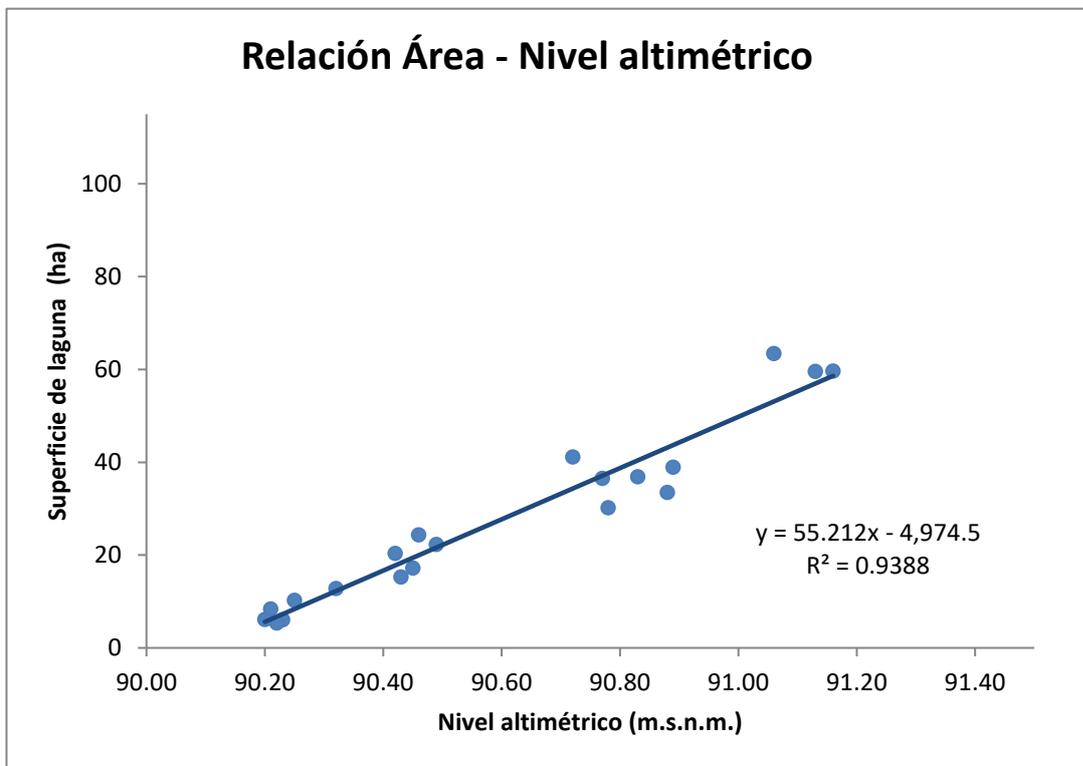


Figura B07: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°04.

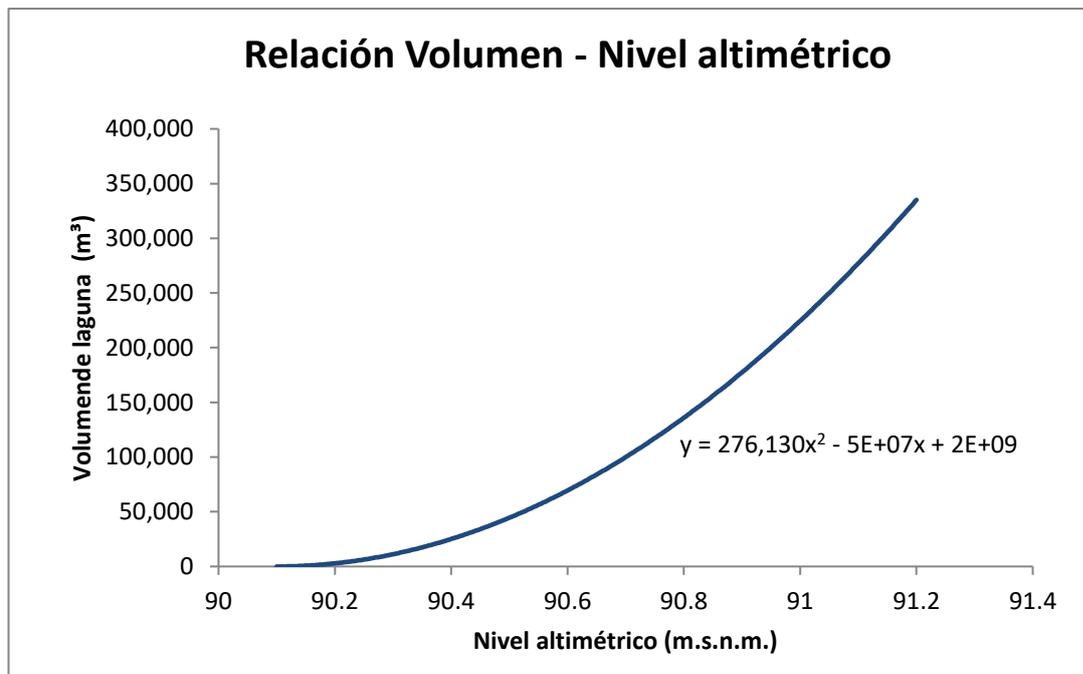


Figura B08: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°04.

## Laguna N°05

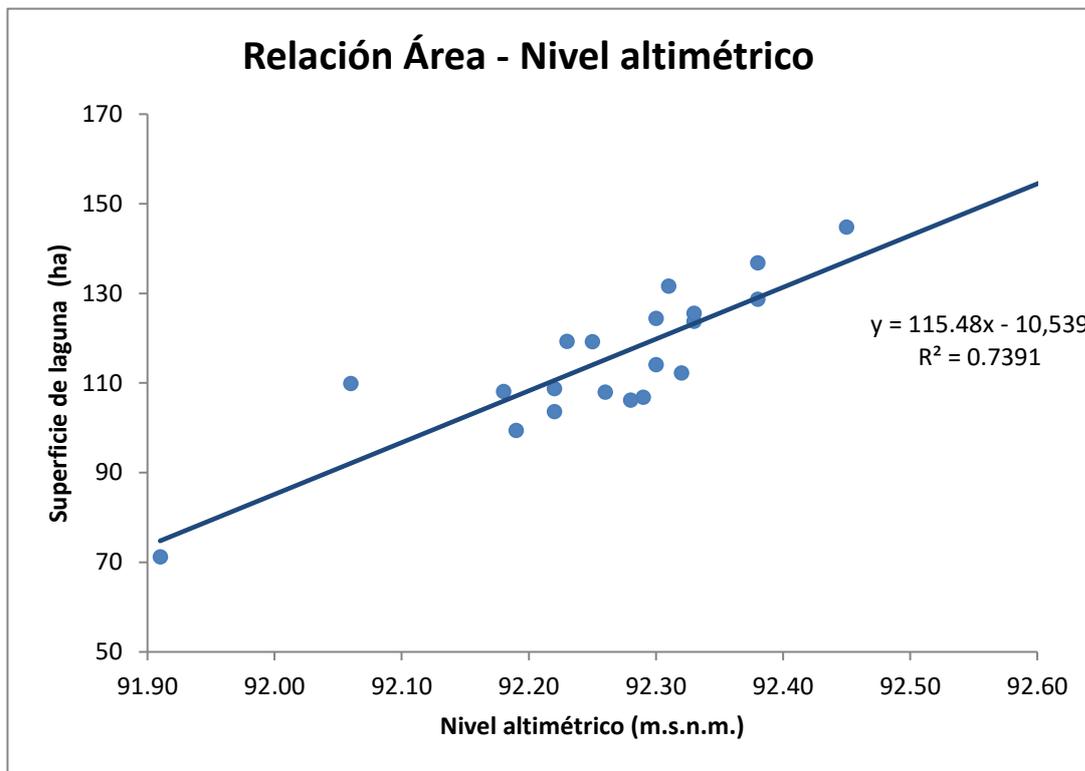


Figura B09: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°05.

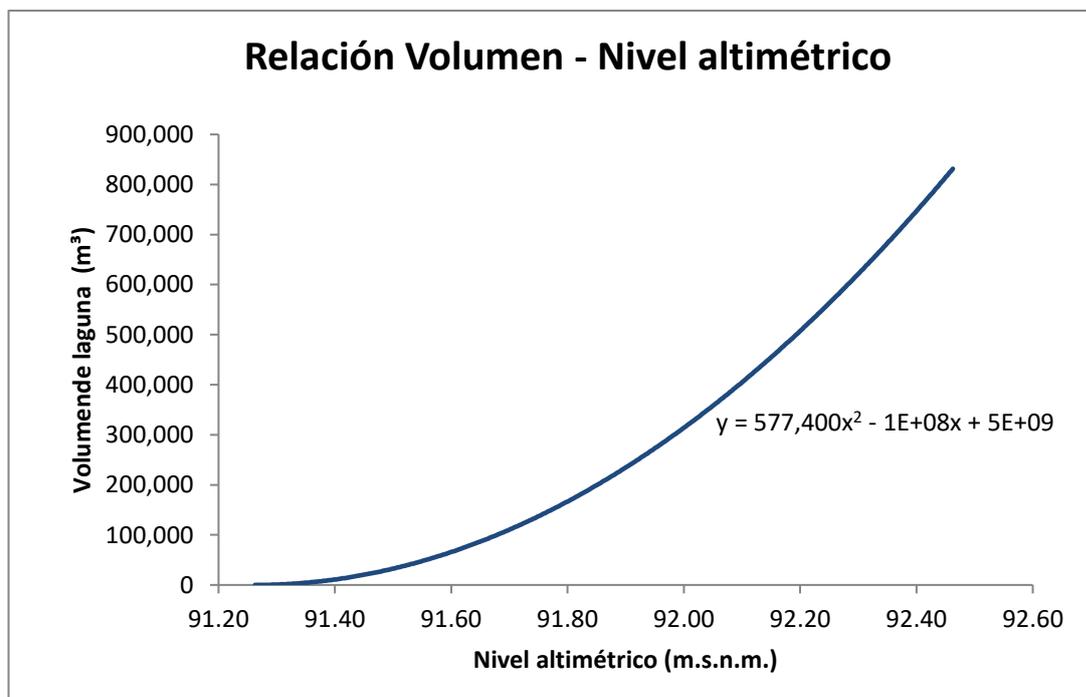


Figura B10: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°05.

## Laguna N°06

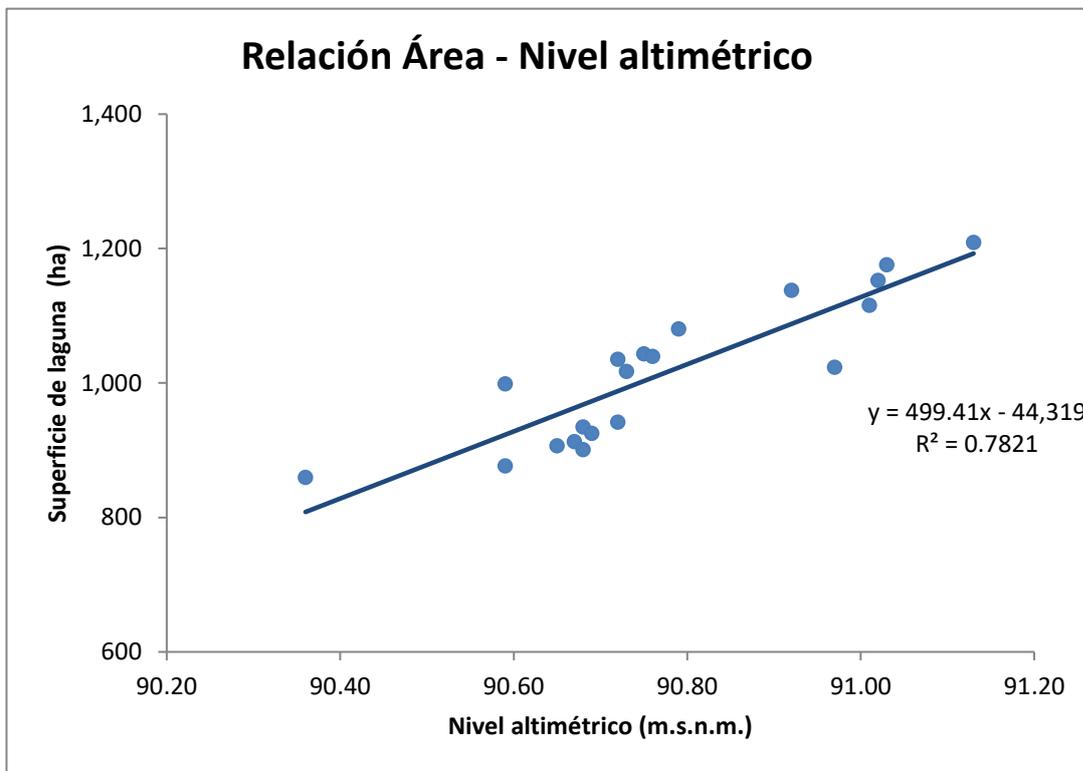


Figura B11: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°06.

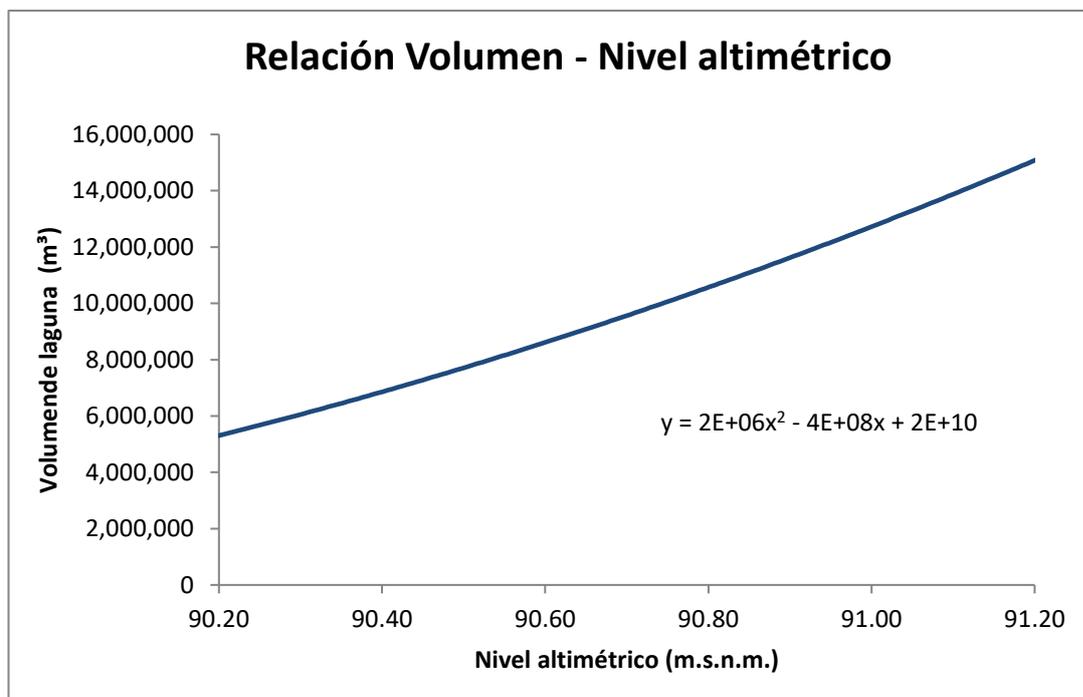
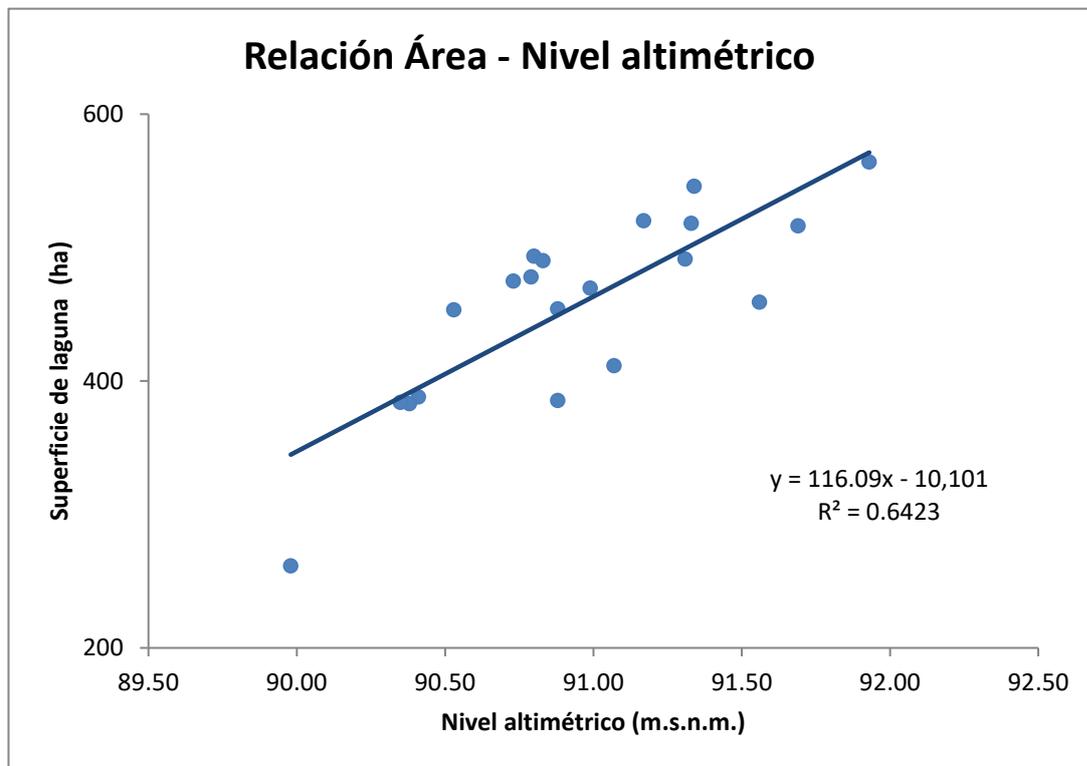
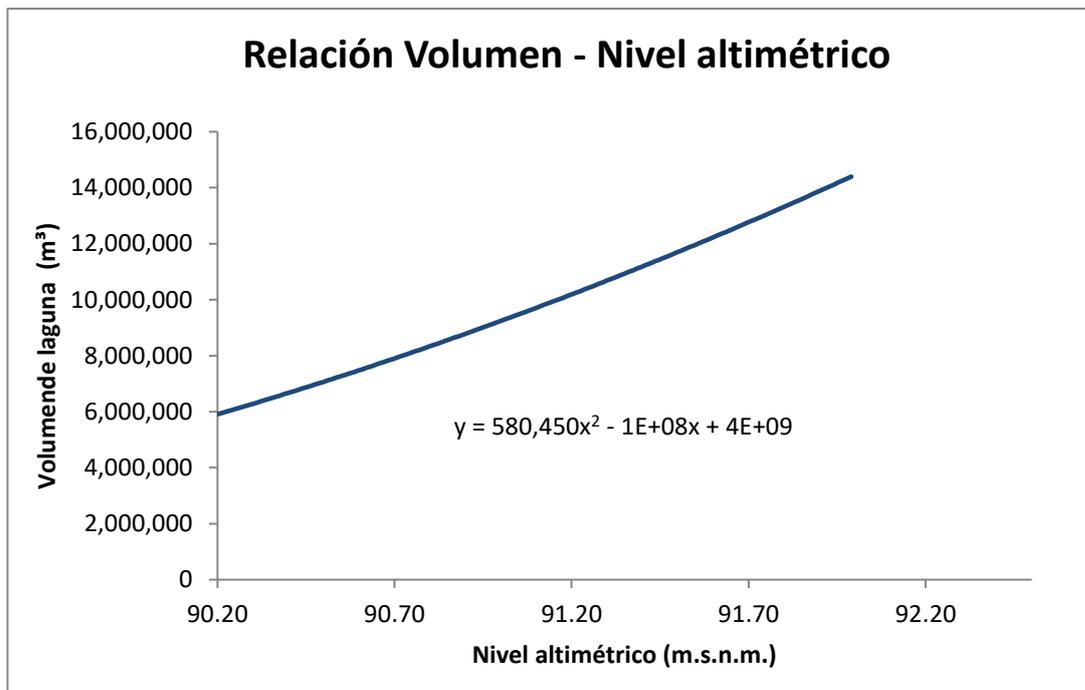


Figura B12: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°06.

## Laguna N°07



**Figura B13:** Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°07.



**Figura B14:** Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°07.

## Laguna N°08

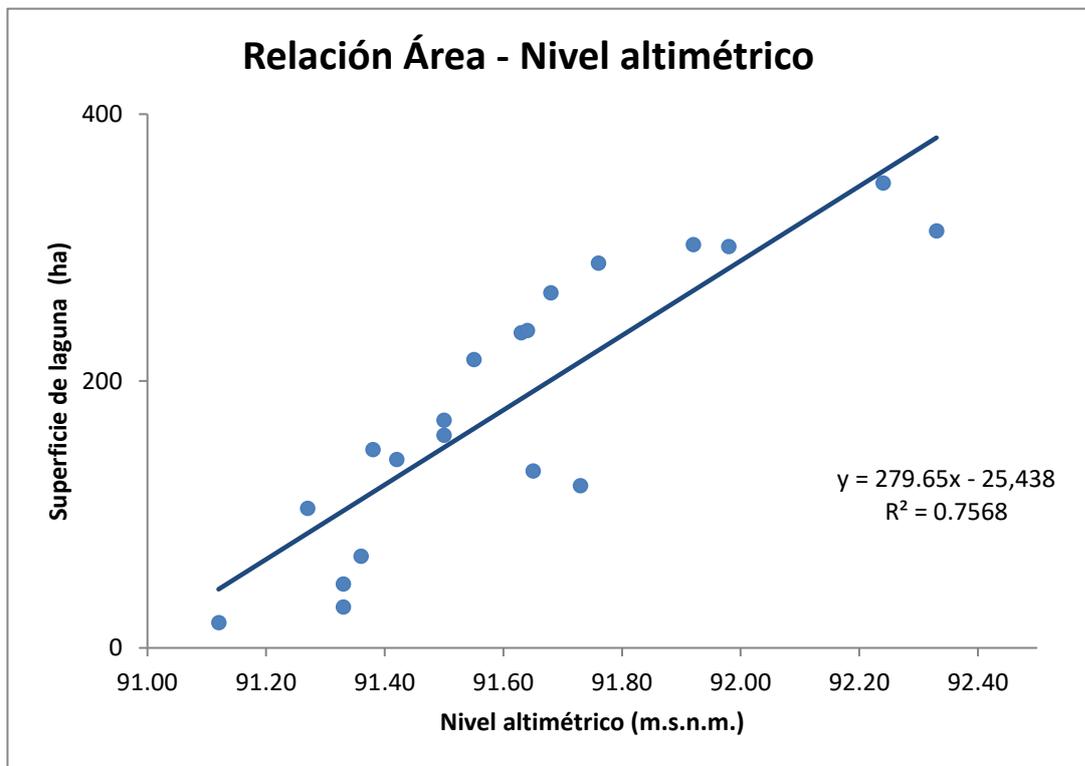


Figura B15: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°08.

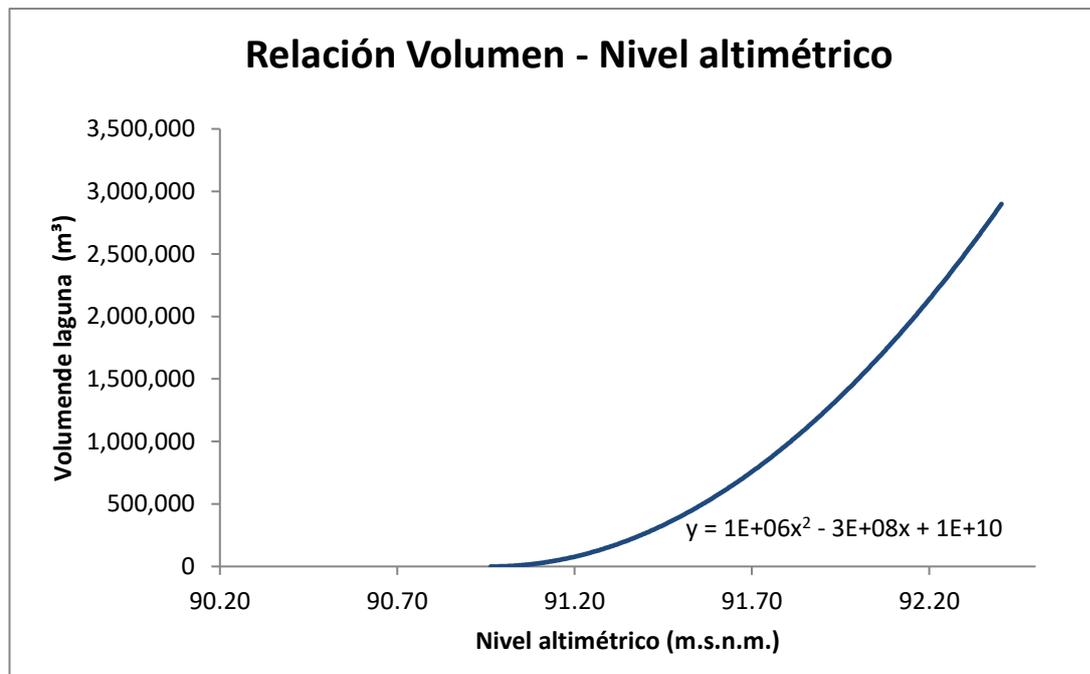


Figura B16: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°08.

## Laguna N°09

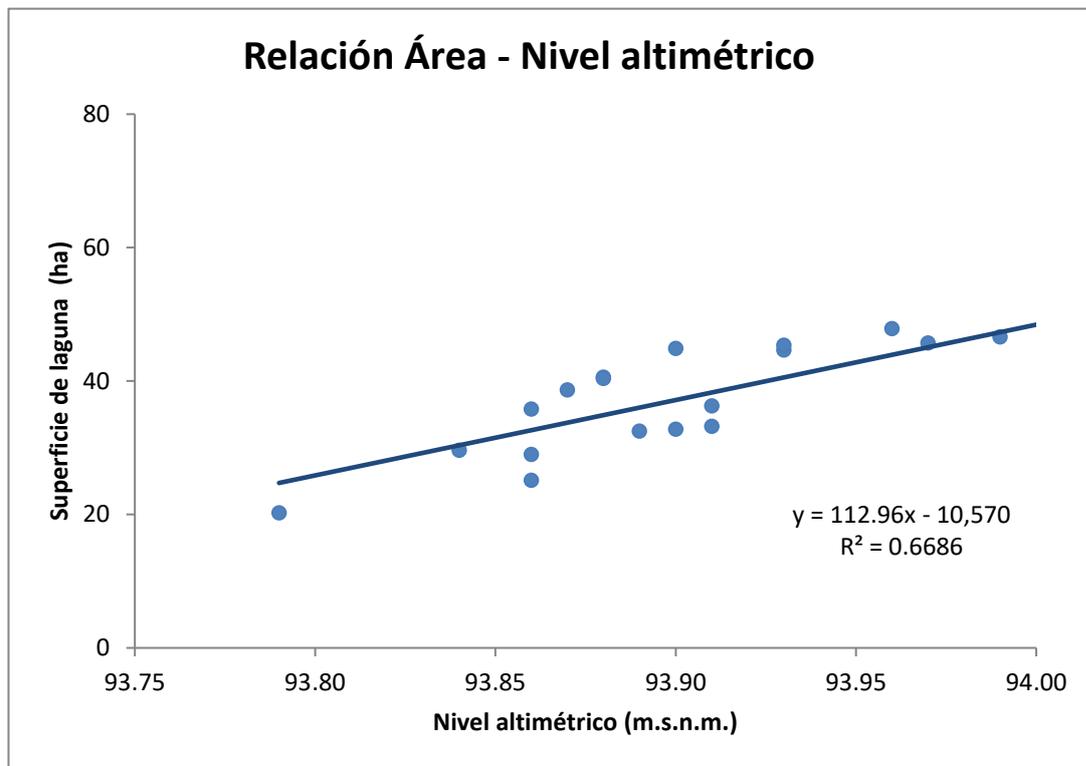


Figura B17: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°09.

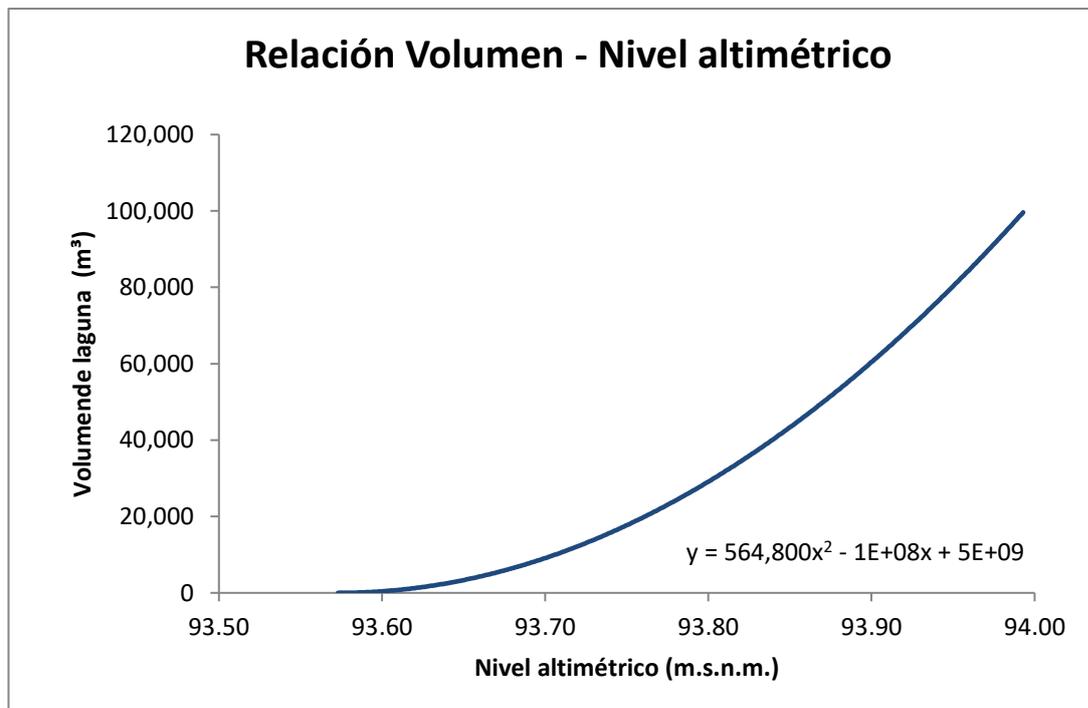


Figura B18: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°09.

## Laguna N°10

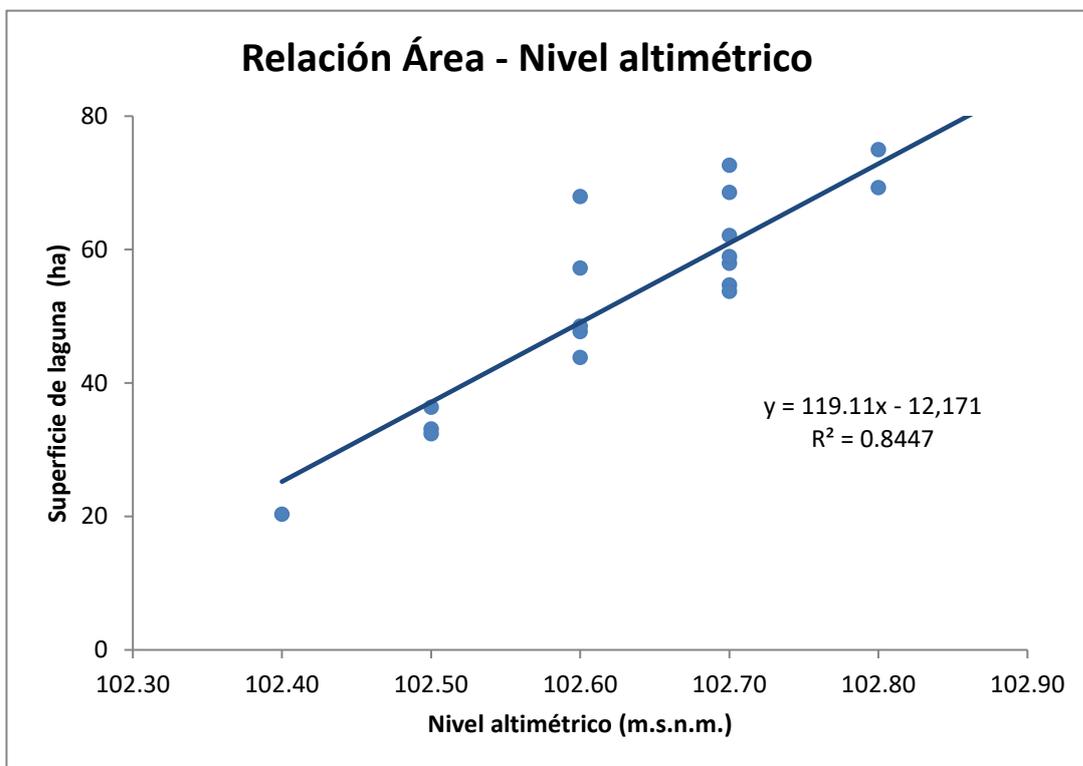


Figura B19: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°10.

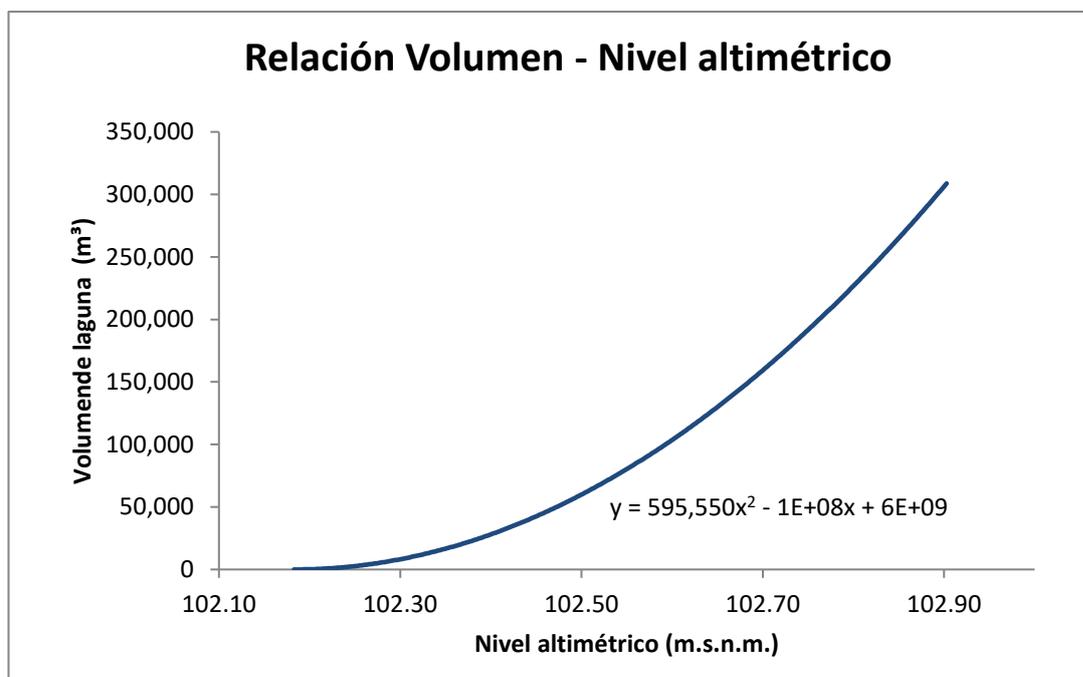


Figura B20: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°10.

## Laguna N°11

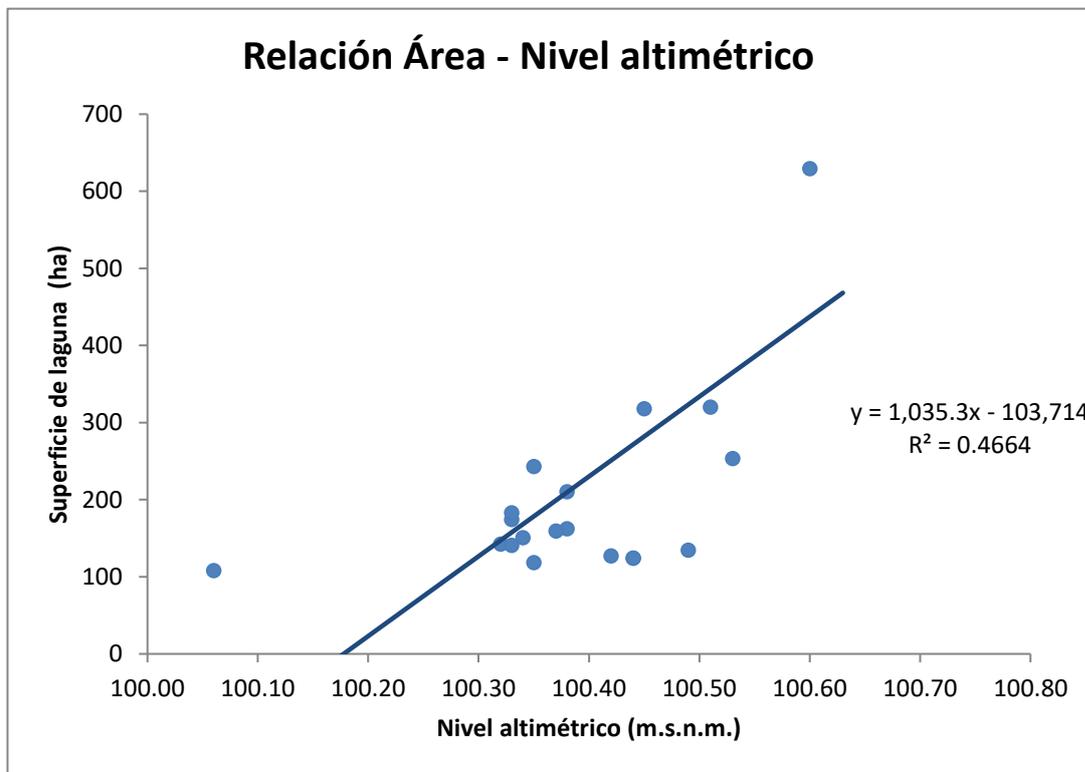


Figura B21: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°11.

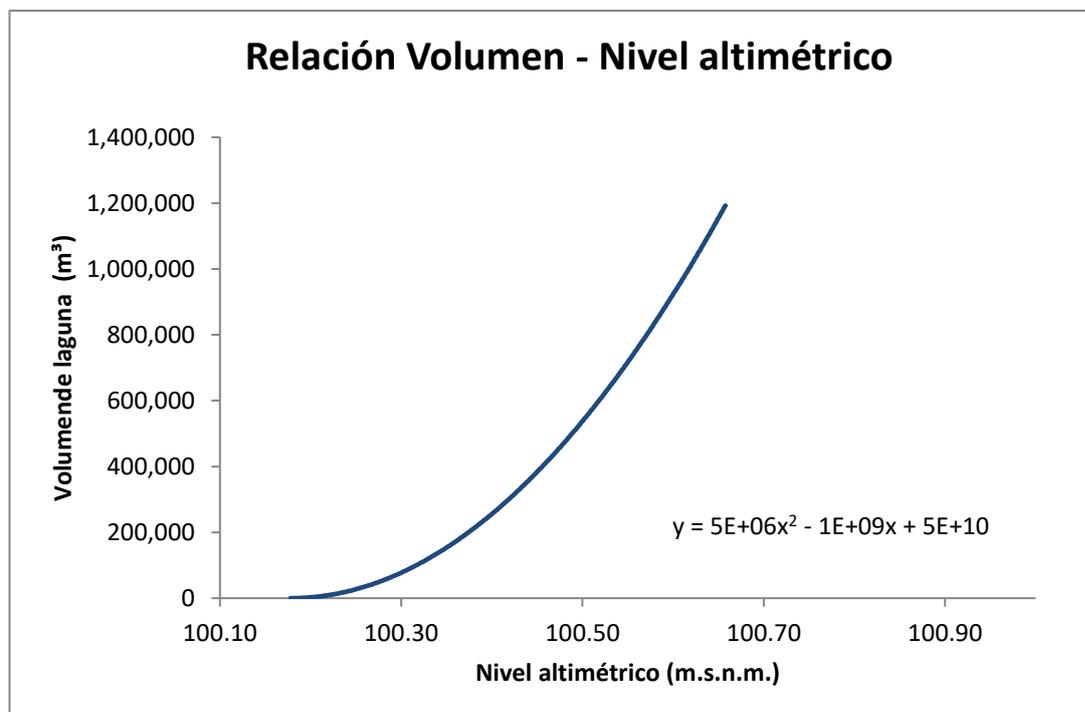


Figura B22: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°11.

## Laguna N°12

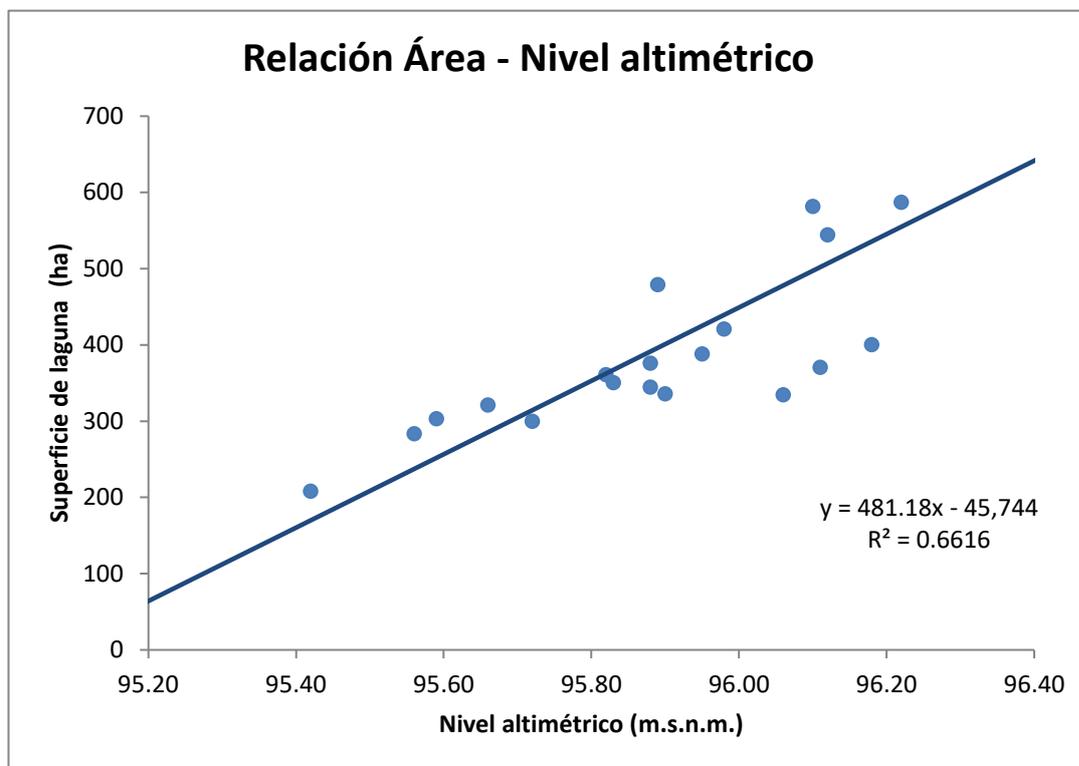


Figura B23: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°12.

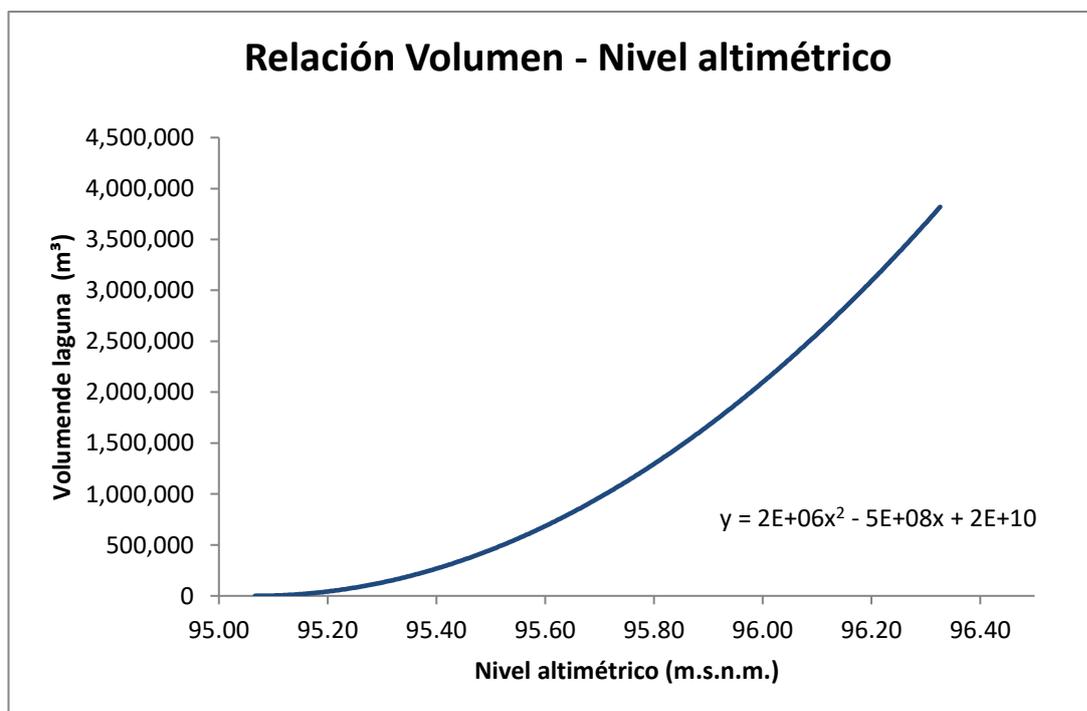


Figura B24: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°12.

## Laguna N°13

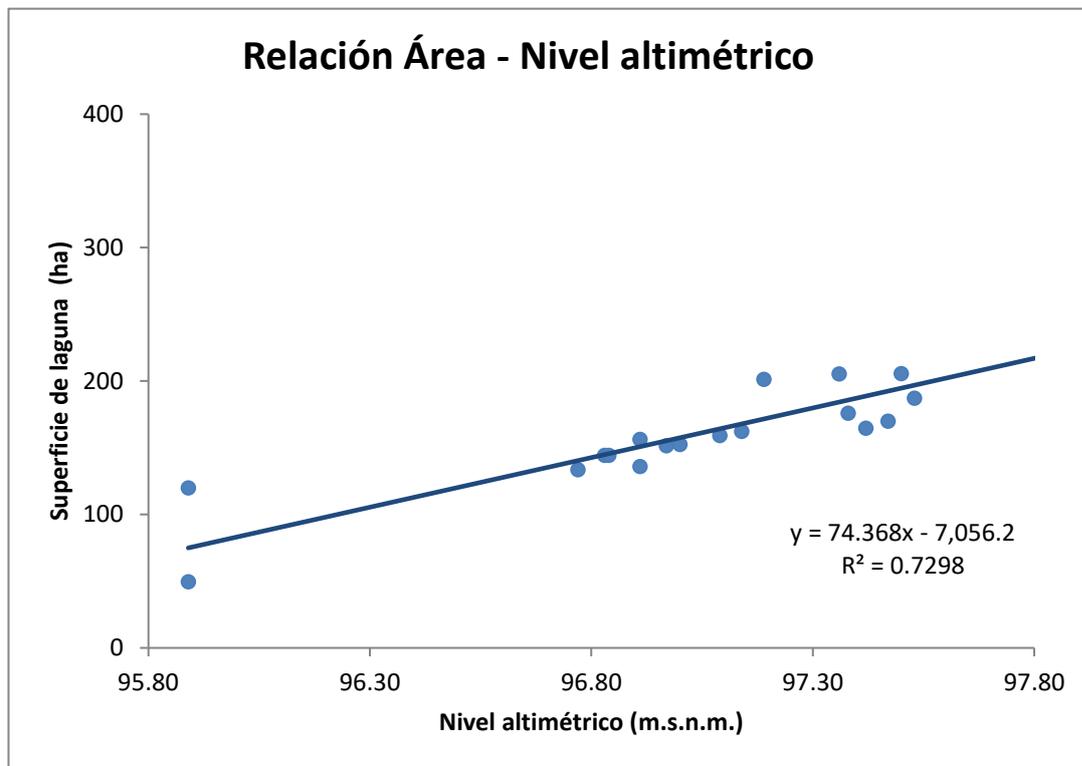


Figura B25: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°13.

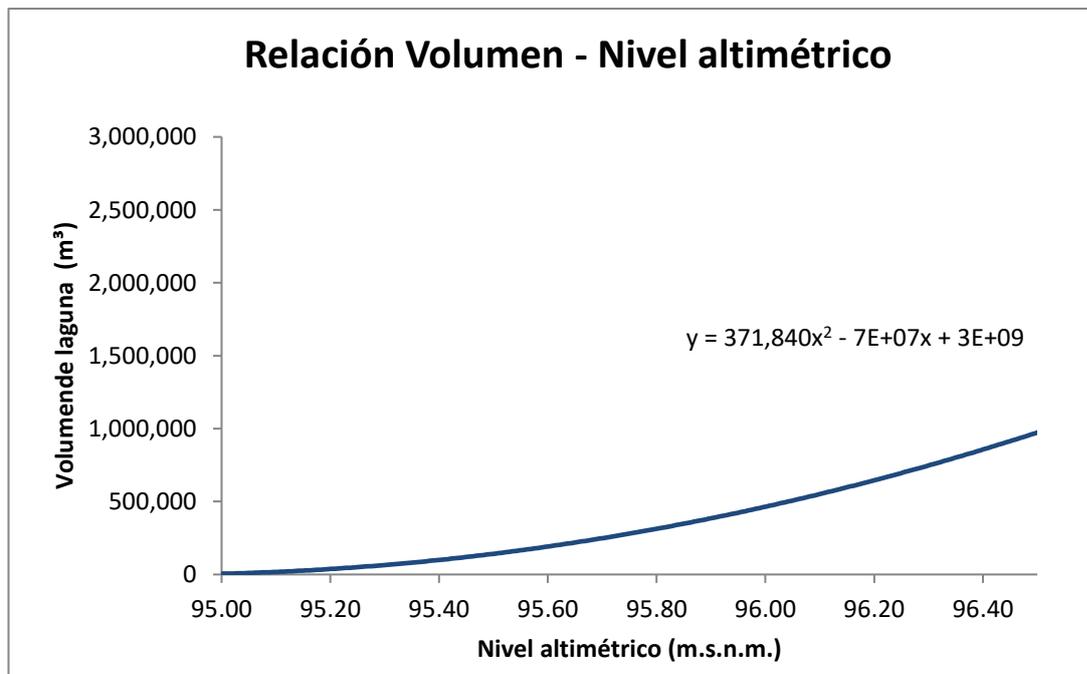


Figura B26: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°13.

## Laguna N°14

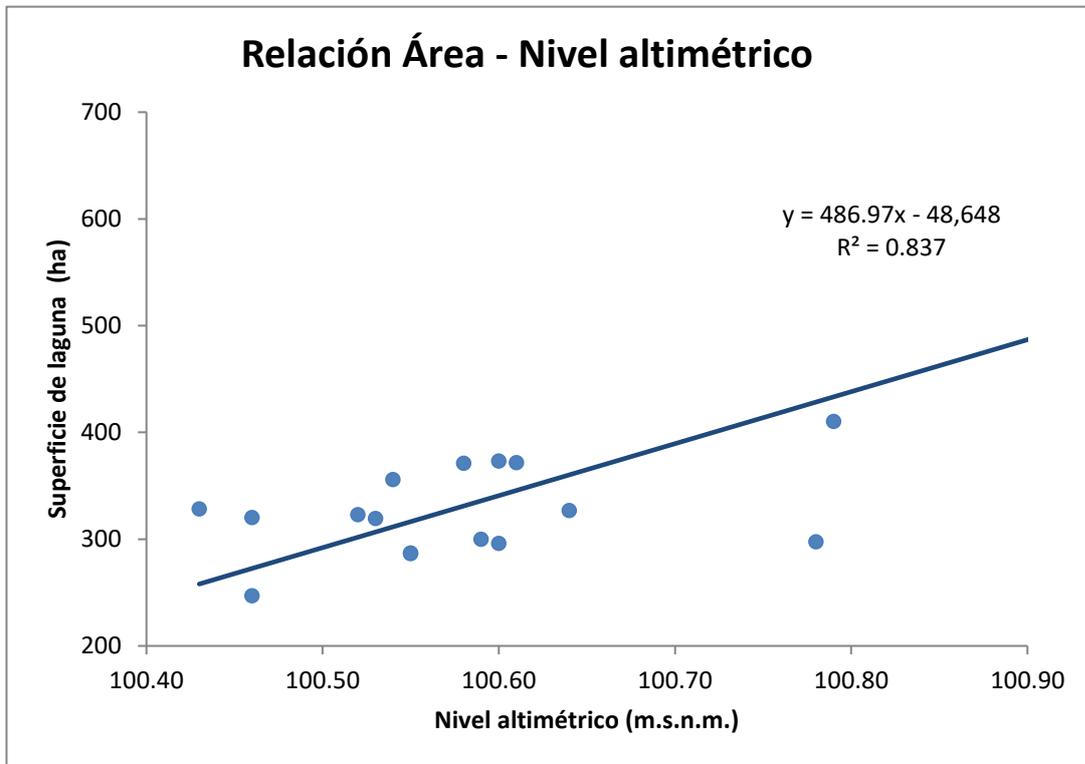


Figura B27: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°14.

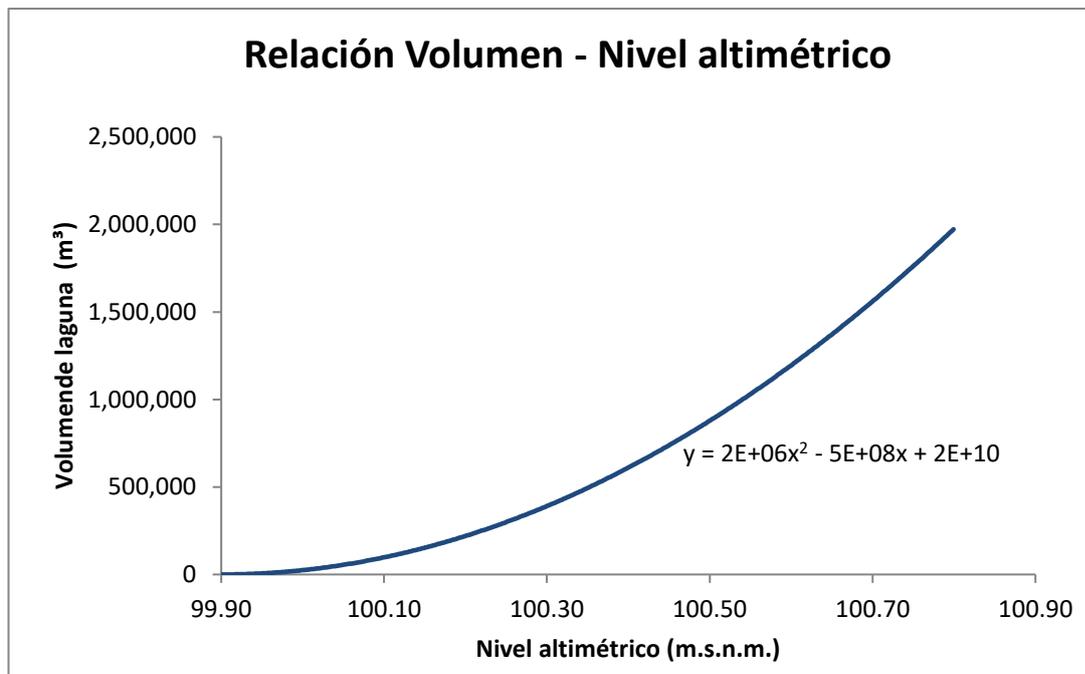


Figura B28: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°14.

## Laguna N°15

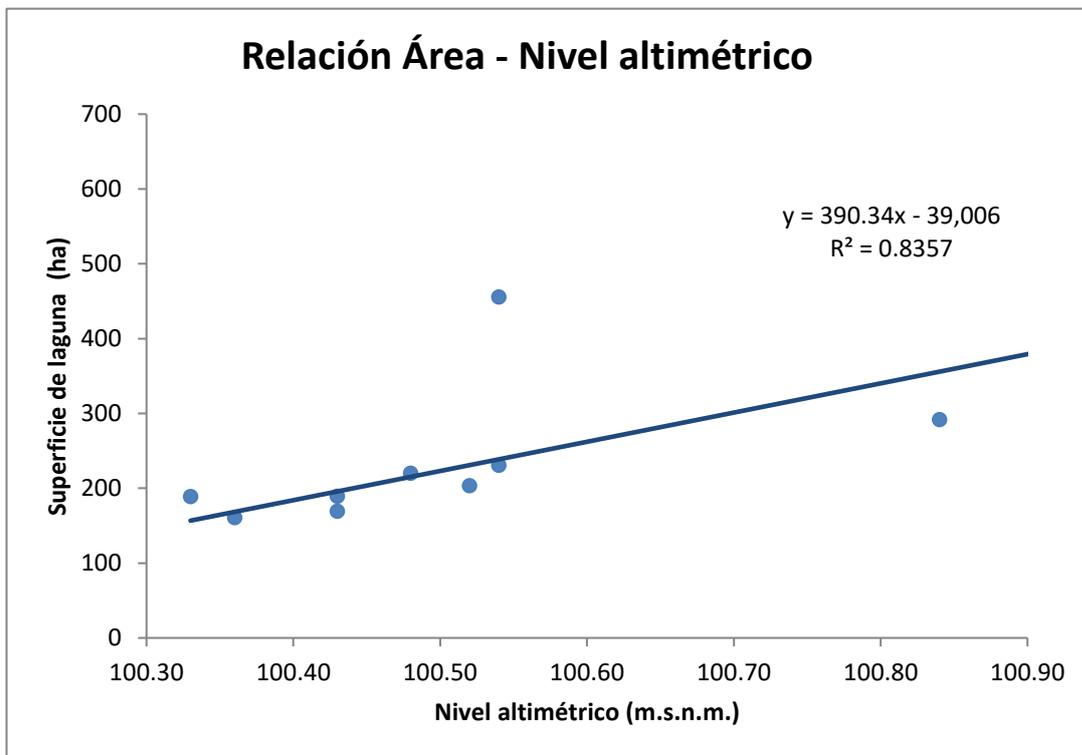


Figura B29: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°15.

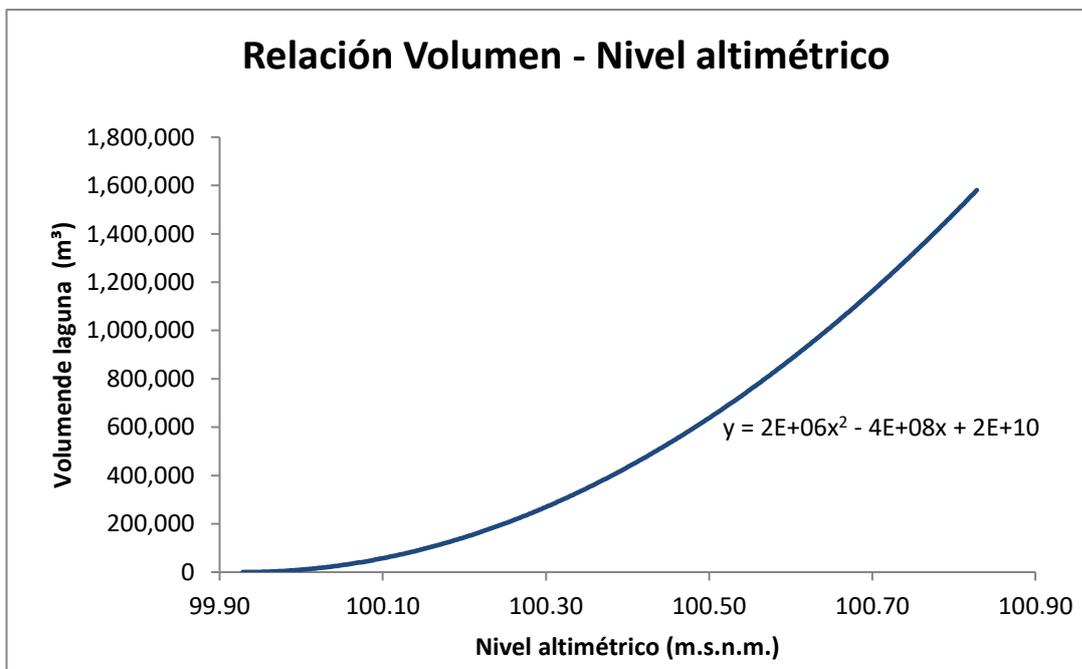


Figura B30: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°15.

## Laguna N°16

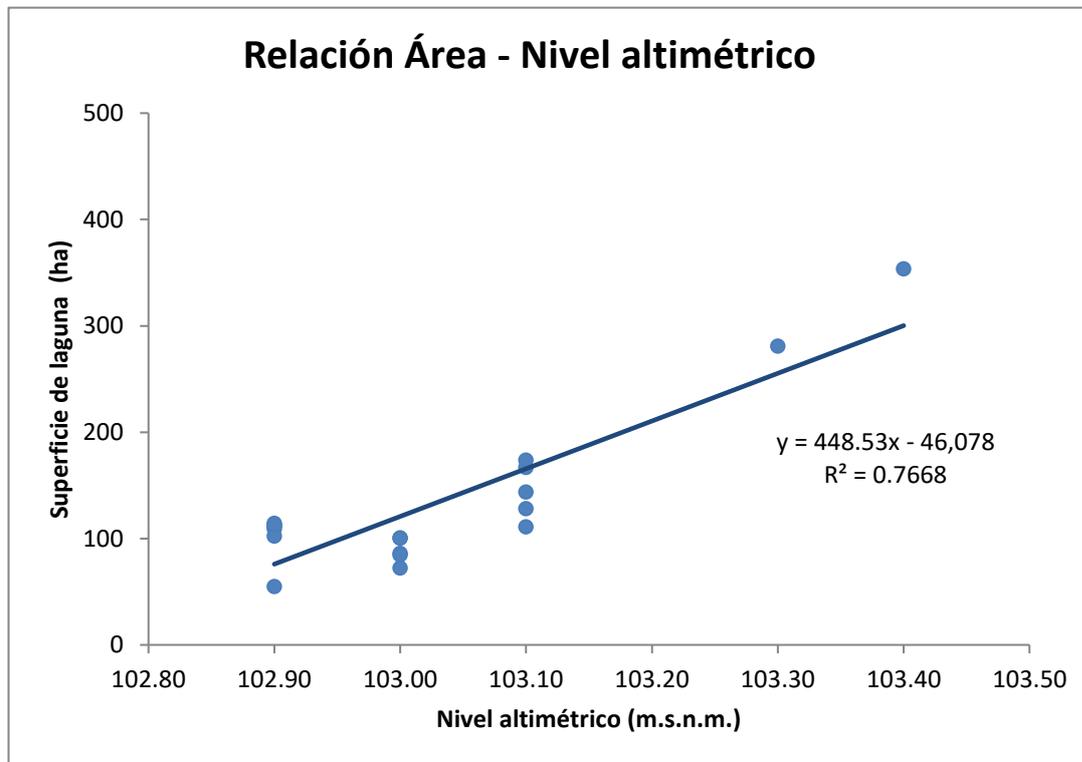


Figura B31: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°16.

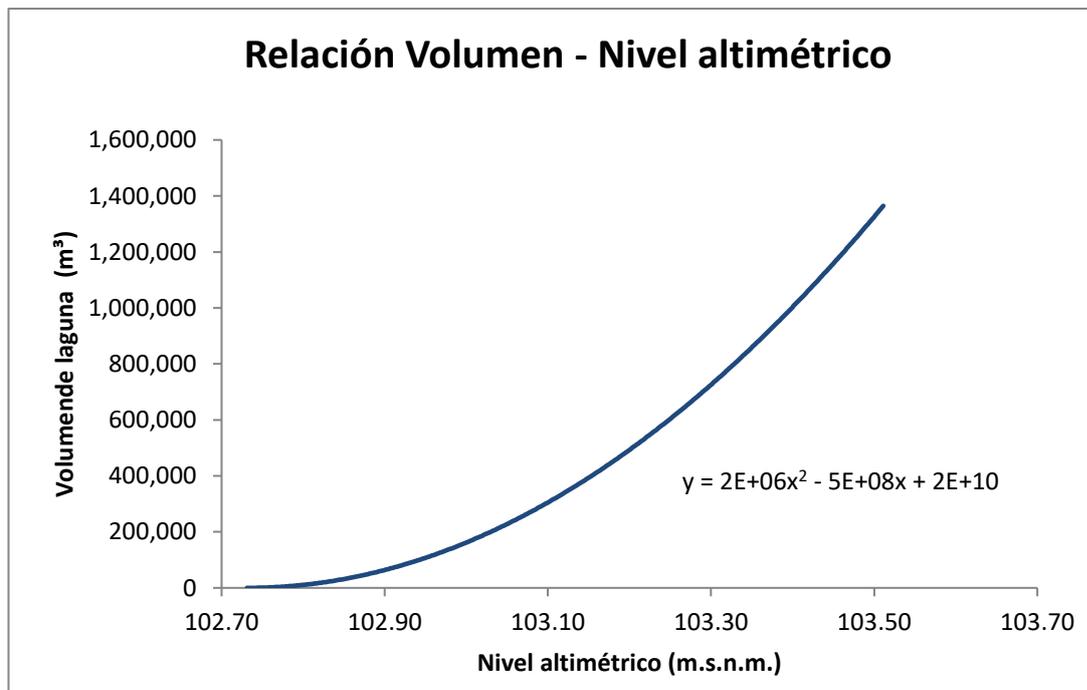


Figura B32: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°16.

## Laguna N°17

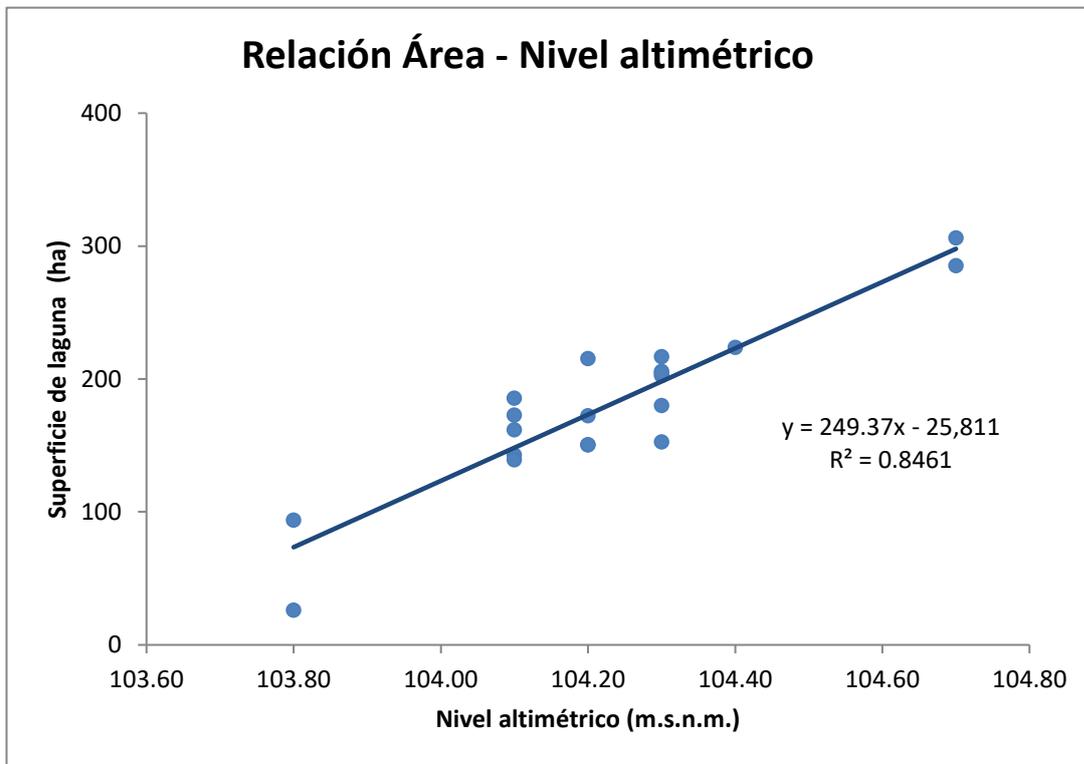


Figura B33: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°17.

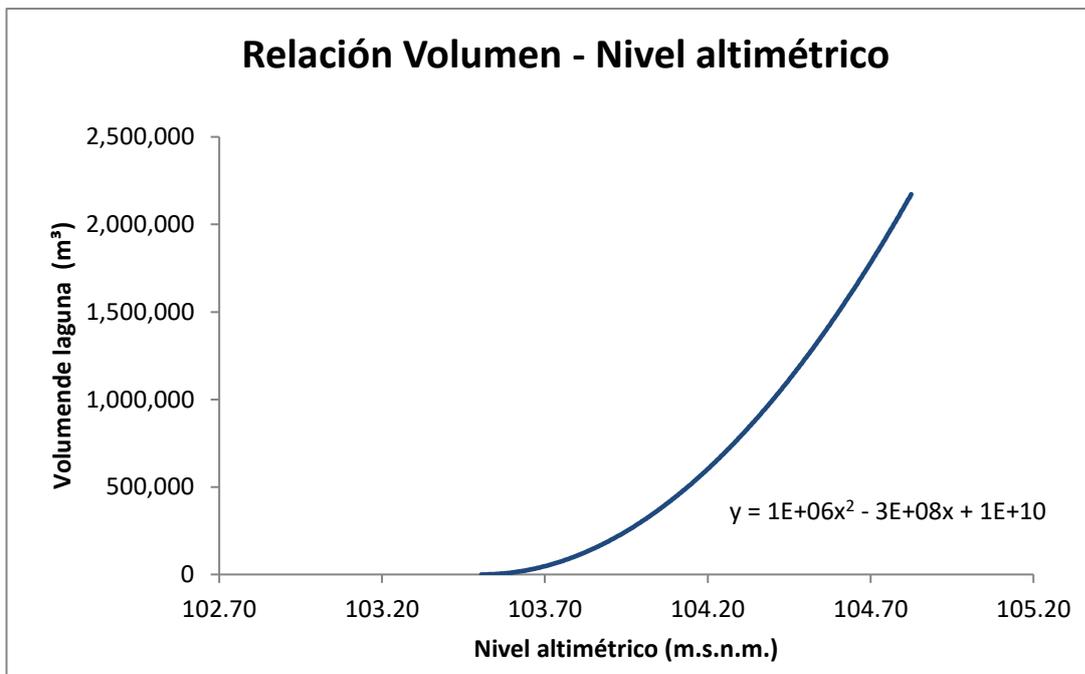


Figura B34: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°17.

## Laguna N°18

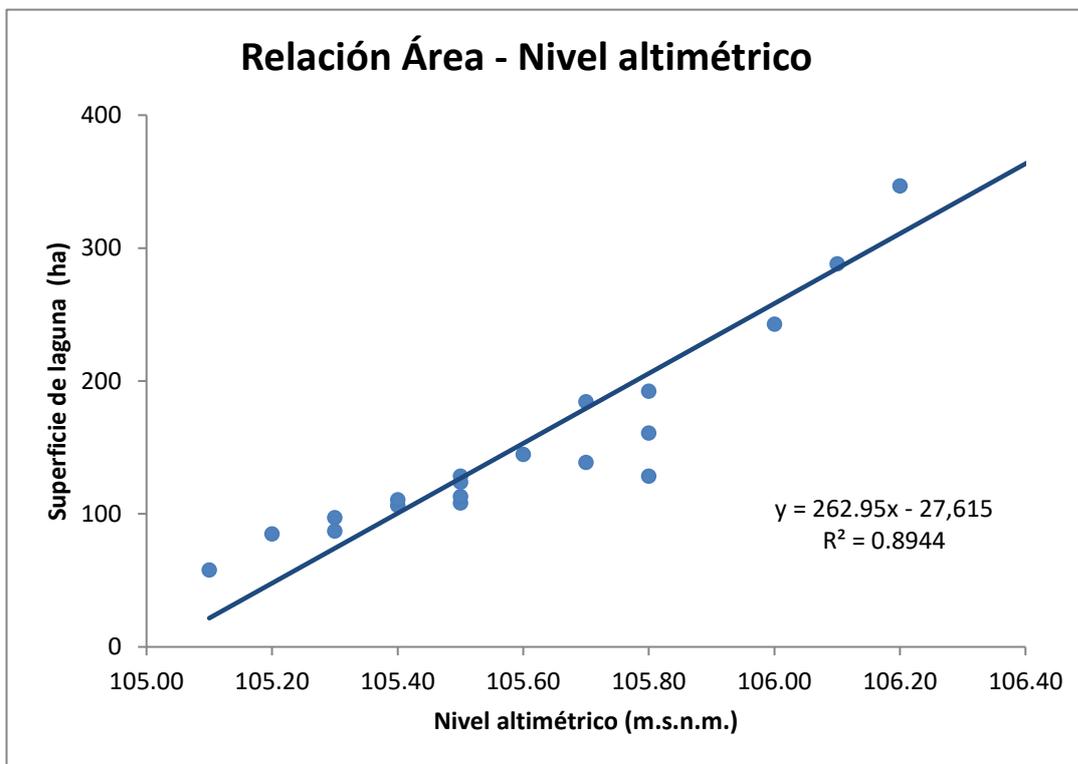


Figura B35: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°18.

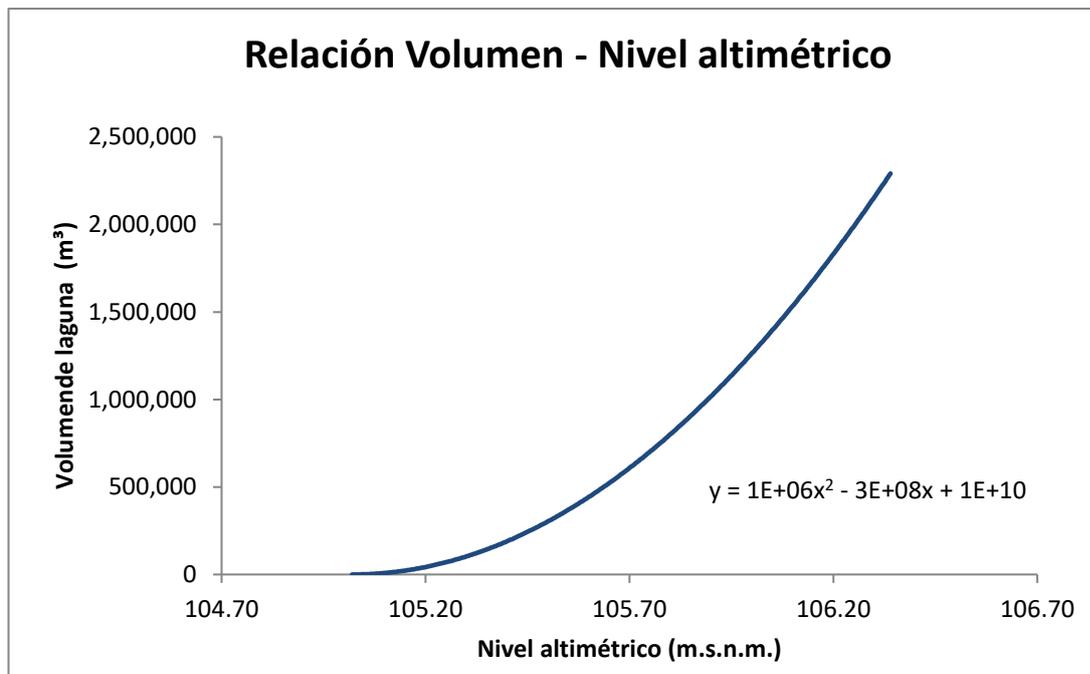


Figura B36: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°18.

## Laguna N°19

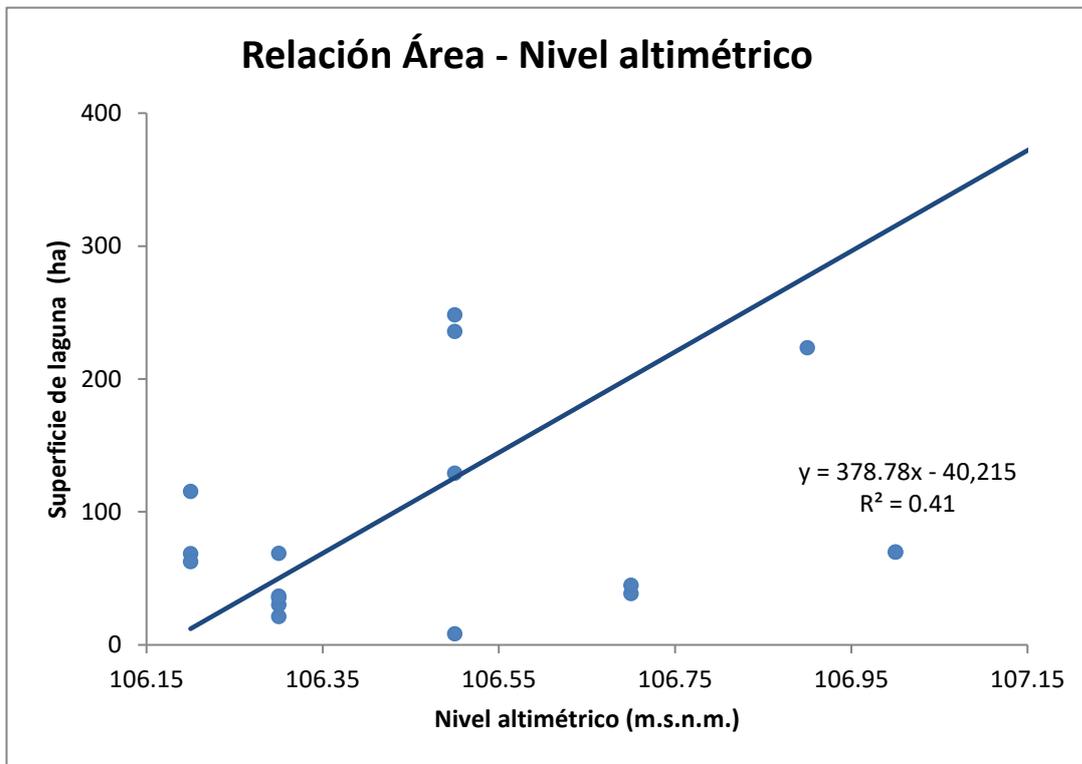


Figura B37: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°19.

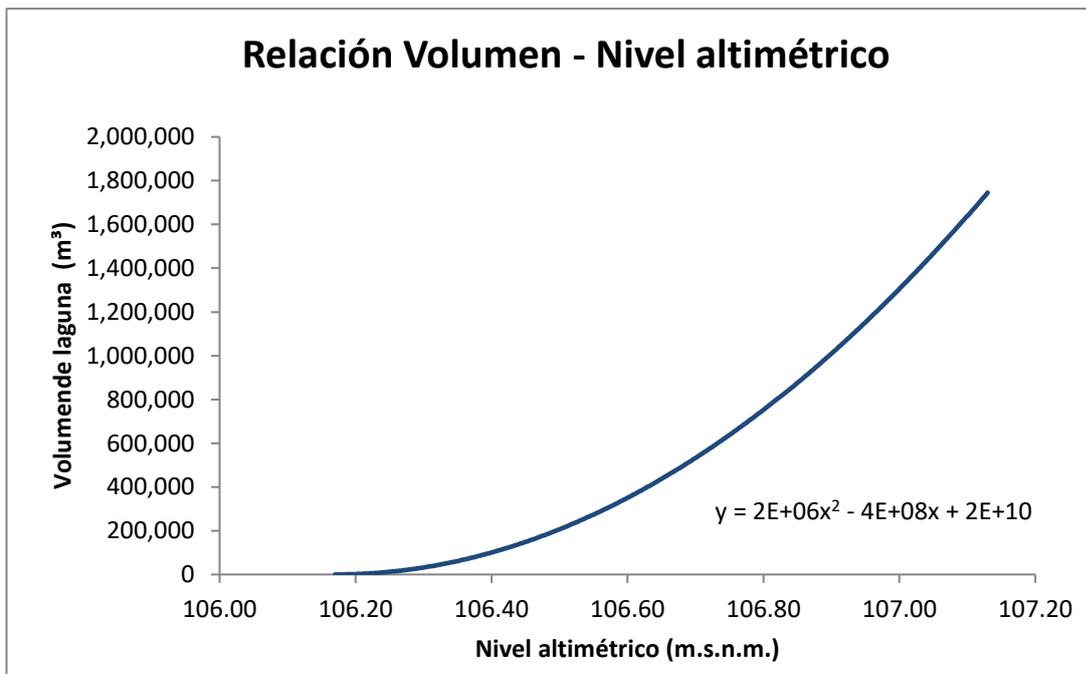


Figura B38: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°19.

## Laguna N°20

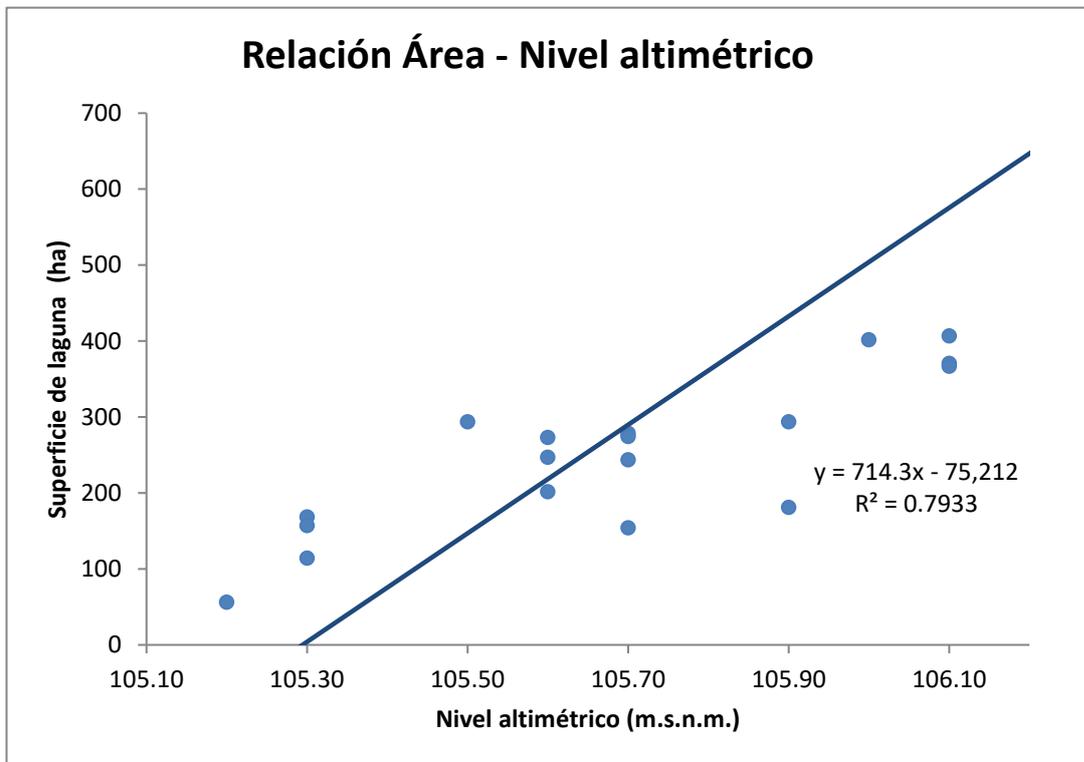


Figura B39: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°20.

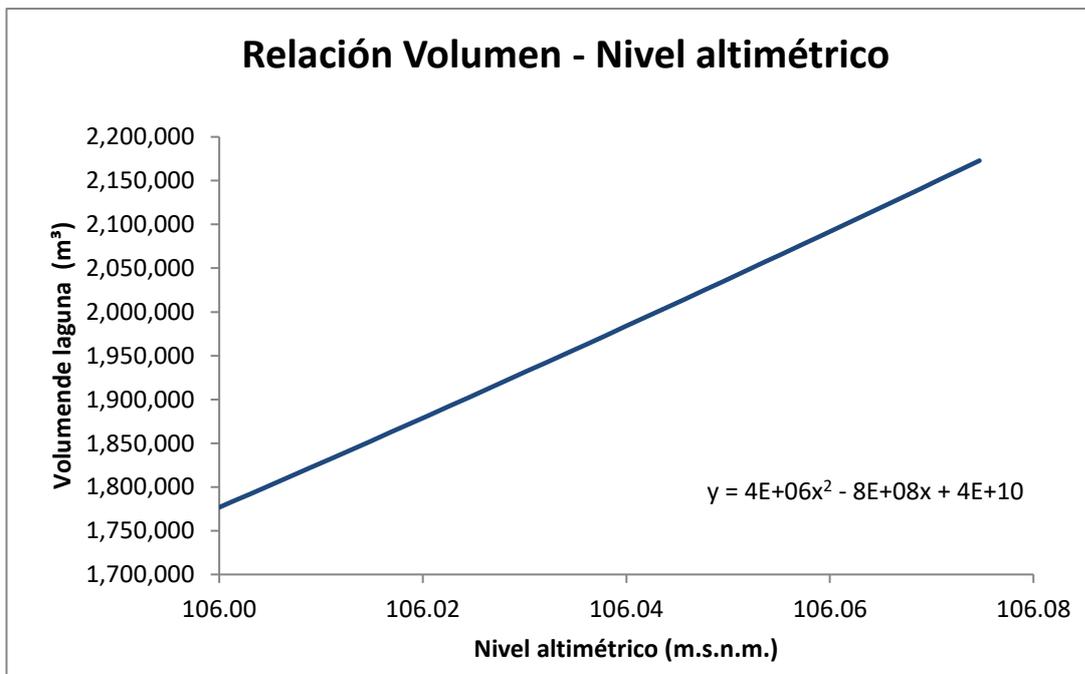


Figura B40: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°40.

## Laguna N°21

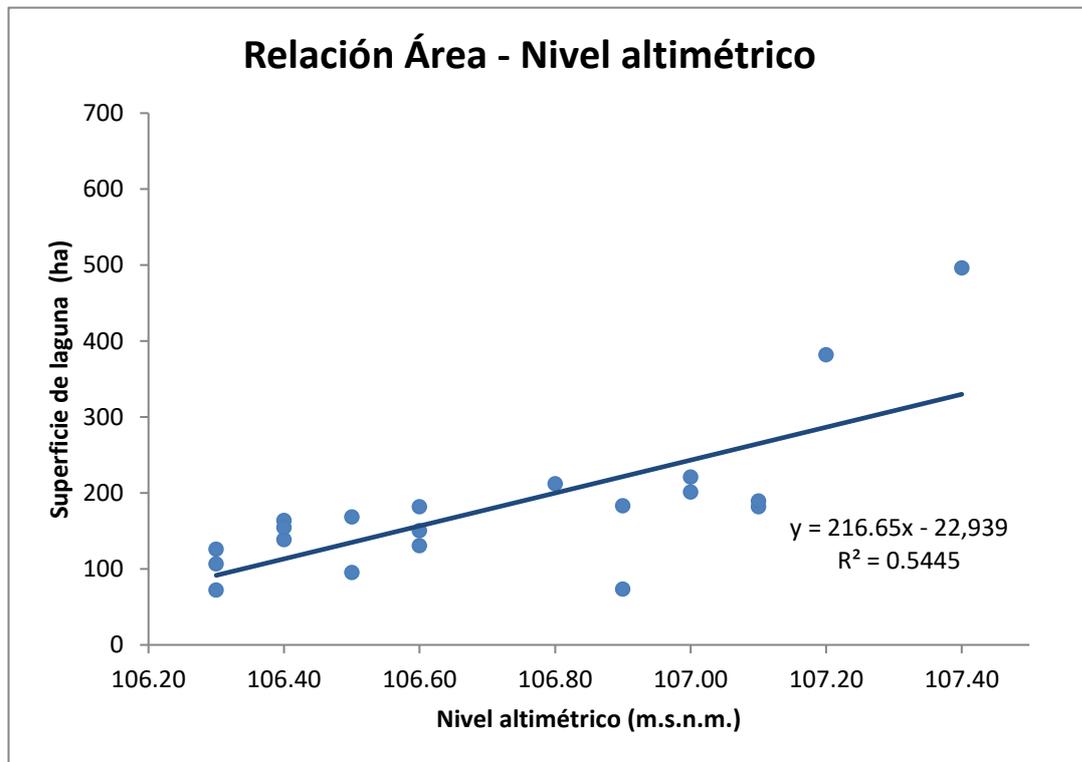


Figura B41: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°21.

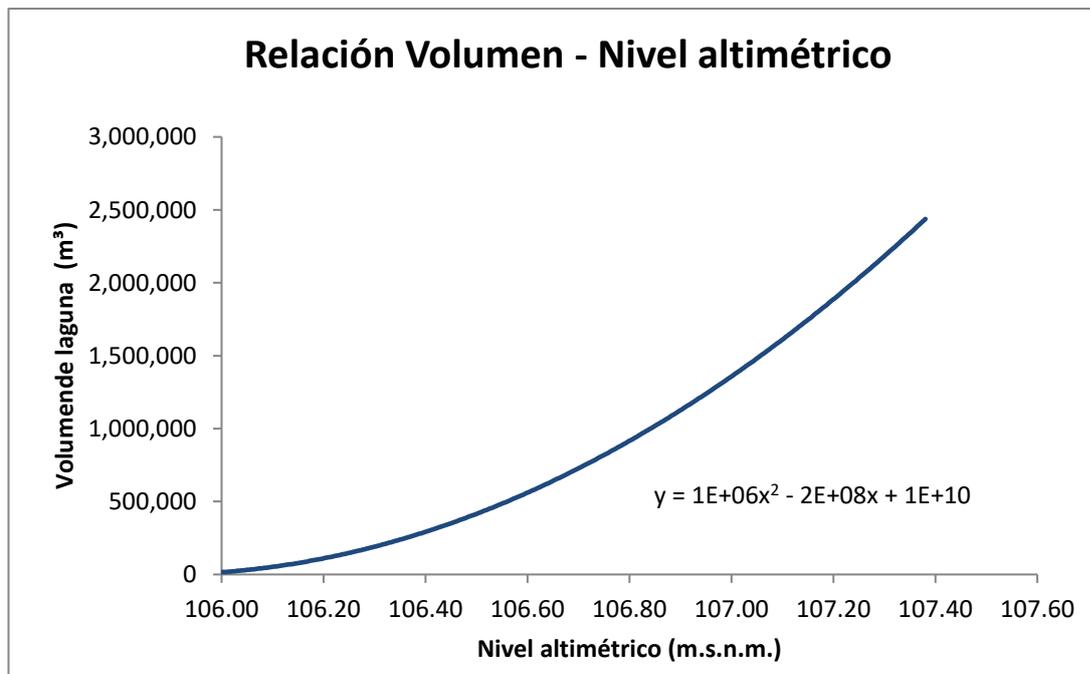


Figura B42: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°21.

## Laguna N°22

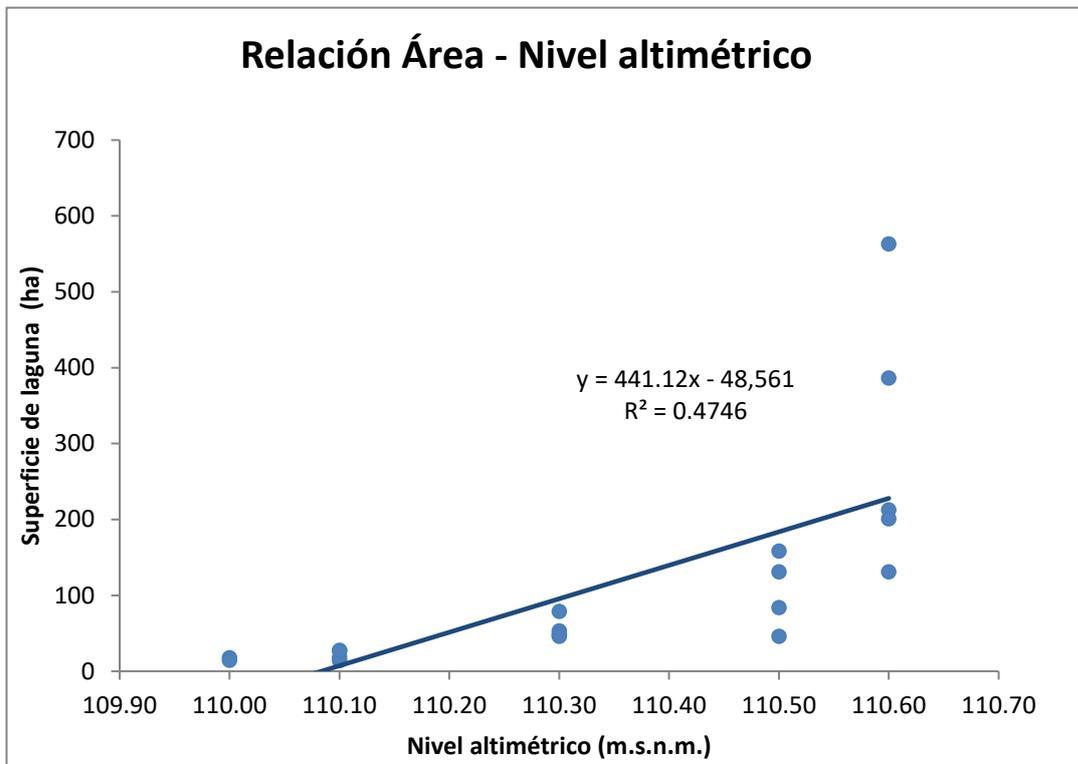


Figura B43: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°22.

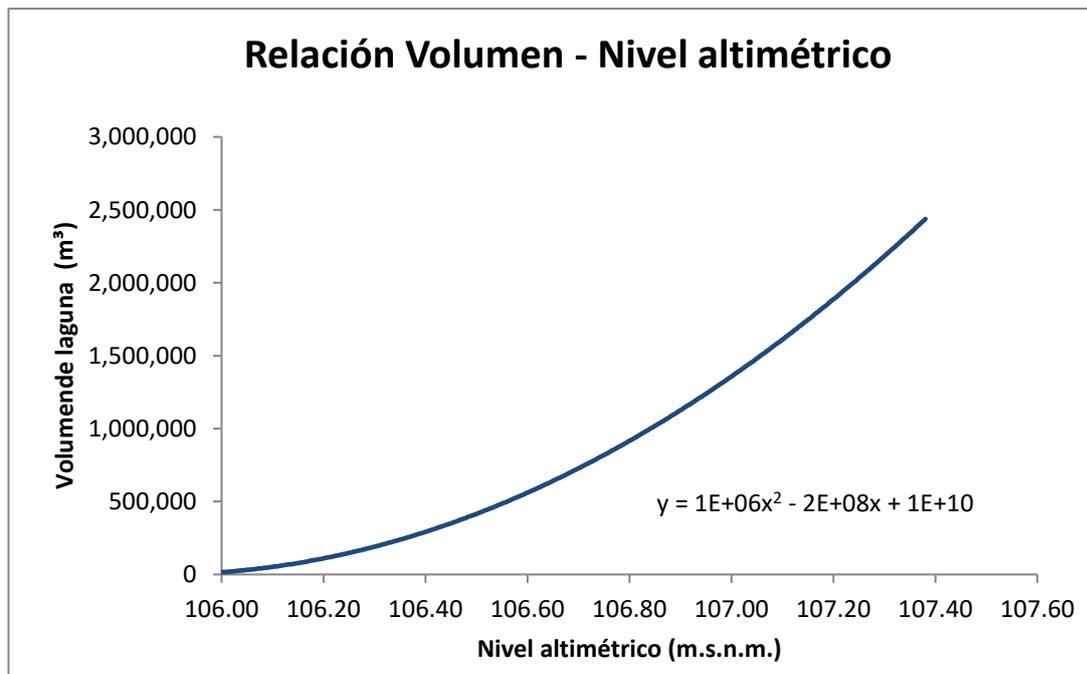


Figura B44: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°22.

## Laguna N°23

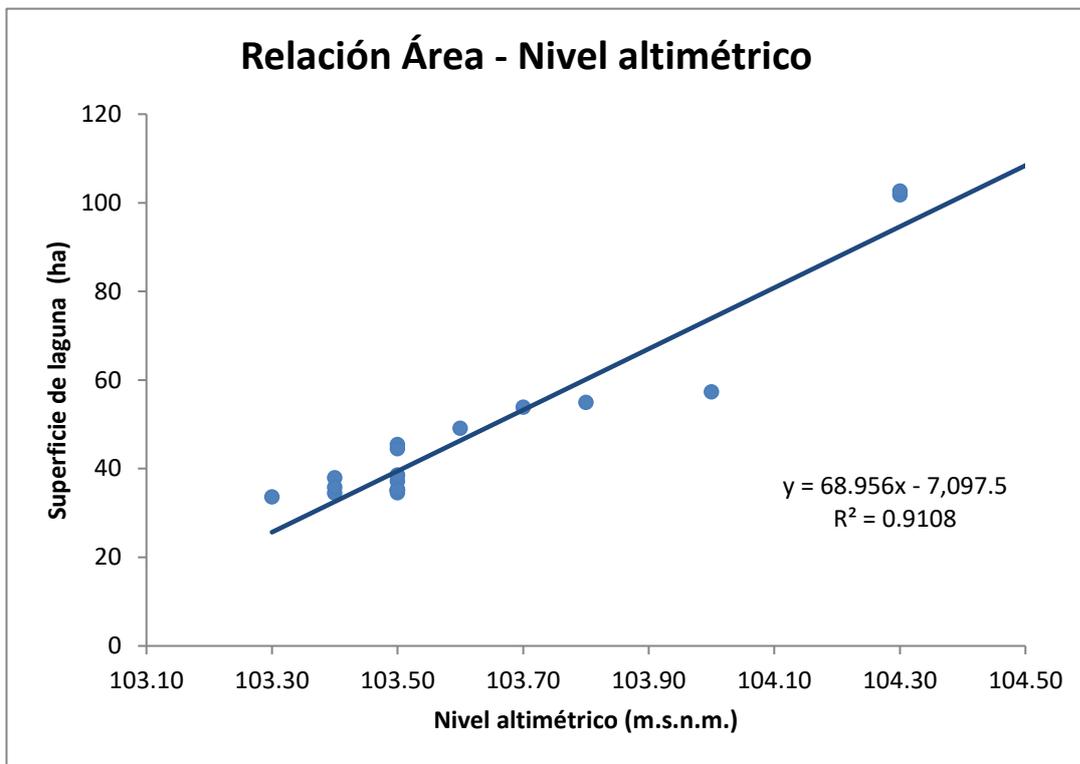


Figura B45: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°23.

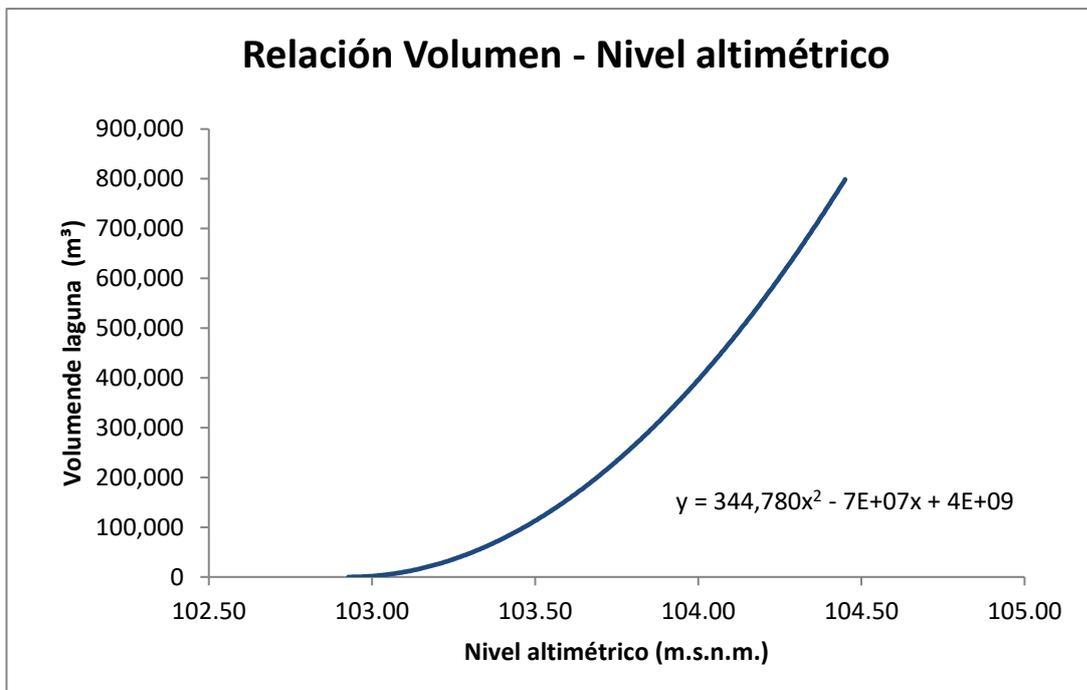


Figura B46: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°23

## Laguna N°24

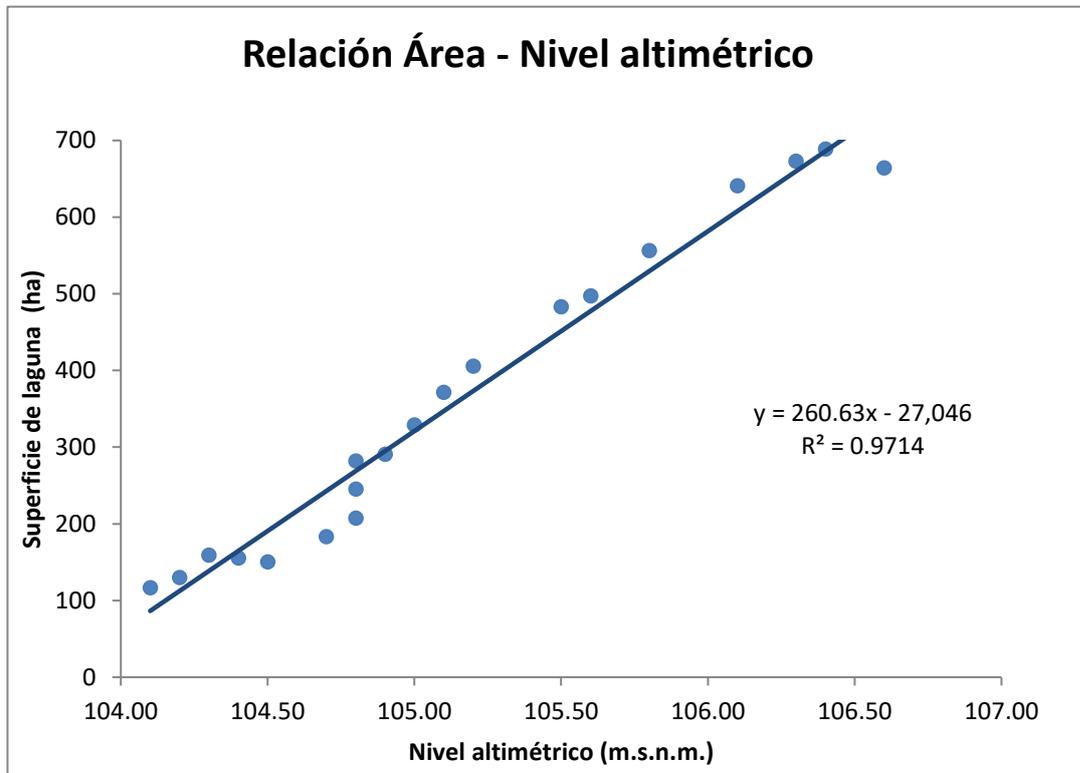


Figura B47: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°24.

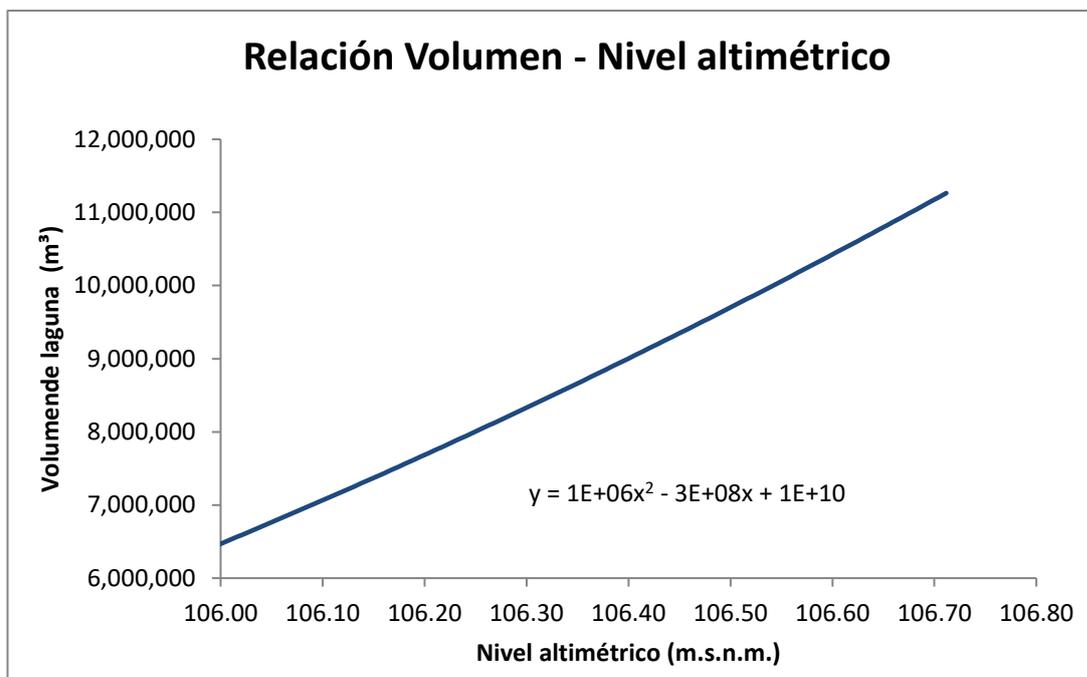


Figura B48: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°24.

## Laguna N°25

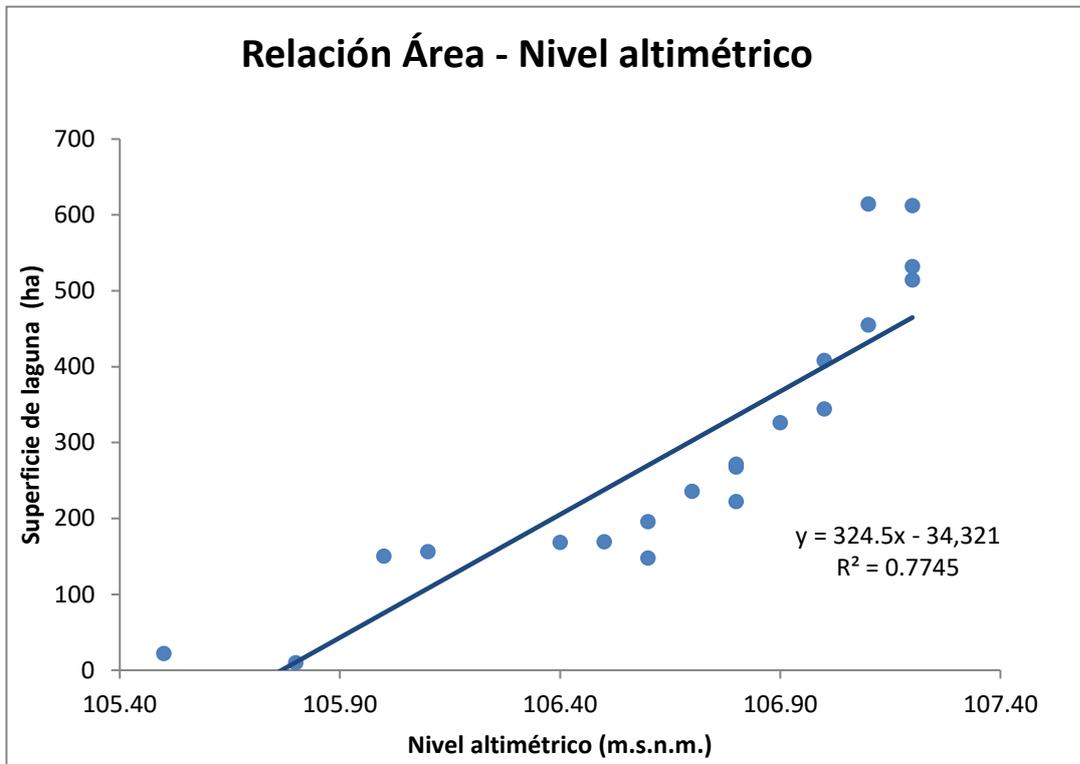


Figura B49: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°25.

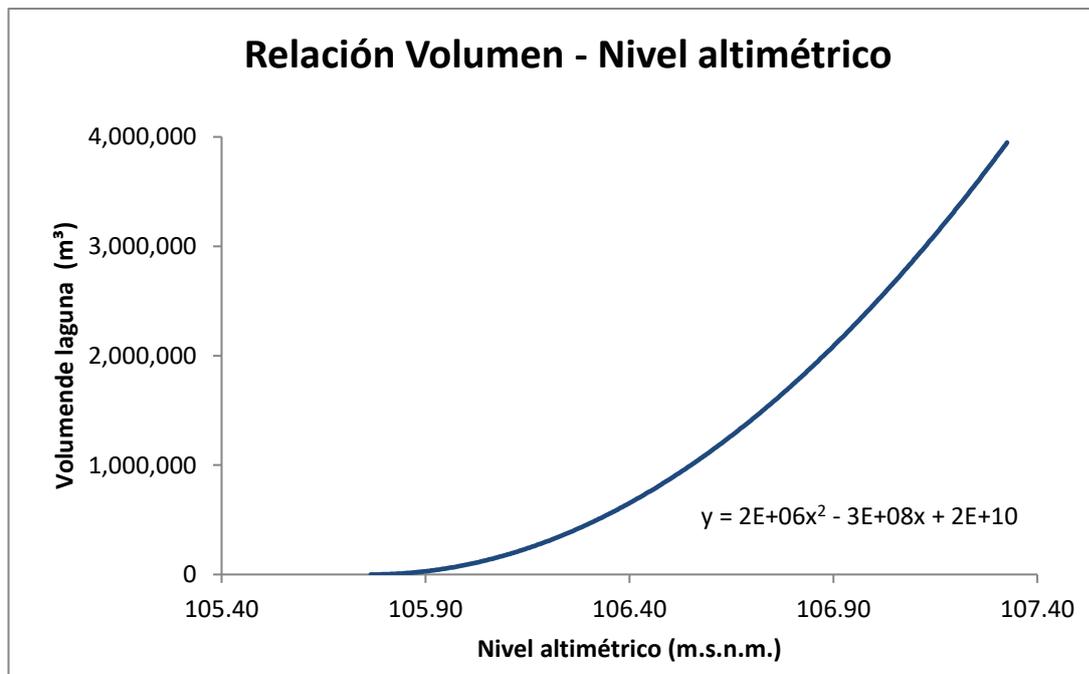


Figura B50: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°25.

## Laguna N°26

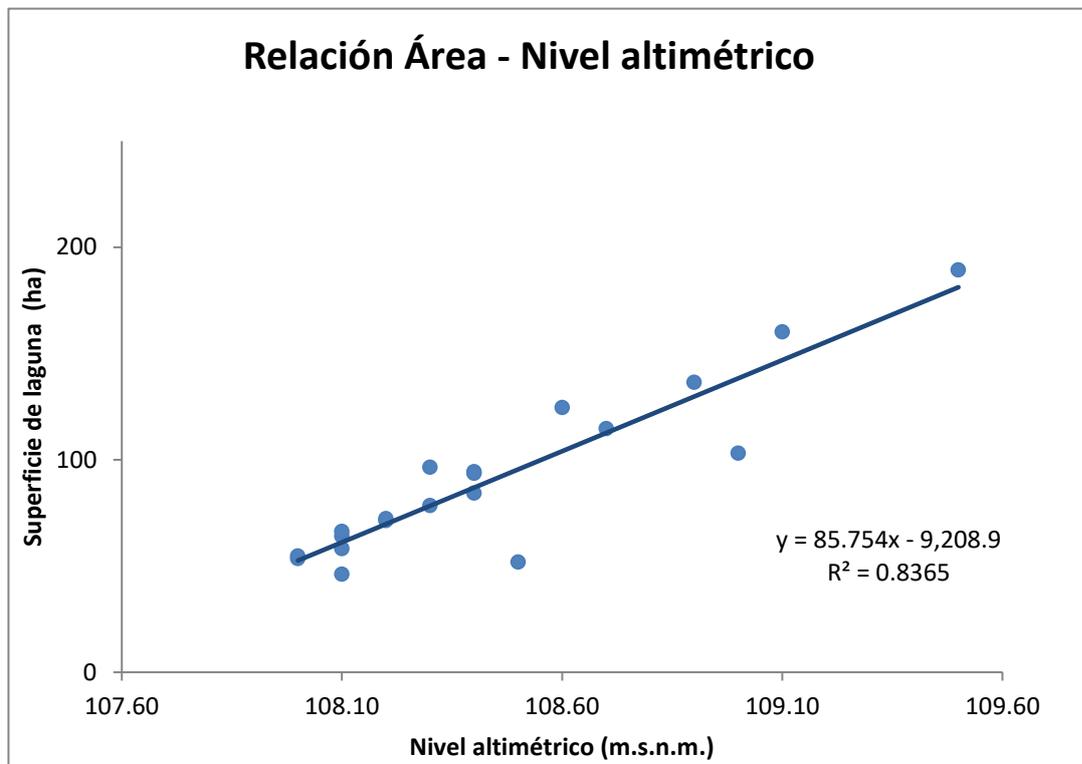


Figura B51: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°26.

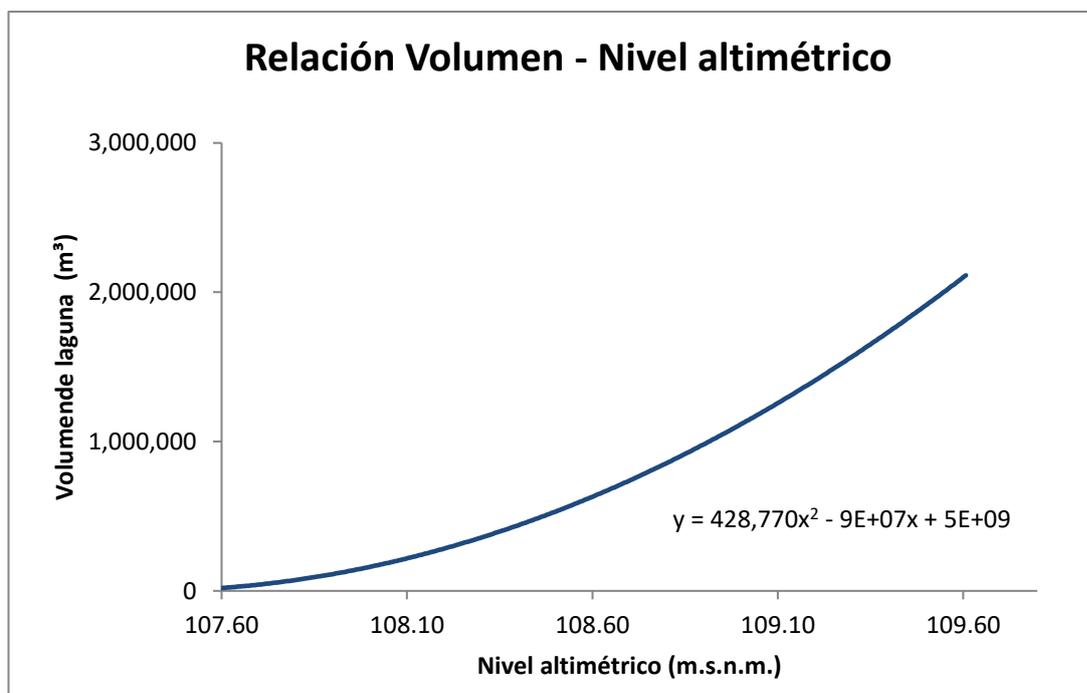


Figura B52: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°26.

## Laguna N°27

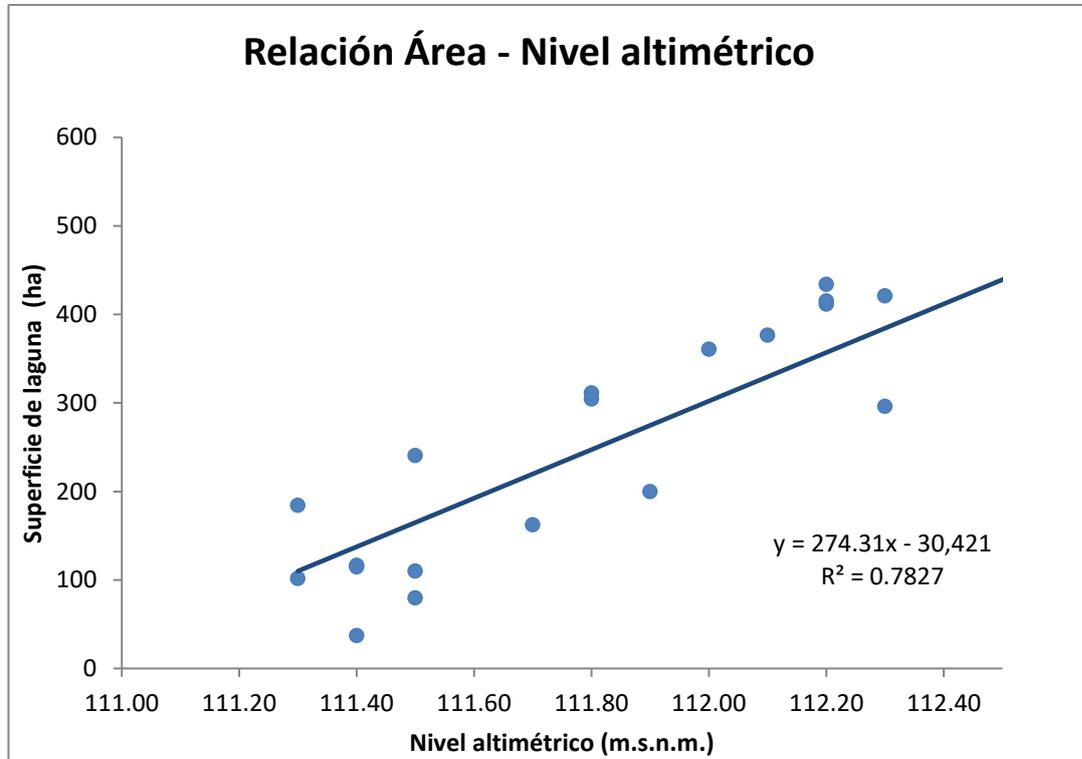


Figura B53: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°27.

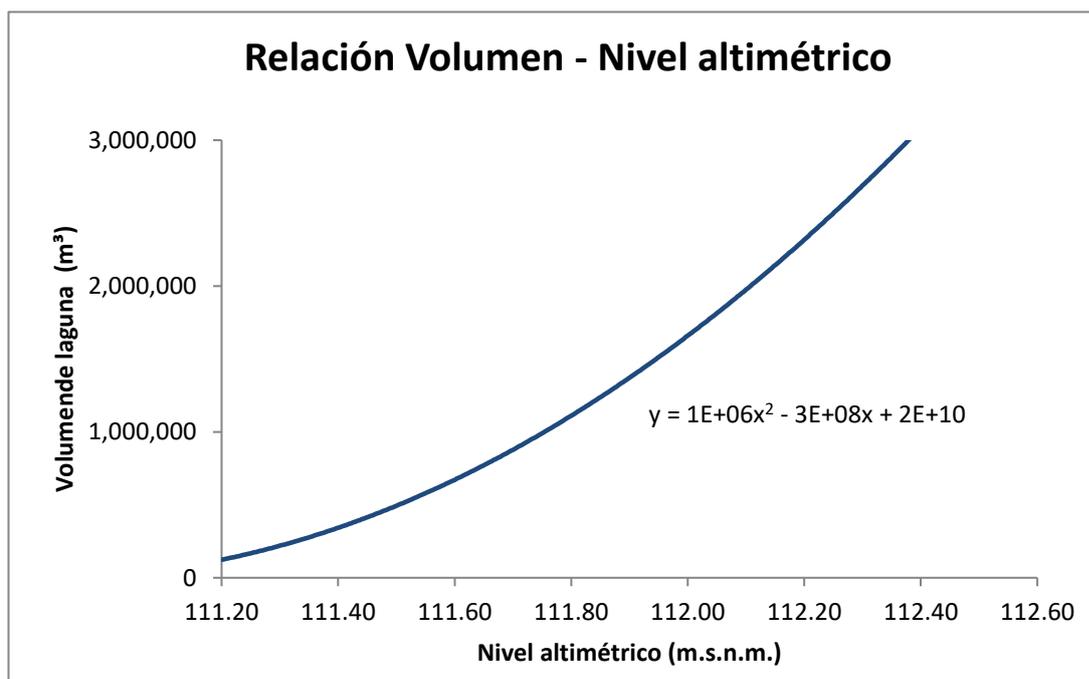


Figura B54: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°27.

## Laguna N°28

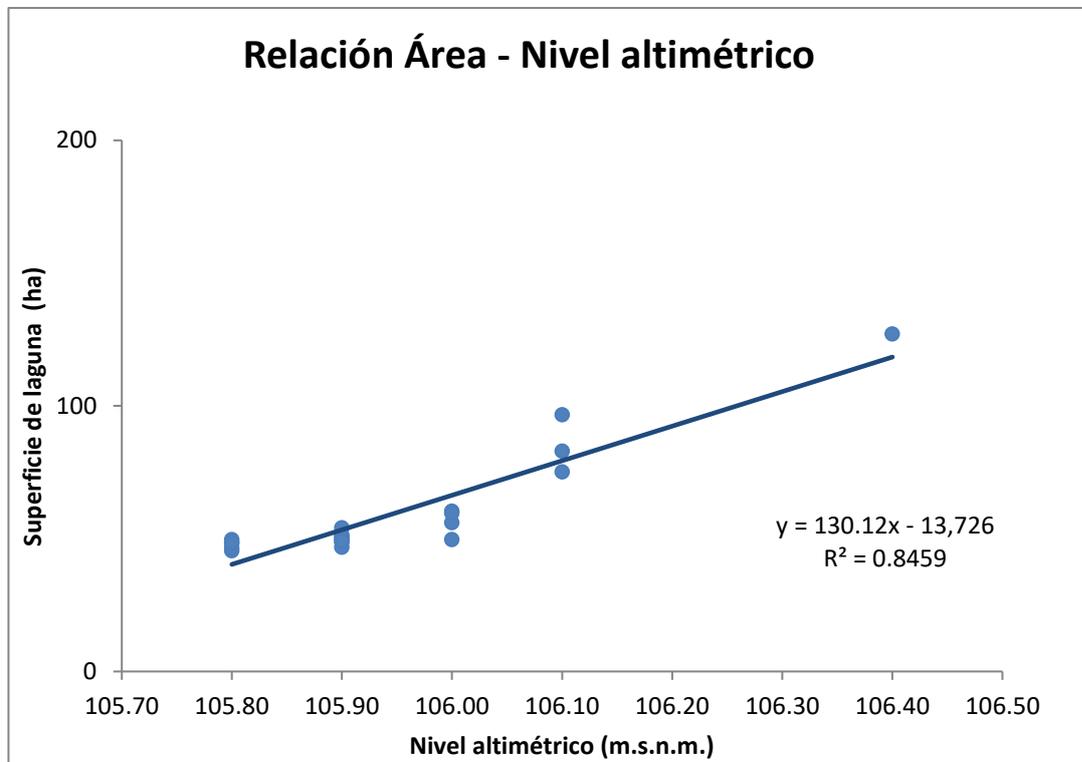


Figura B55: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°28.

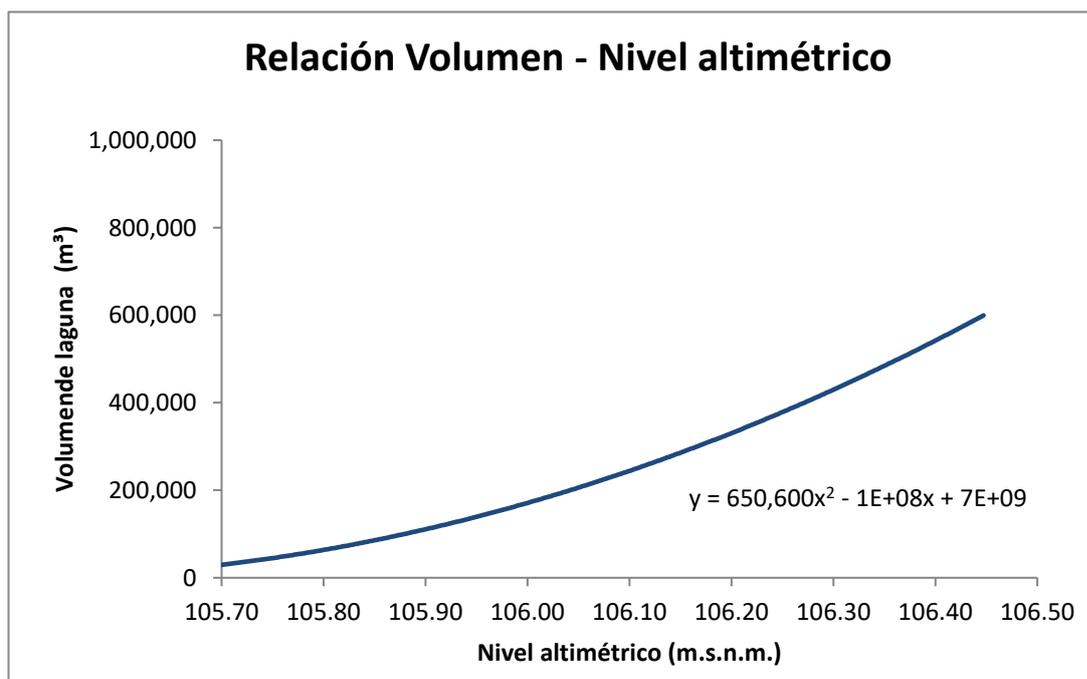


Figura B56: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°28.

## Laguna N°29

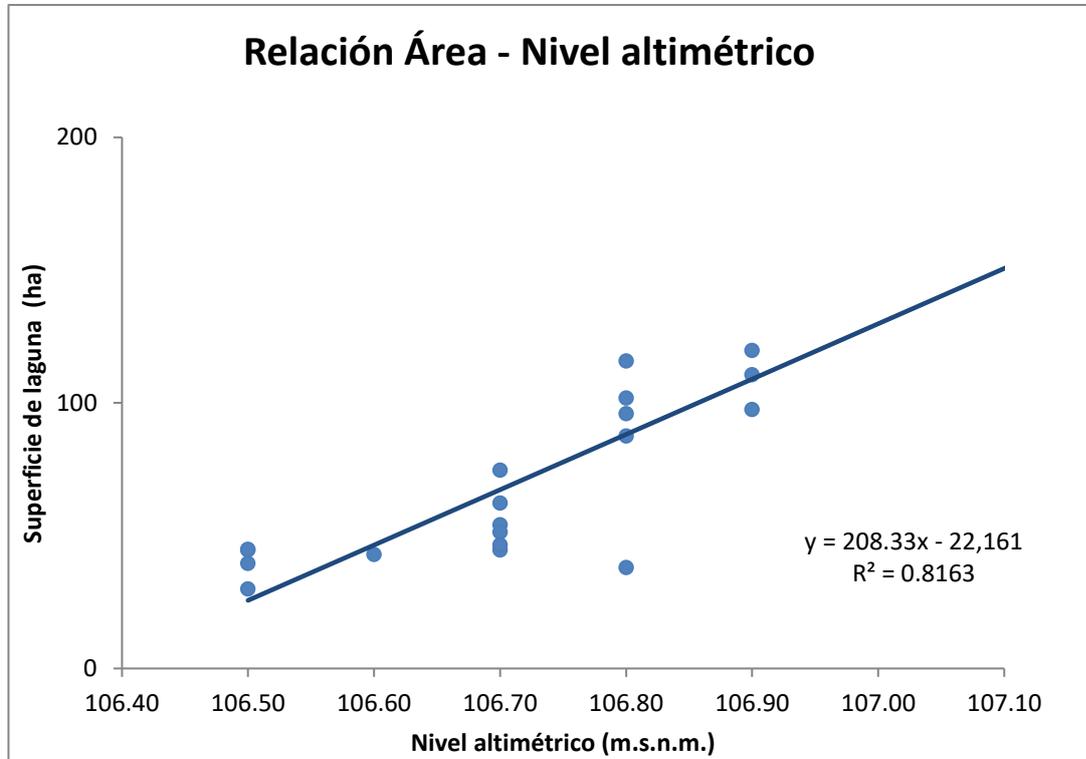


Figura B57: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°29.

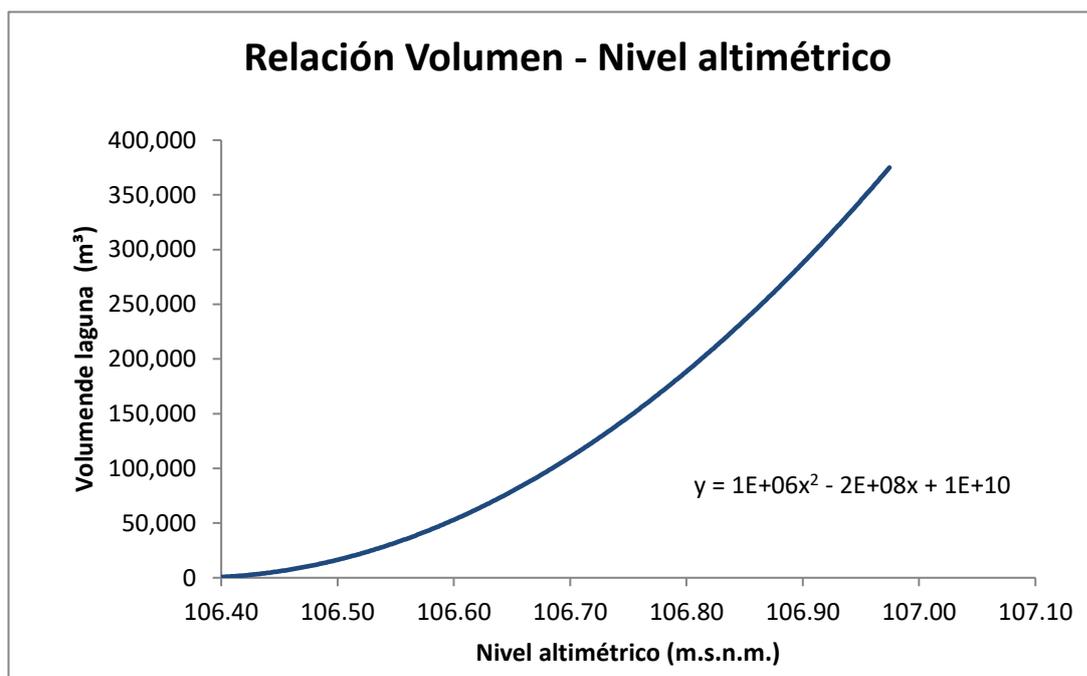
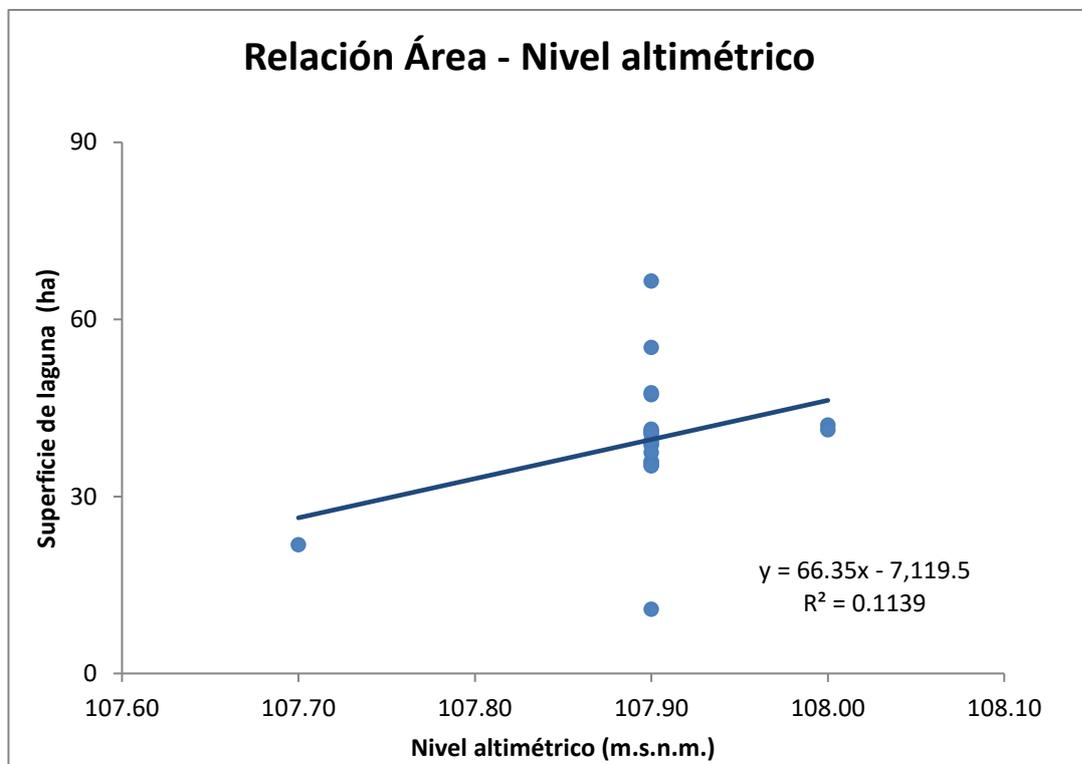


Figura B57: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°29.

## Laguna N°30



**Figura B59:** Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°30.

## Laguna N°31

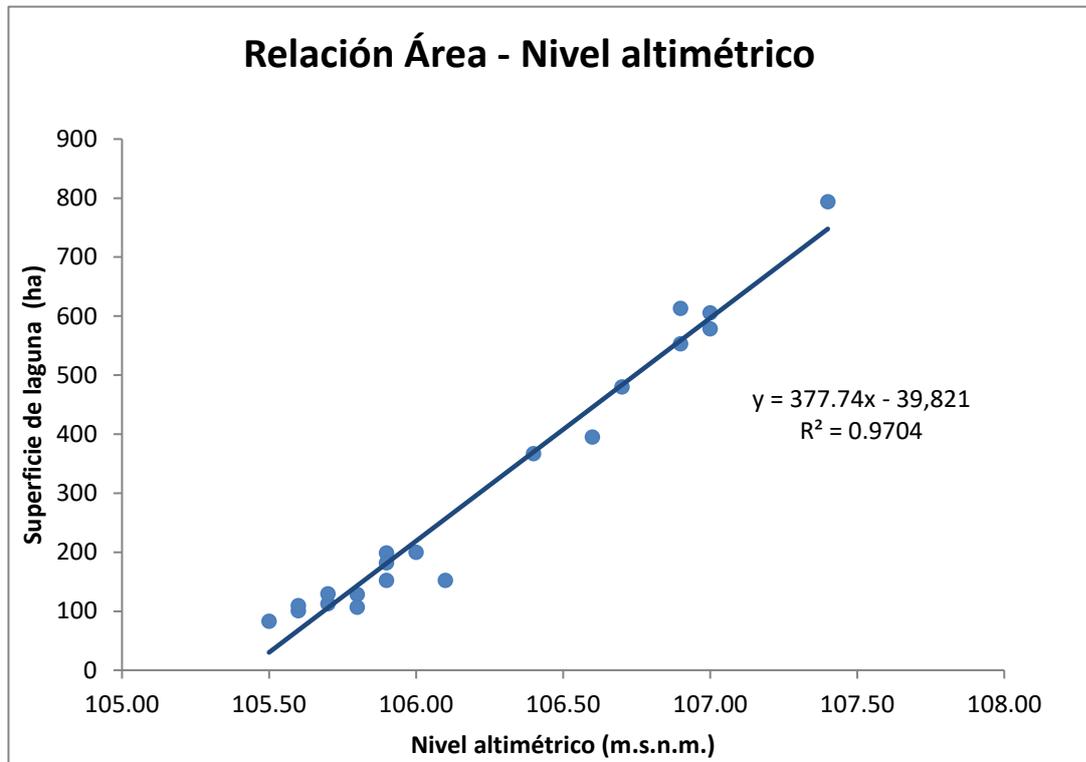


Figura B60: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°31.

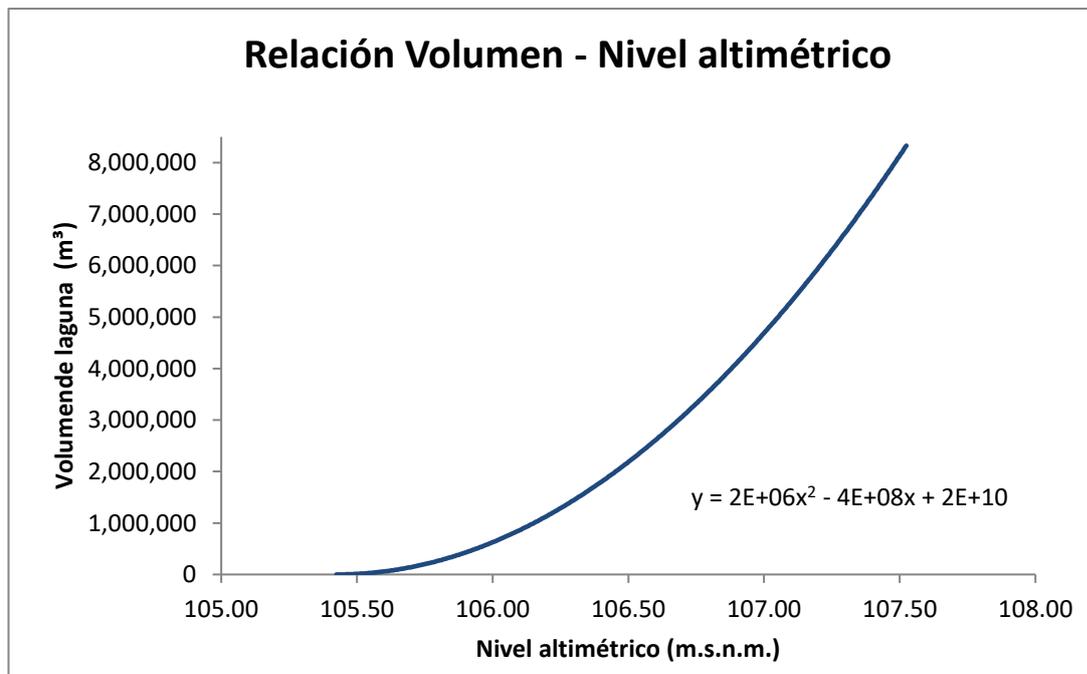


Figura B61: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°31.

## Laguna N°32

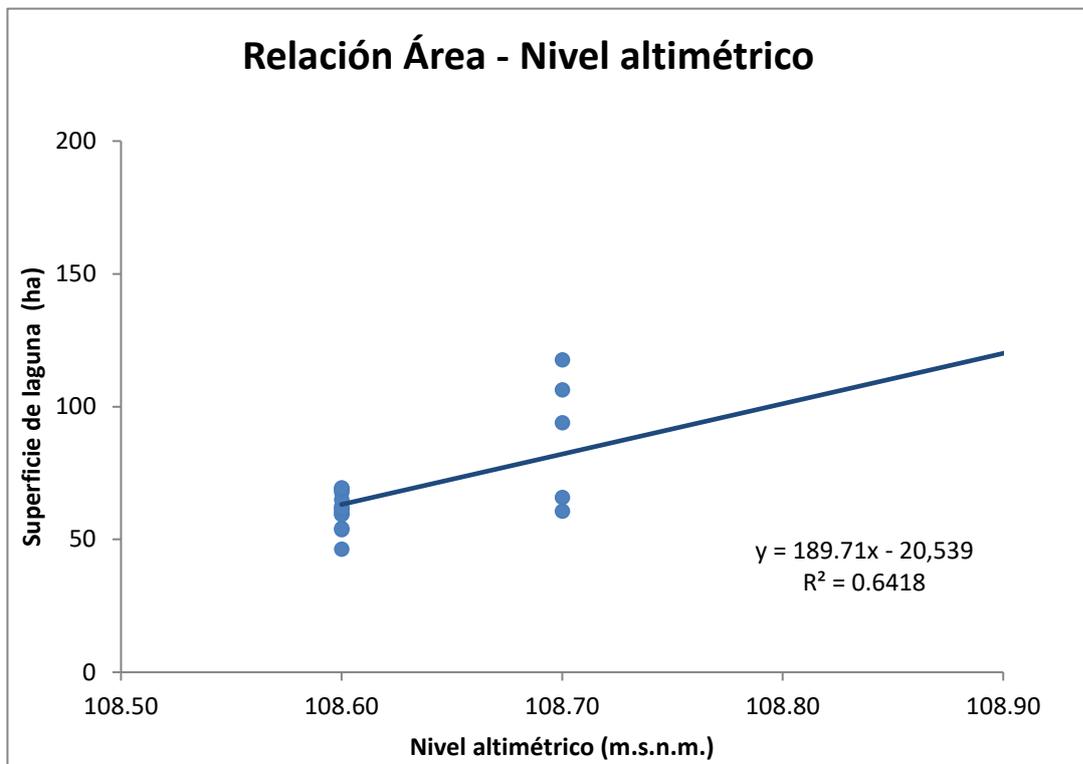


Figura B62: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°32.

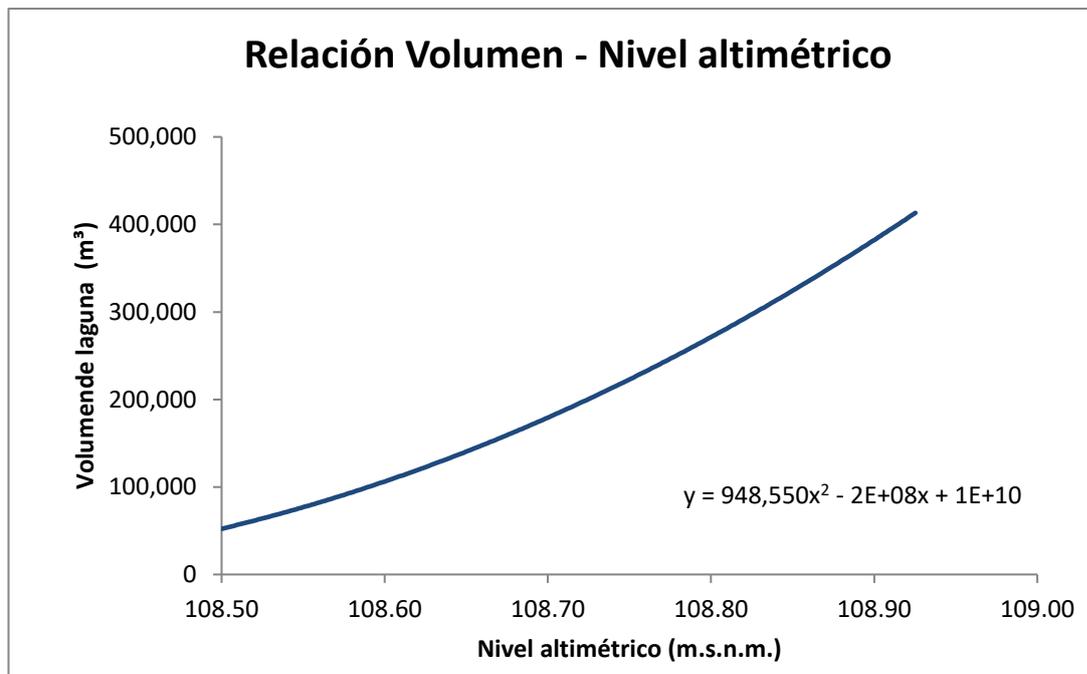


Figura B63: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°32.

## Laguna N°33

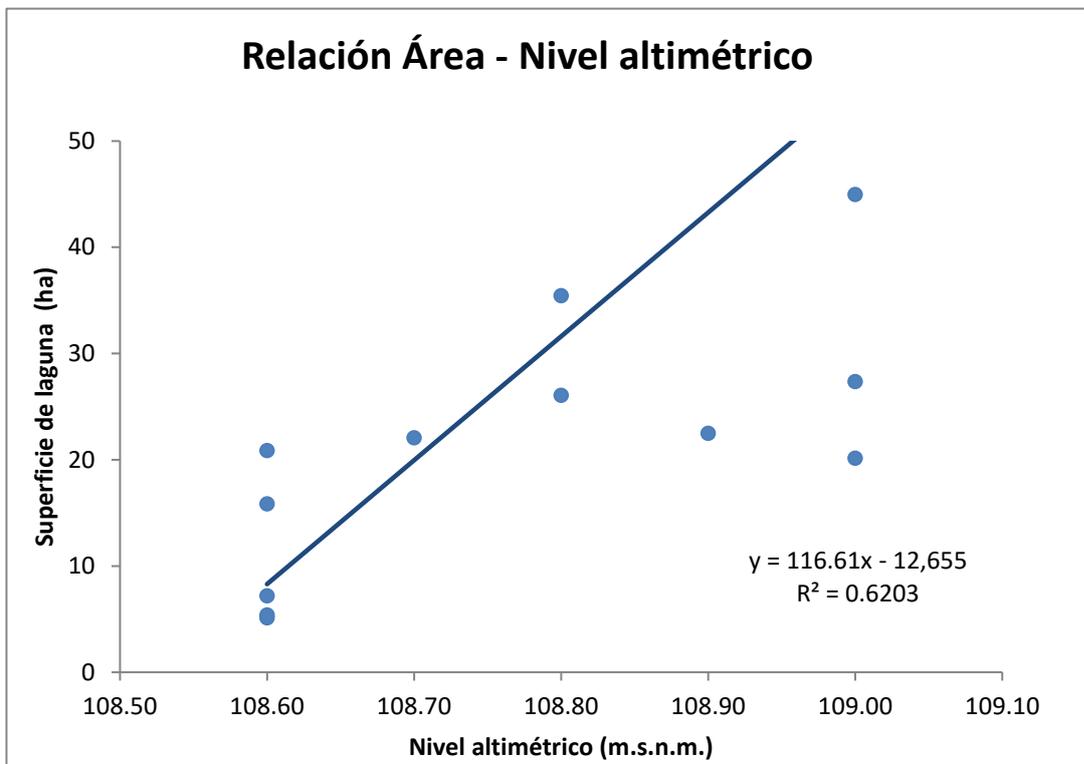


Figura B64: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°33.

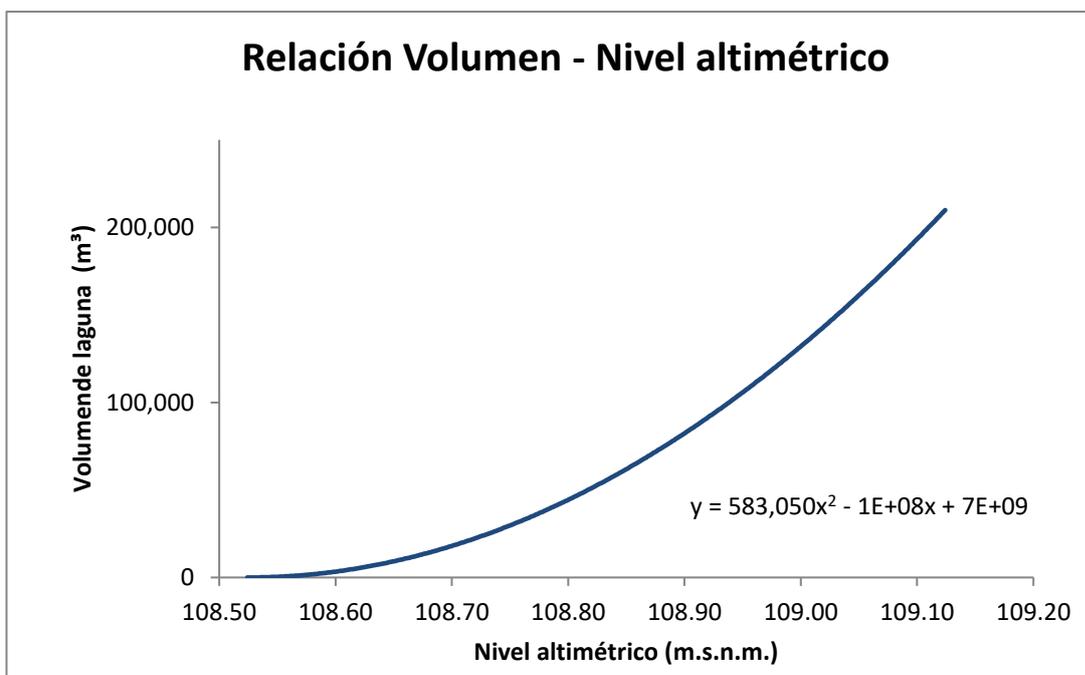


Figura B65: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°33.

## Laguna N°34

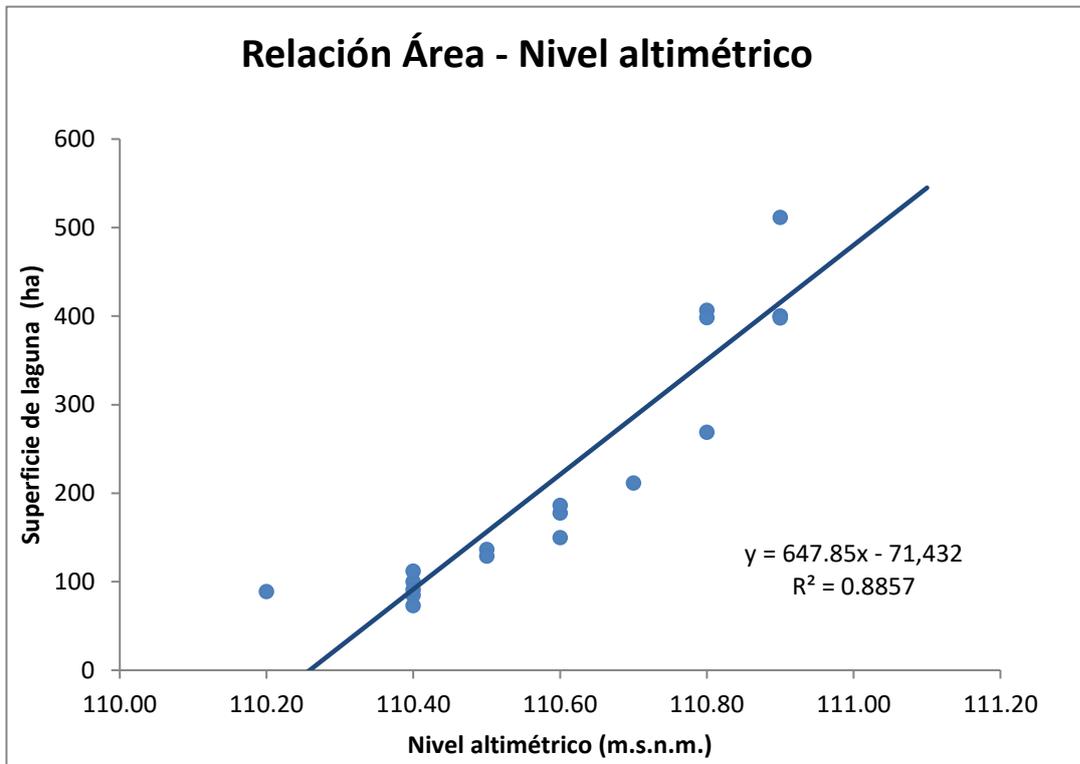


Figura B66: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°34.

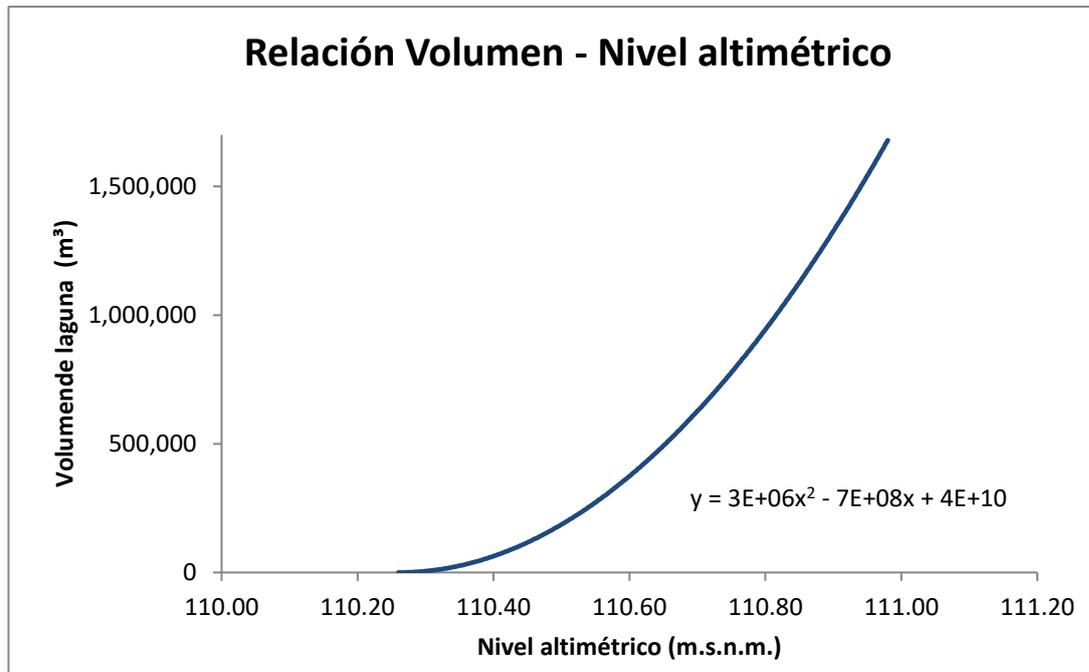


Figura B67: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°34.

## Laguna N°35

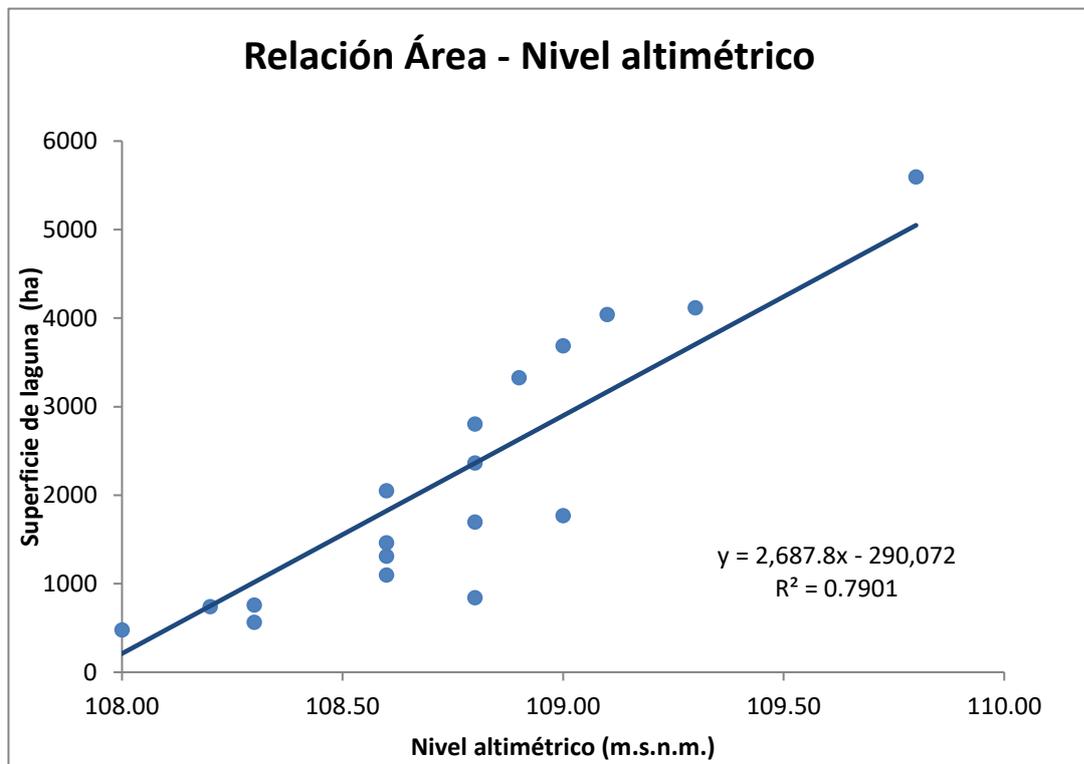


Figura B68: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°35.

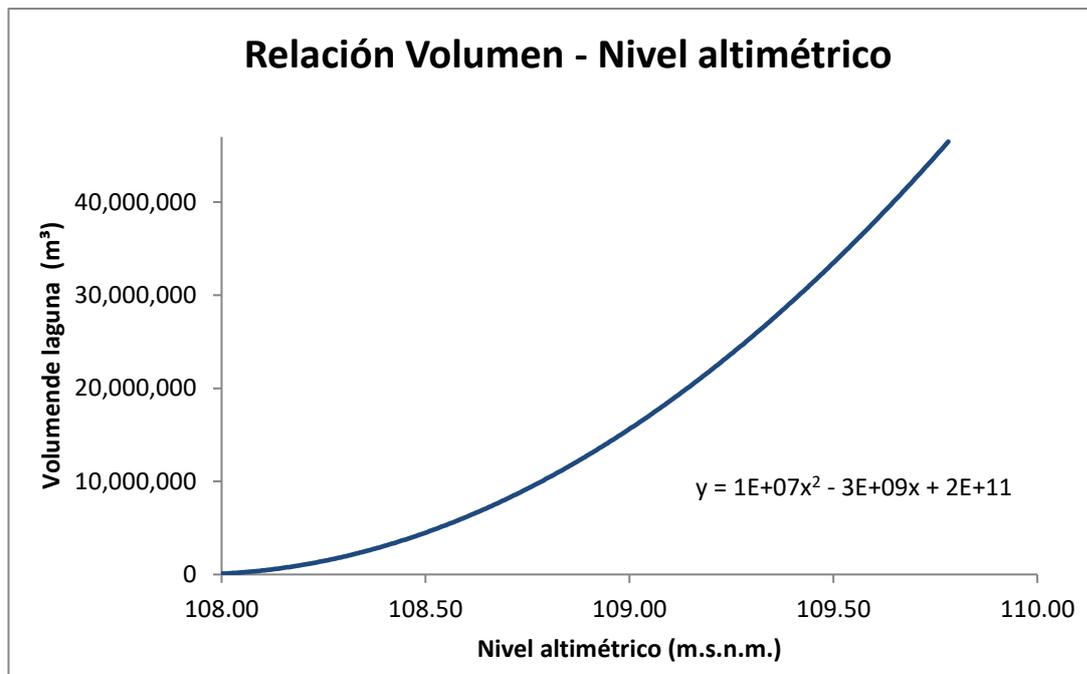
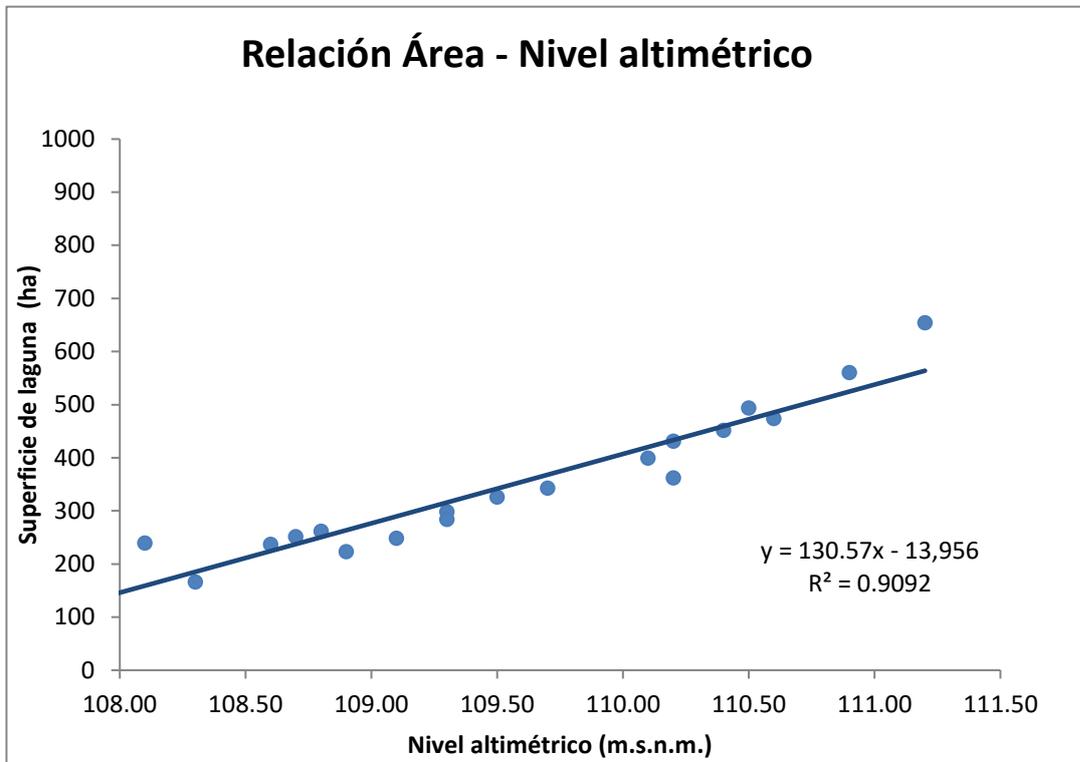
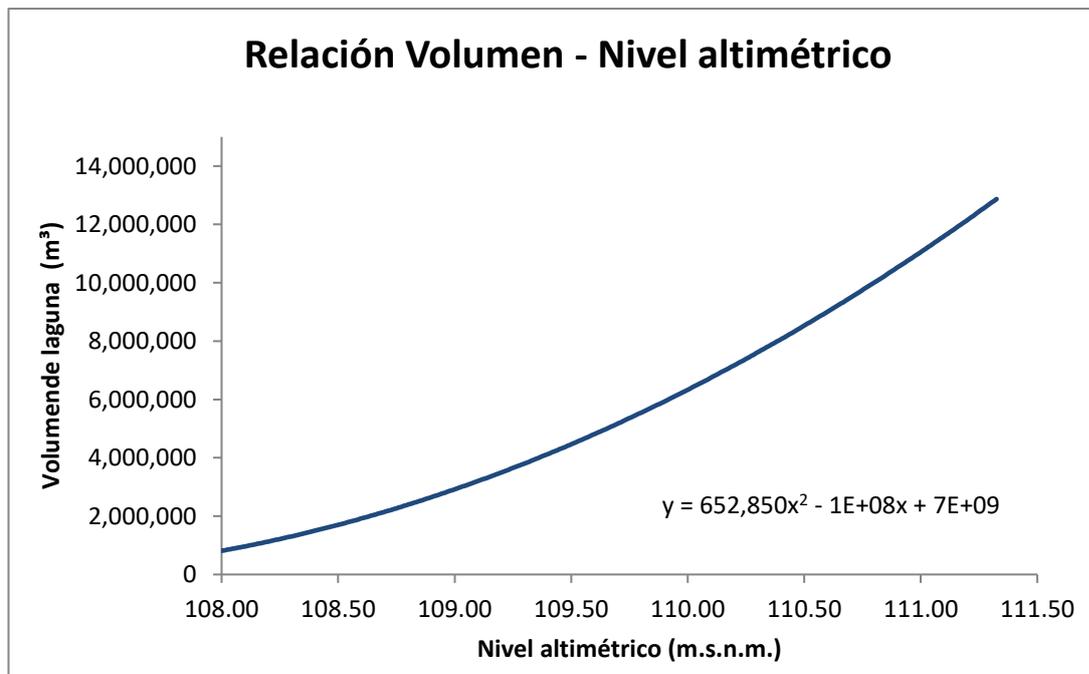


Figura B69: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°35.

## Laguna N°36

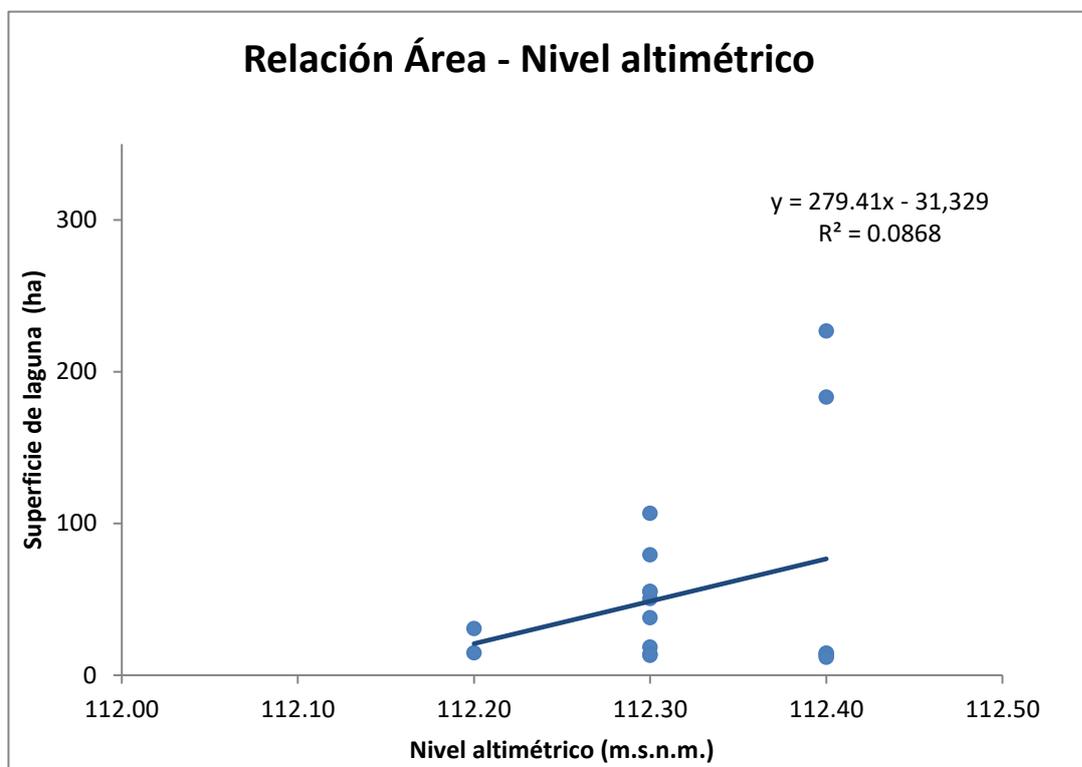


**Figura B70:** Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°36.



**Figura B71:** Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°36.

## Laguna N°37



**Figura B72:** Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°37.

## Laguna N°38

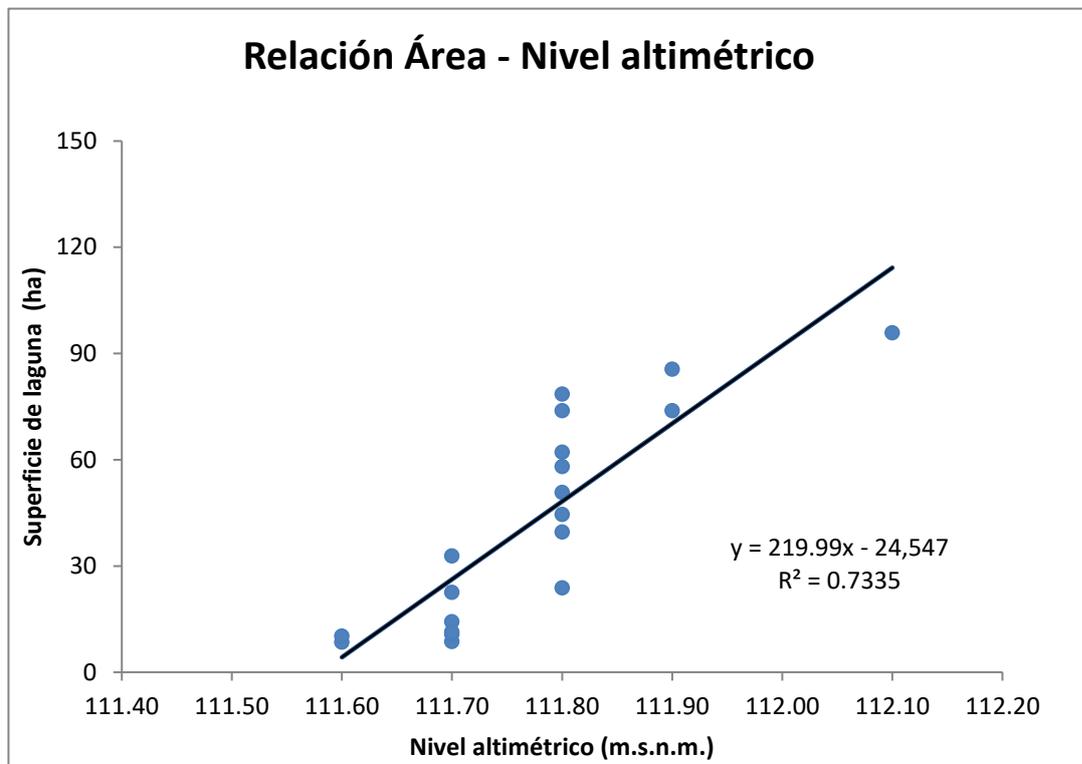


Figura B73: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°38.

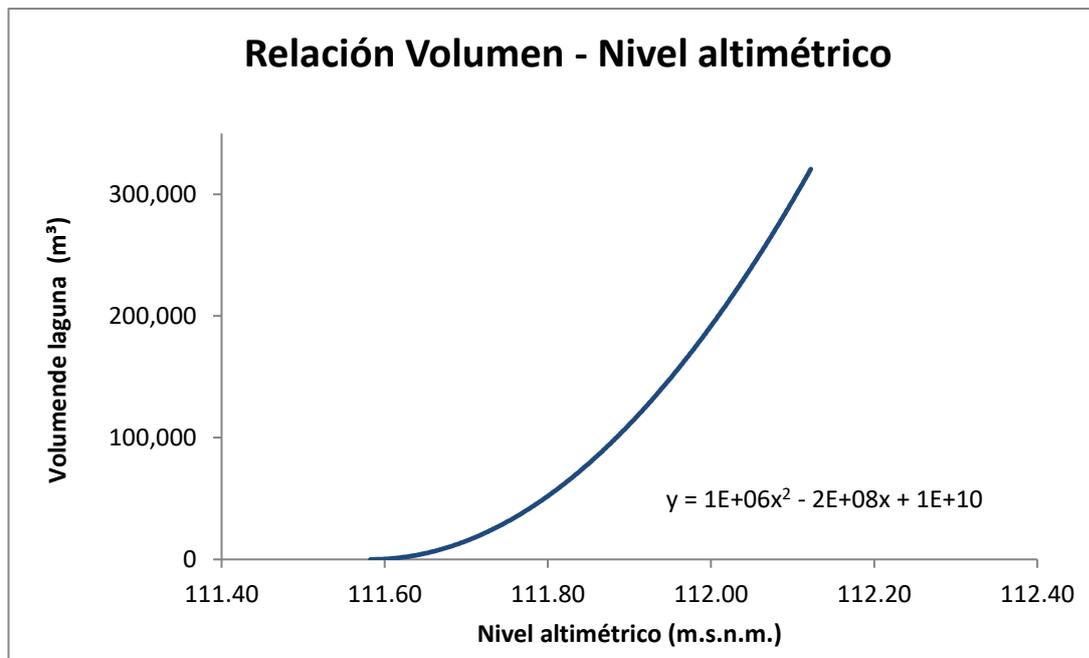


Figura B74: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°38.

## Laguna N°39

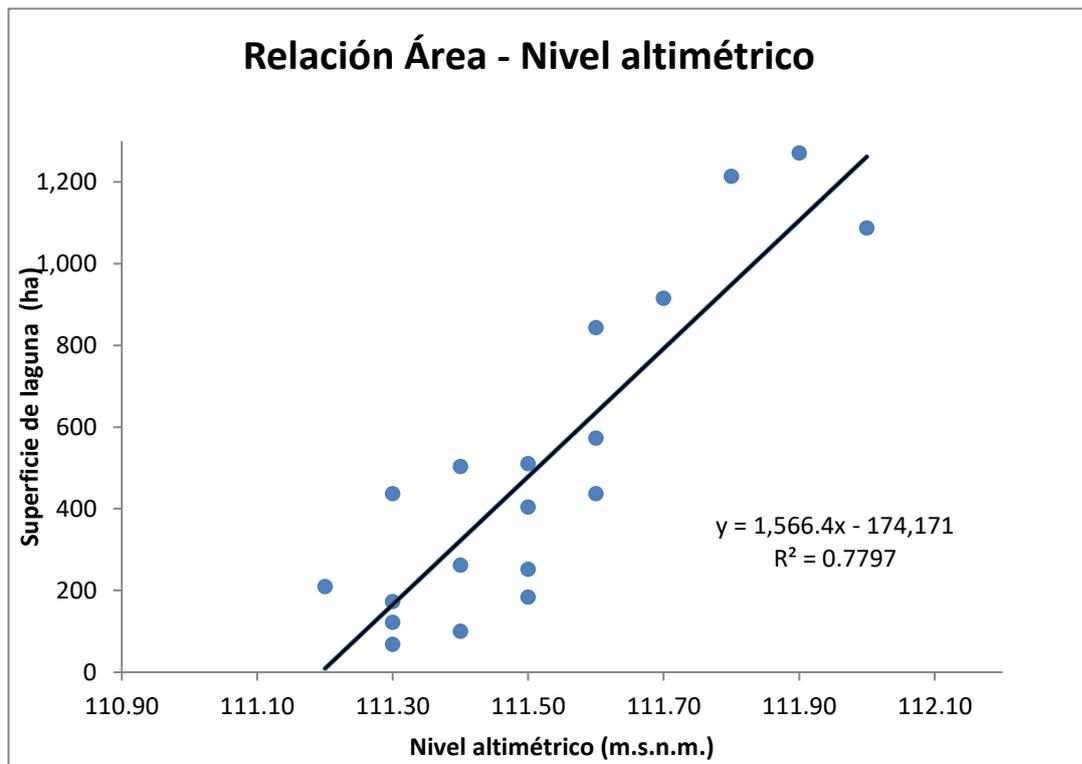


Figura B75: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°39.

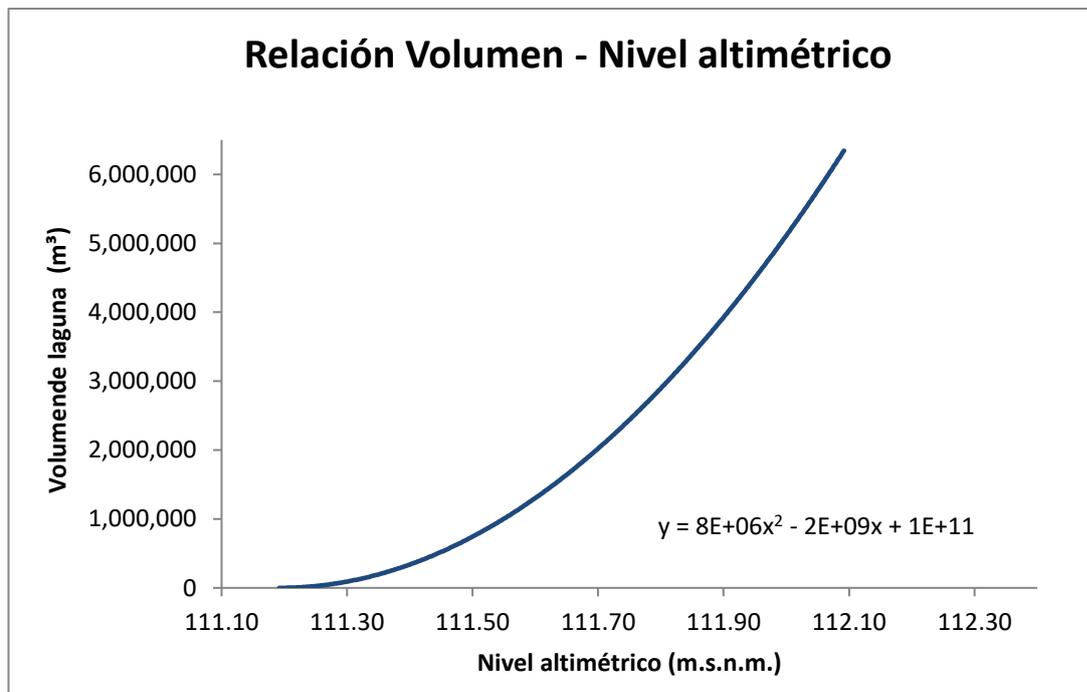


Figura B76: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°39.

## Laguna N°40

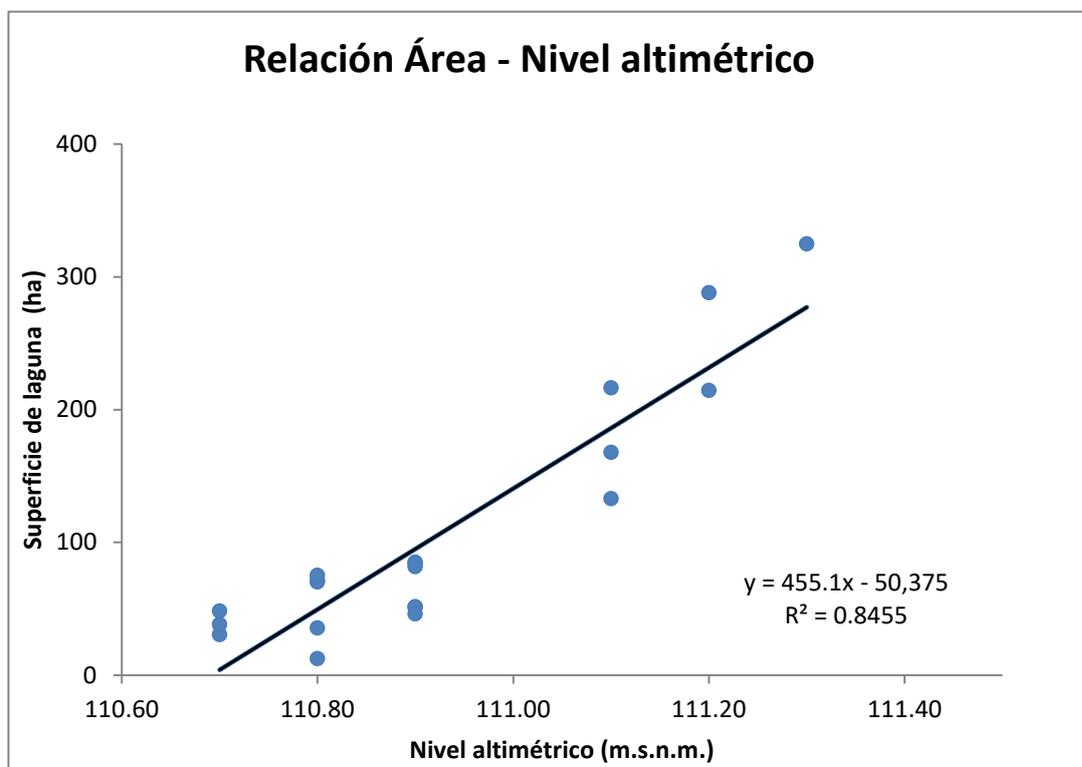


Figura B77: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°40.

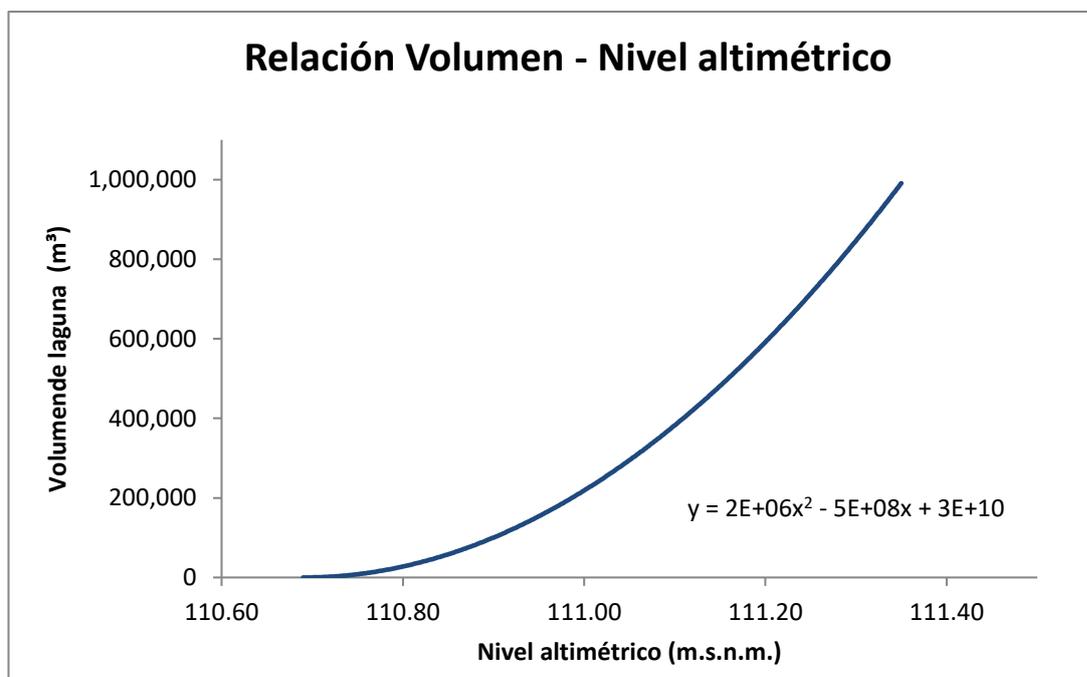


Figura B78: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°40.

## Laguna N°41

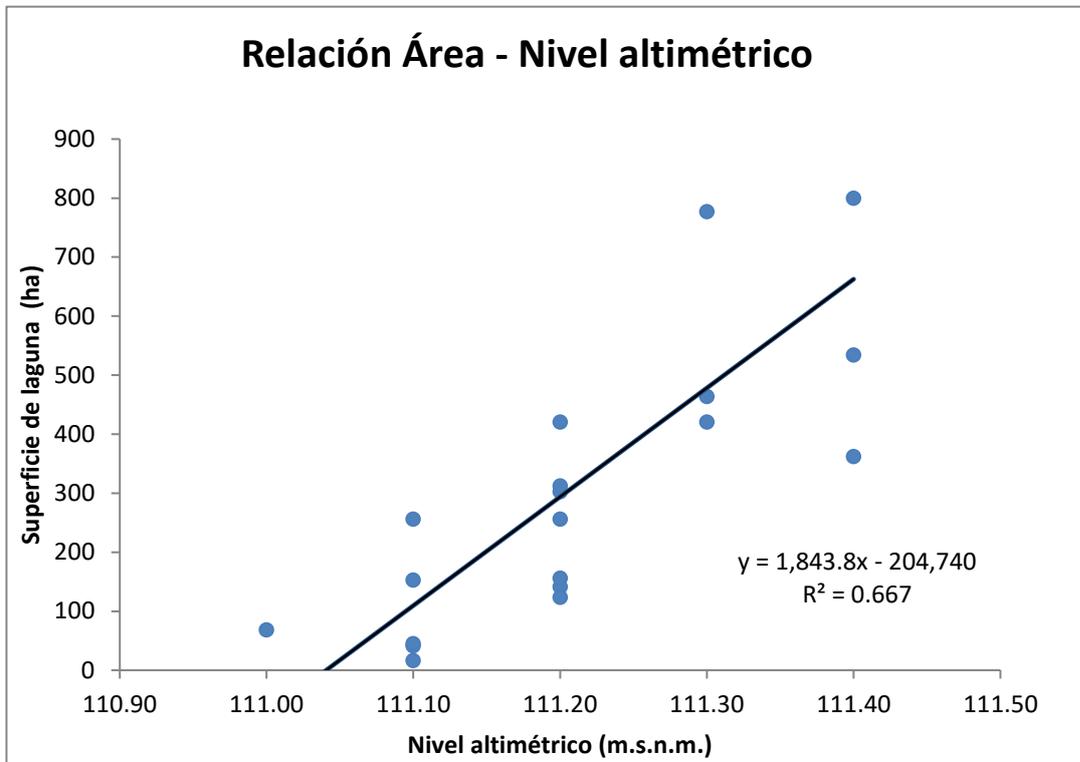


Figura B79: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°41.

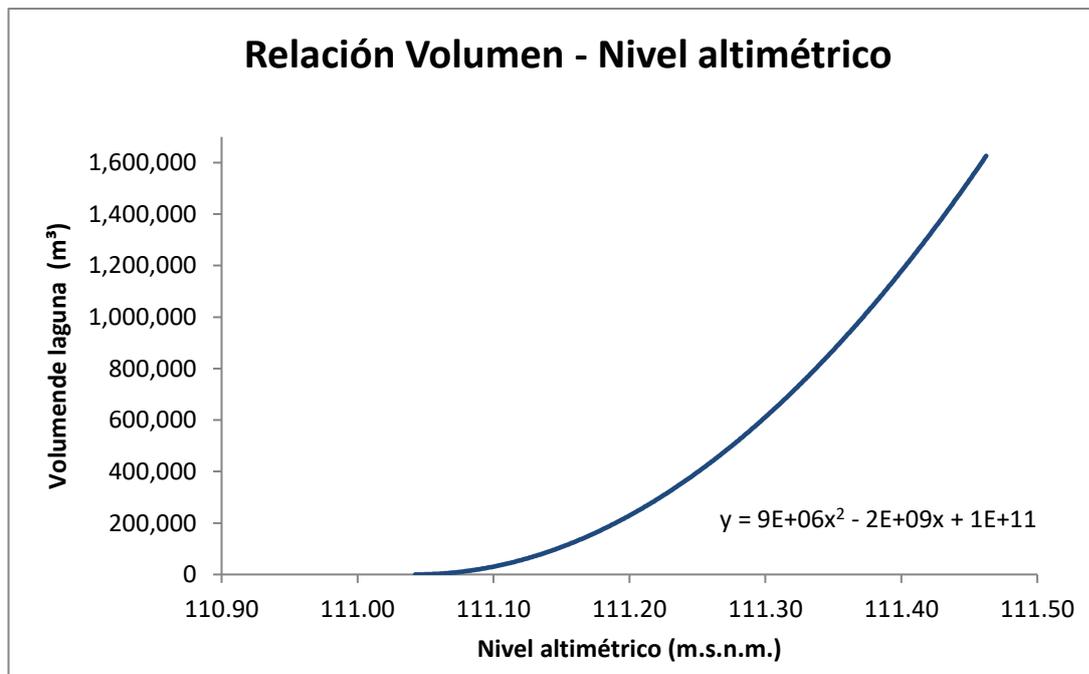


Figura B80: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°41.

## Laguna N°42

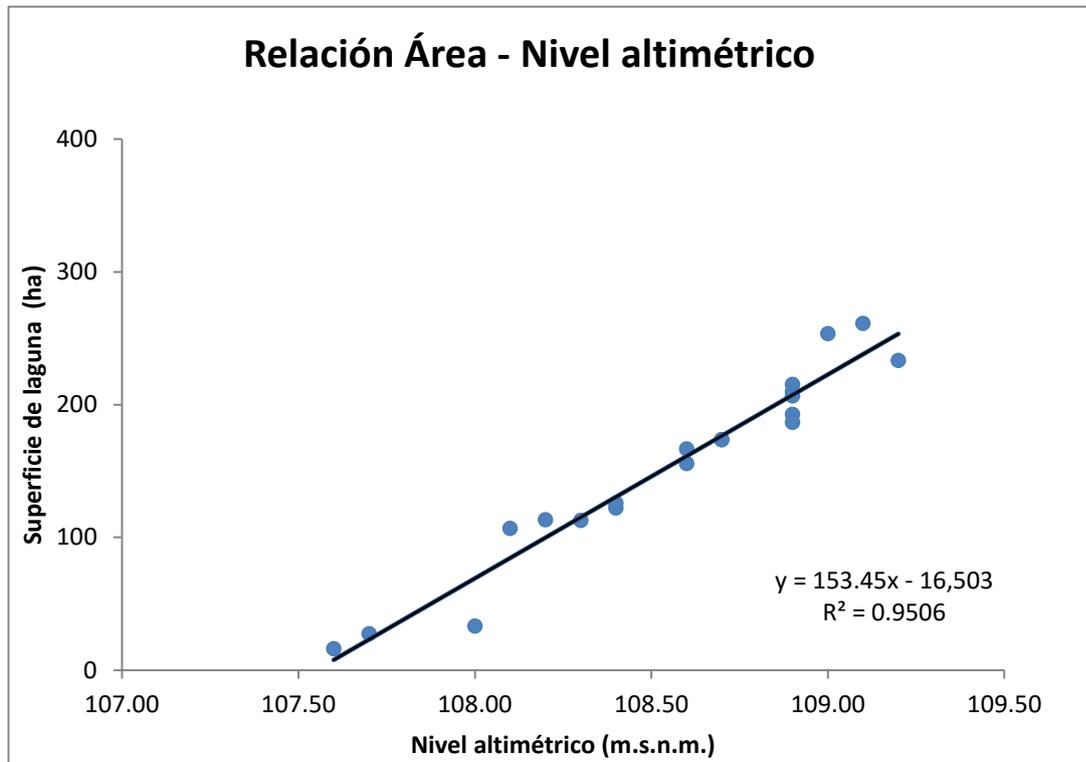


Figura B81: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°42.

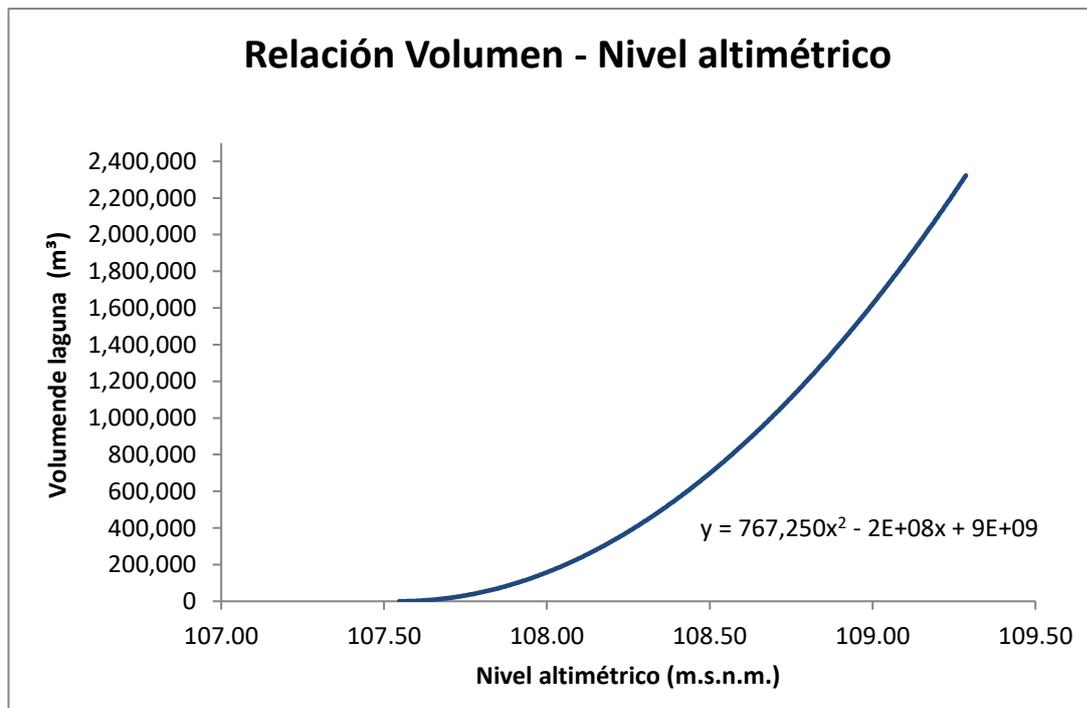
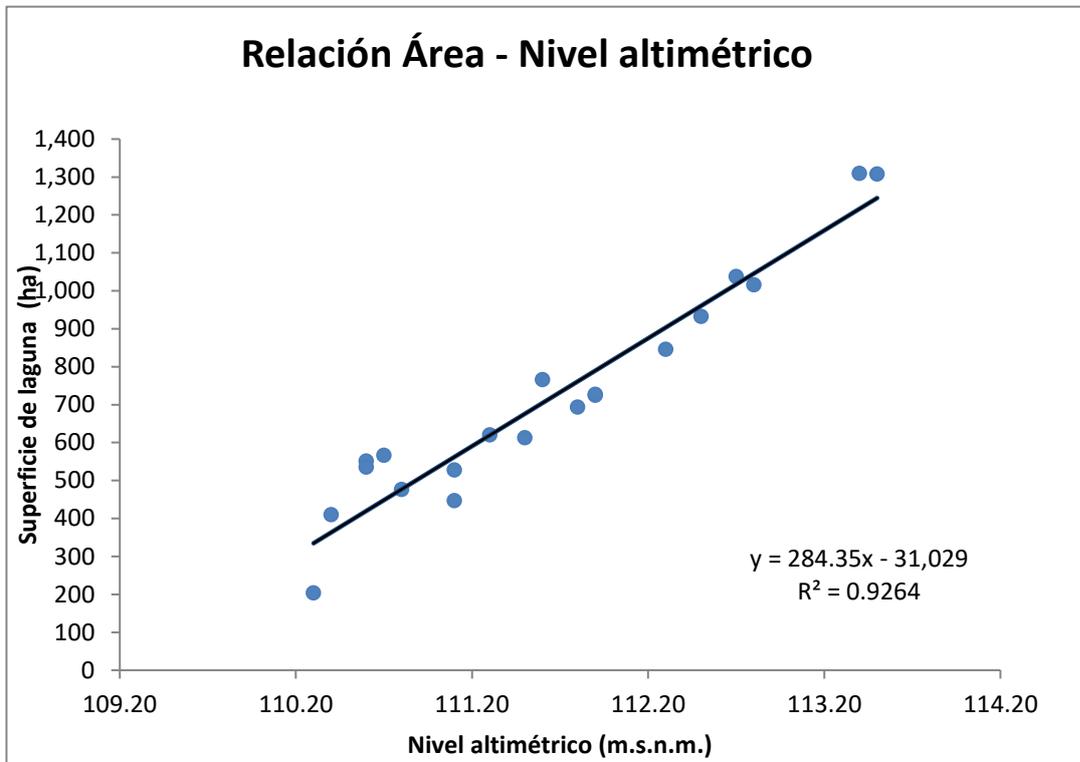
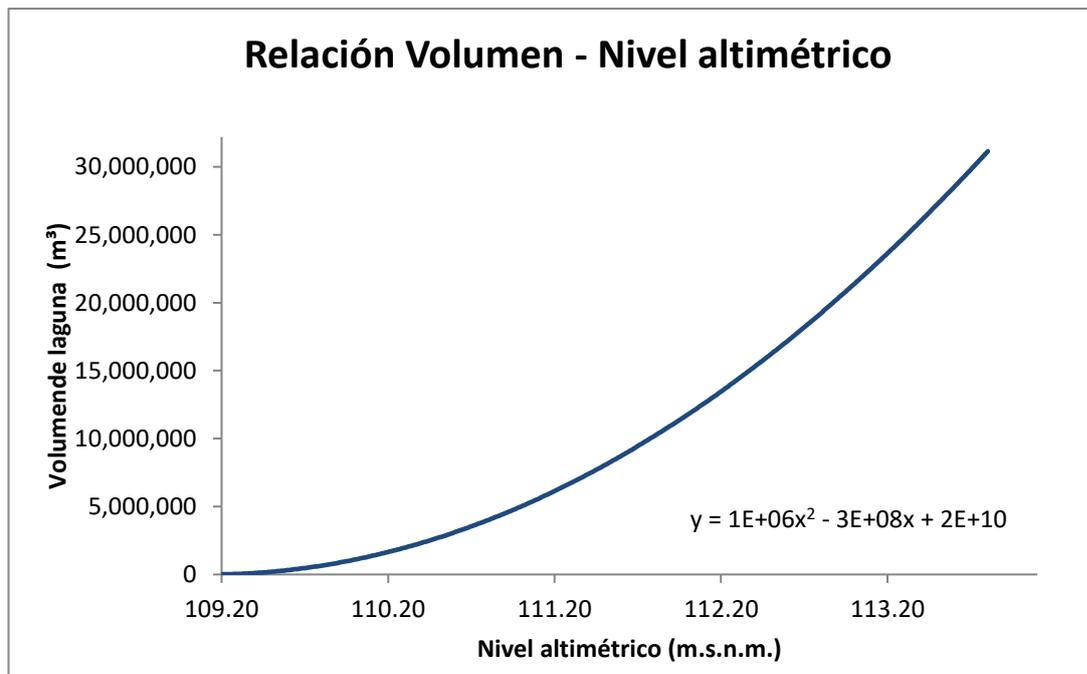


Figura B82: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°42.

## Laguna N°43



**Figura B83:** Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°43.



**Figura B84:** Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°43.

## Laguna N°44

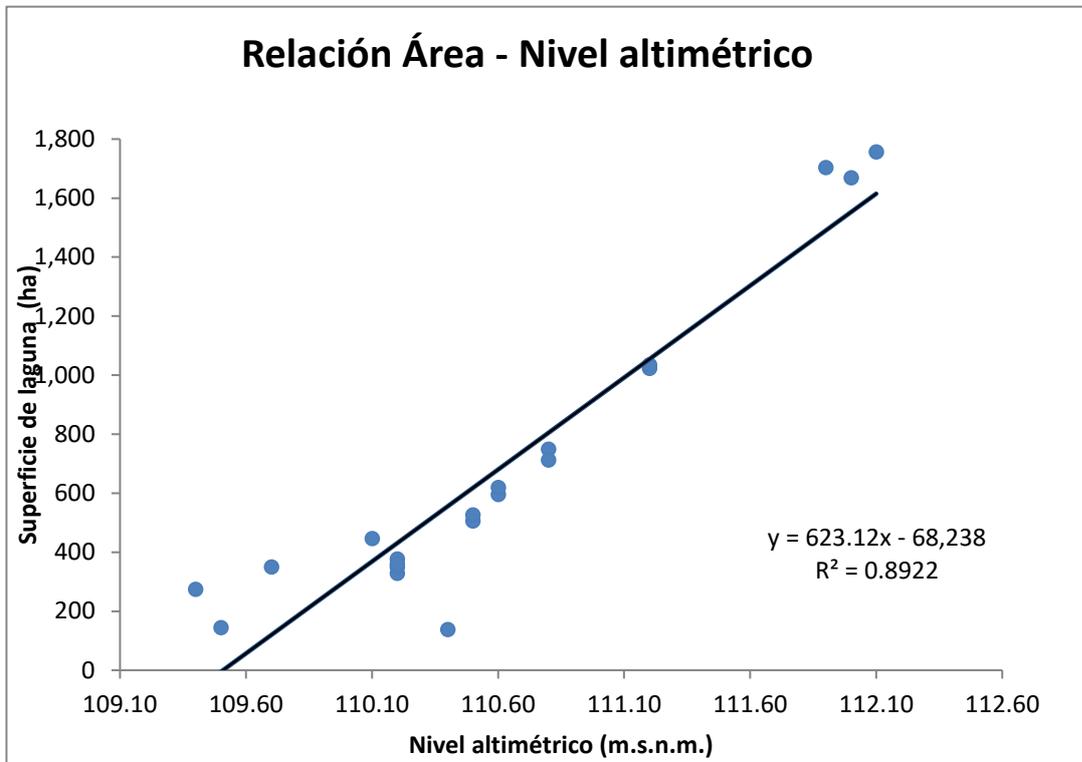


Figura B85: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°44.

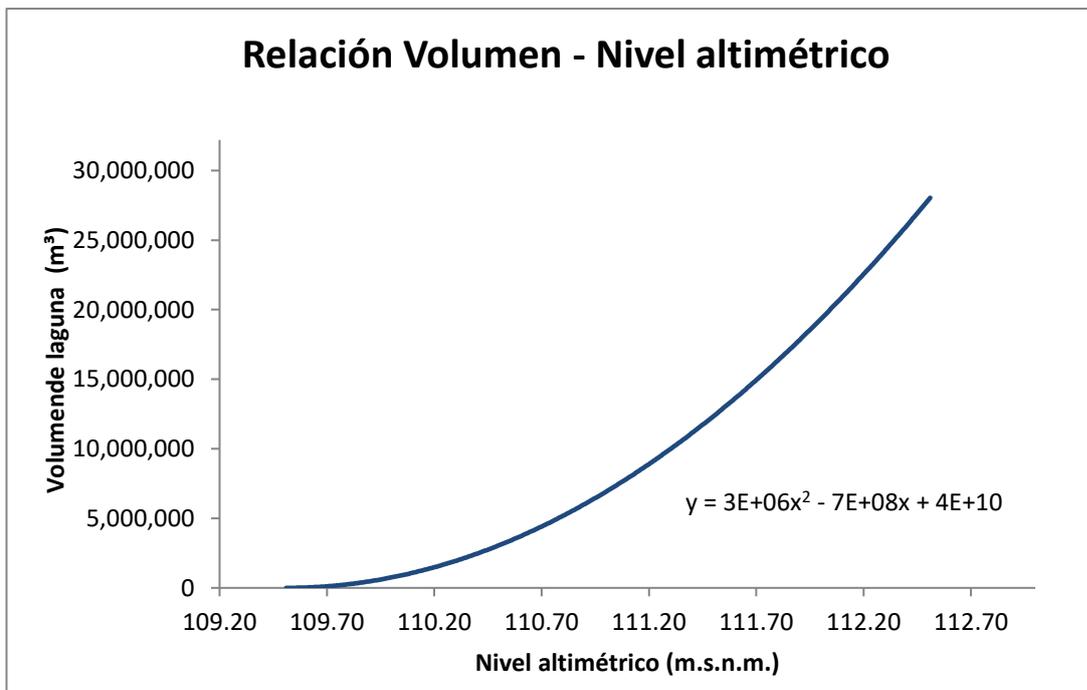


Figura B86: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°44.

## Laguna N°45

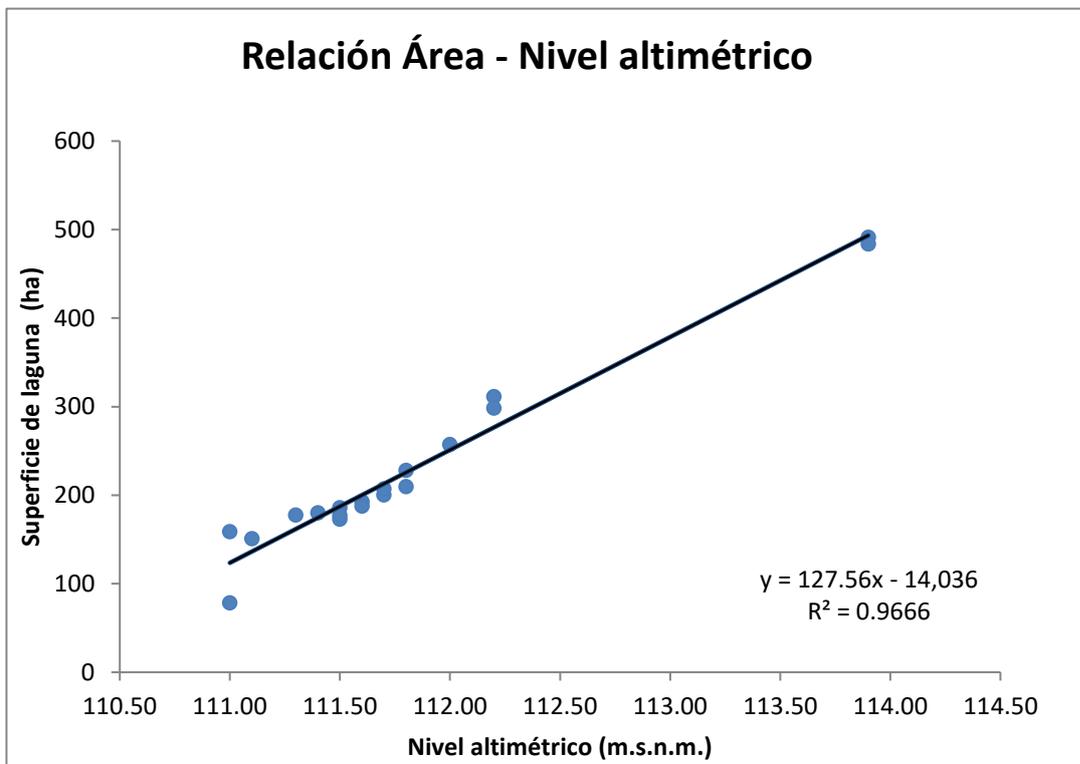


Figura B87: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°45.

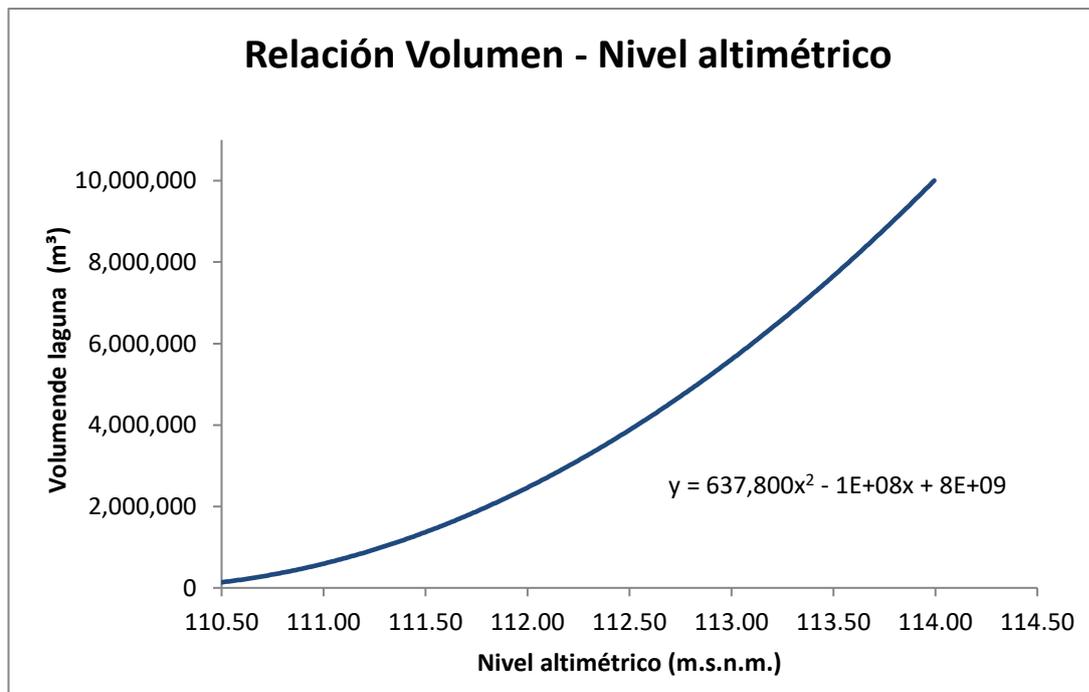


Figura B88: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°45.

## Laguna N°46

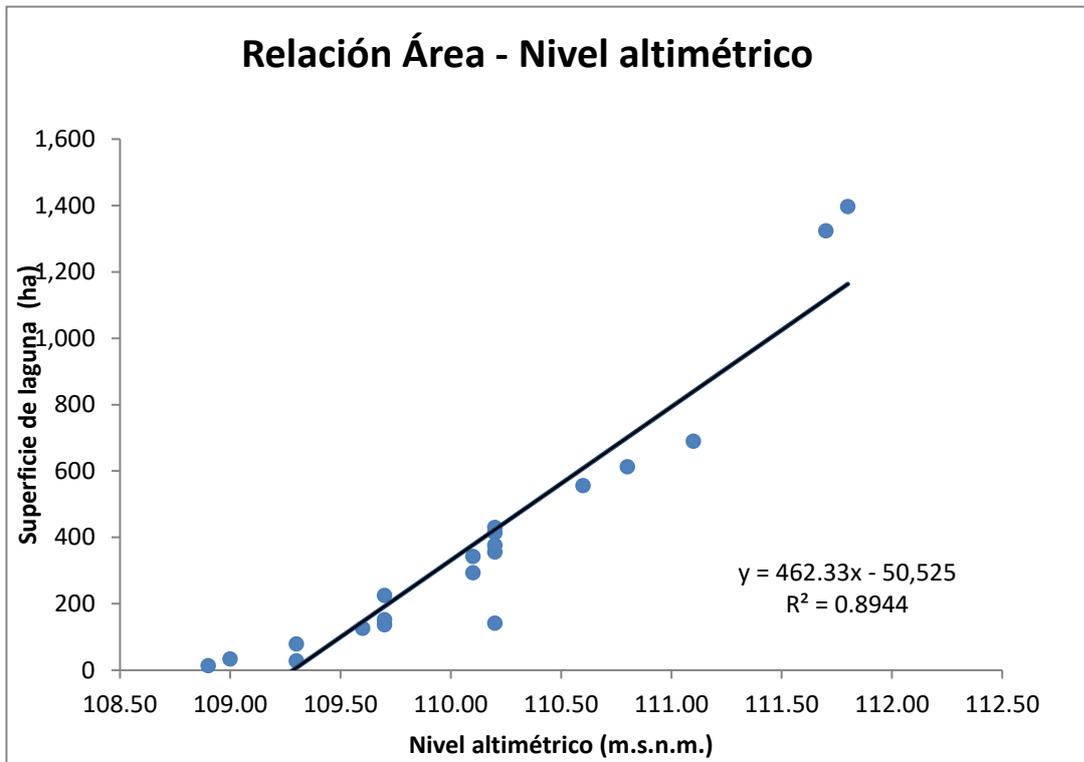


Figura B89: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°46.

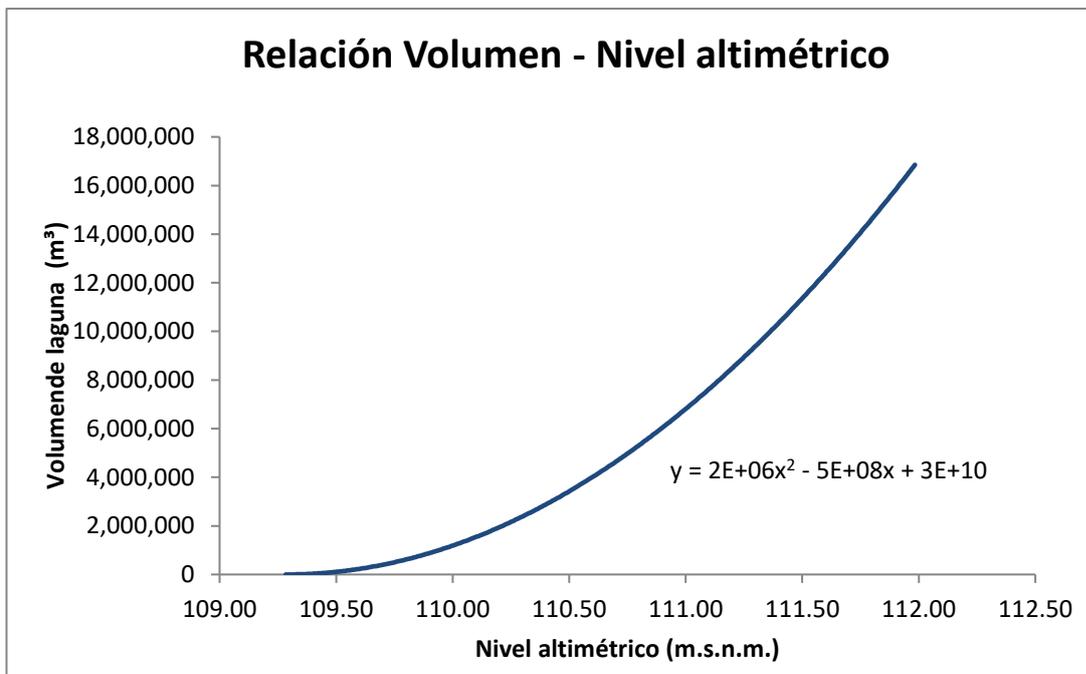


Figura B90: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°46.

## Laguna N°47

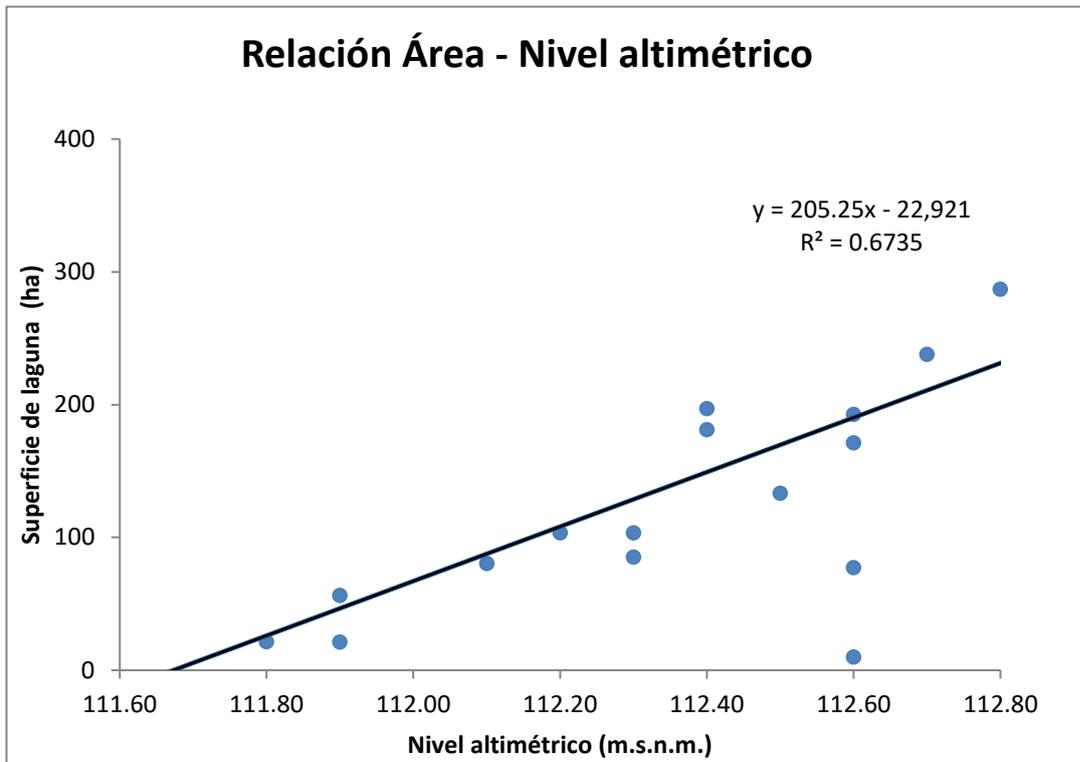


Figura B91: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°47.

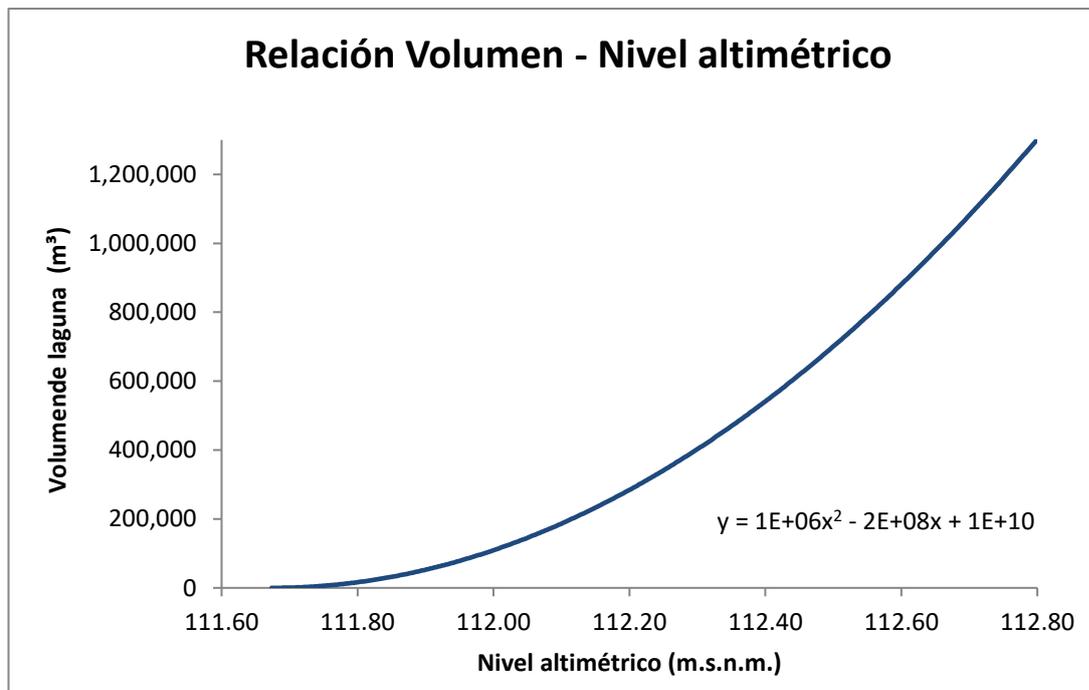


Figura B92: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°47.

## Laguna N°48

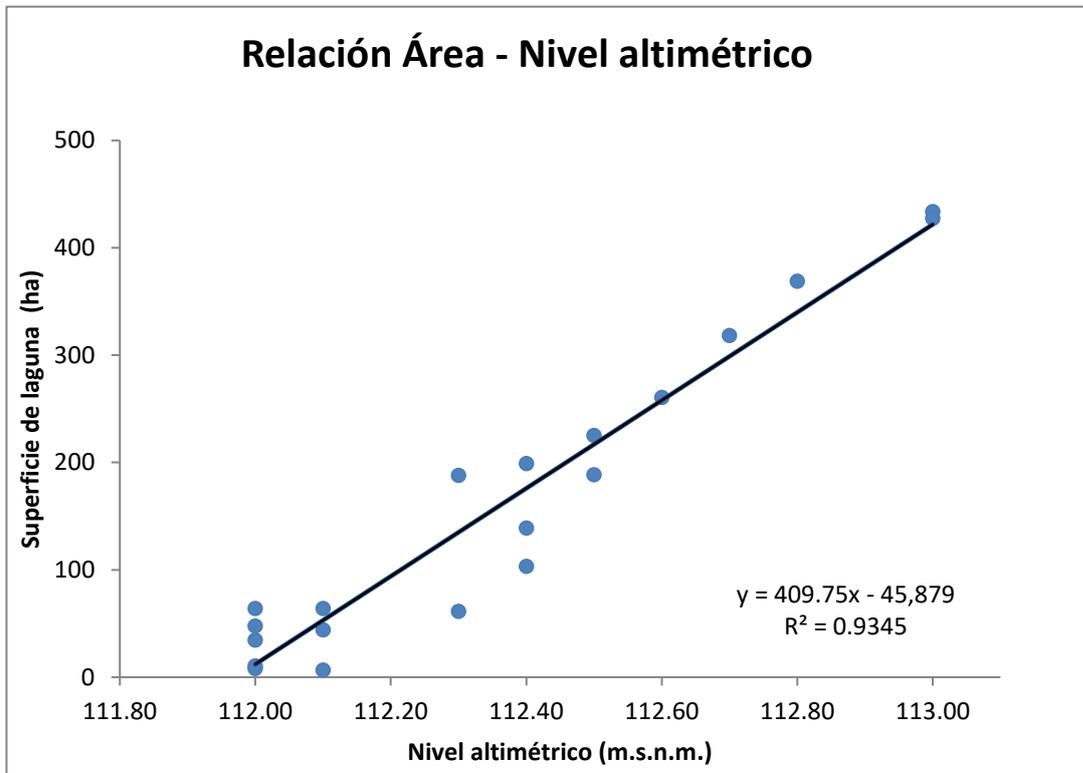


Figura B93: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°48.

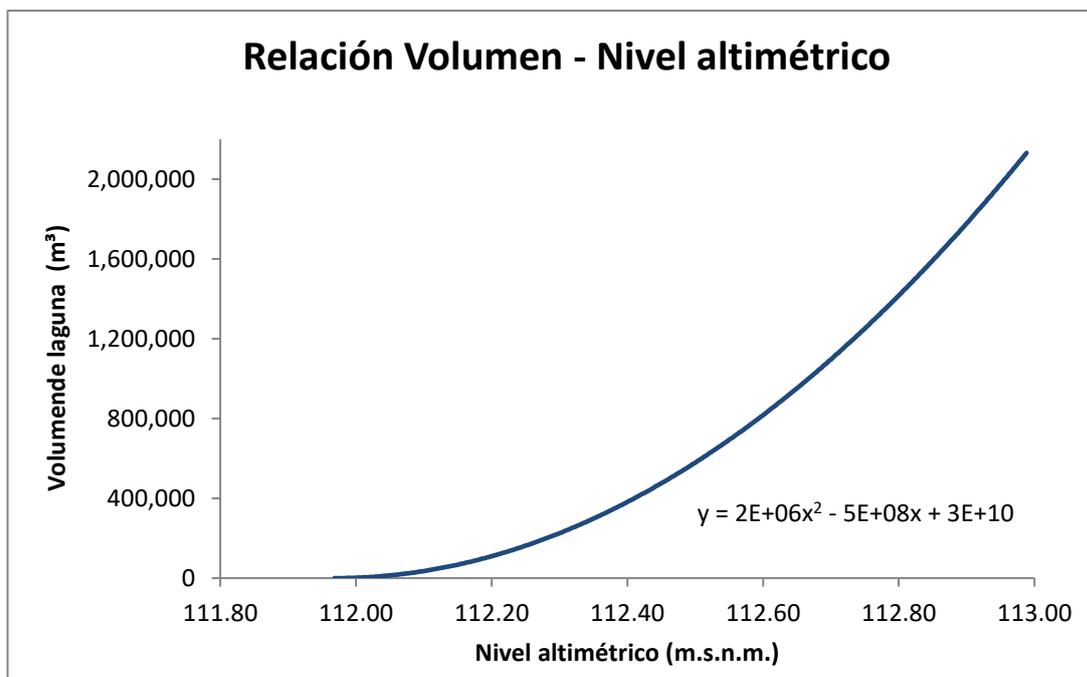
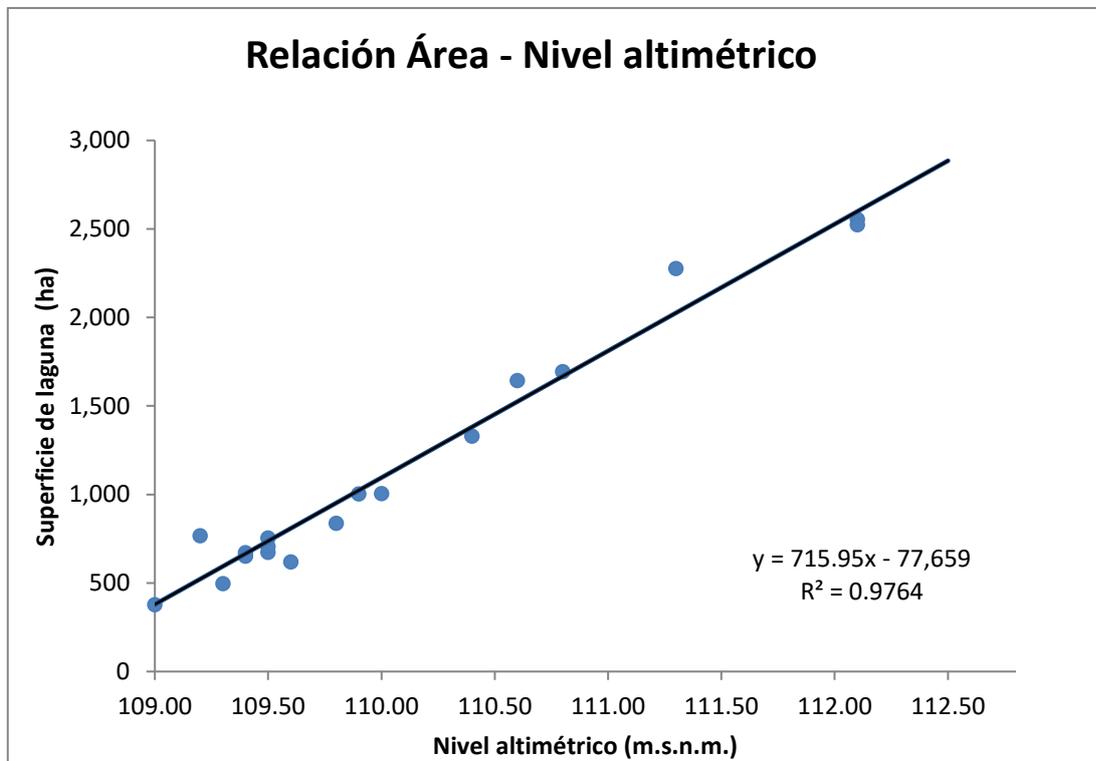
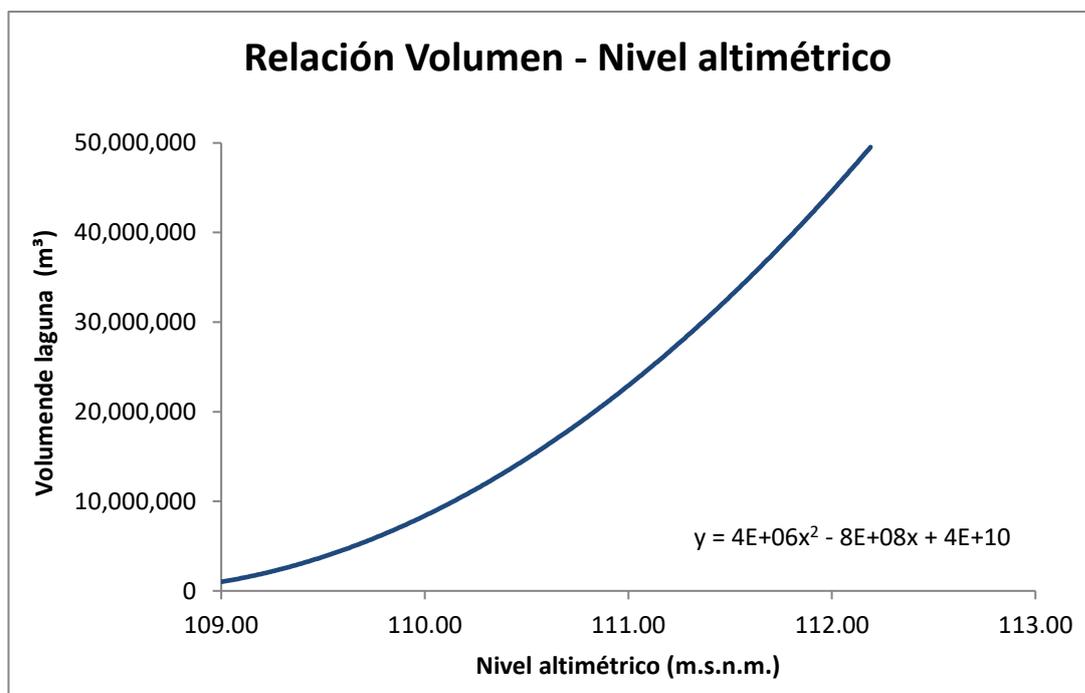


Figura B94: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°48.

## Laguna N°49



**Figura B95:** Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°49.



**Figura B96:** Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°49.

## Laguna N°50

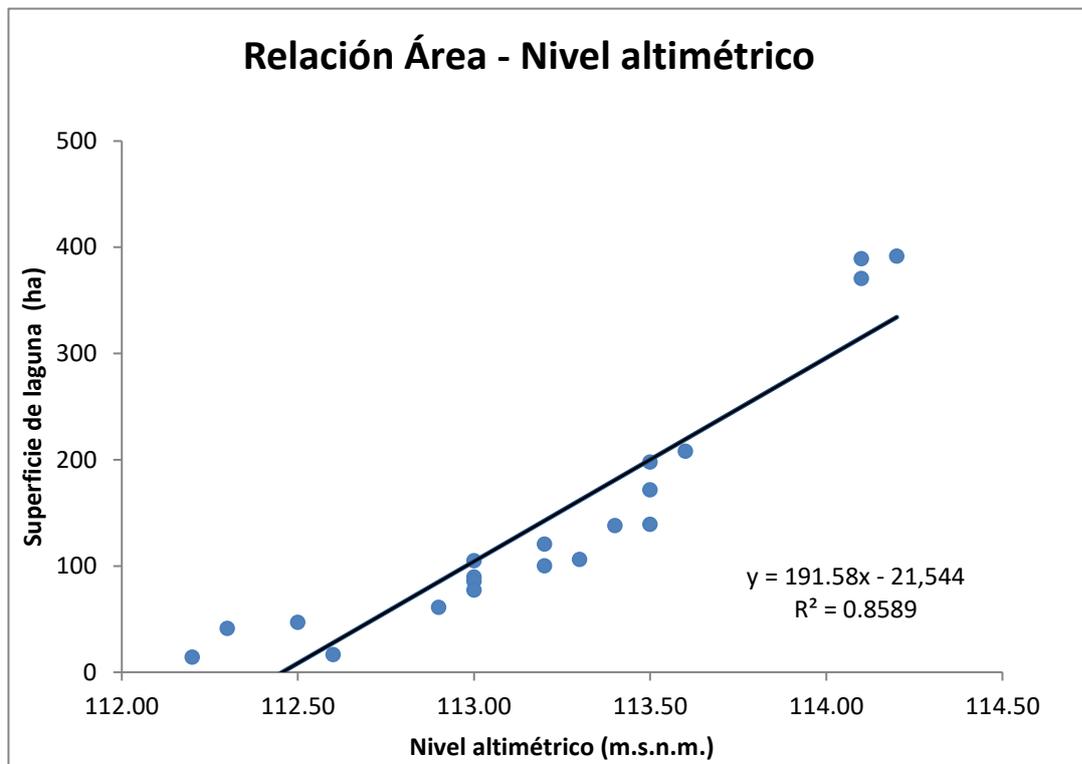


Figura B97: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°50.

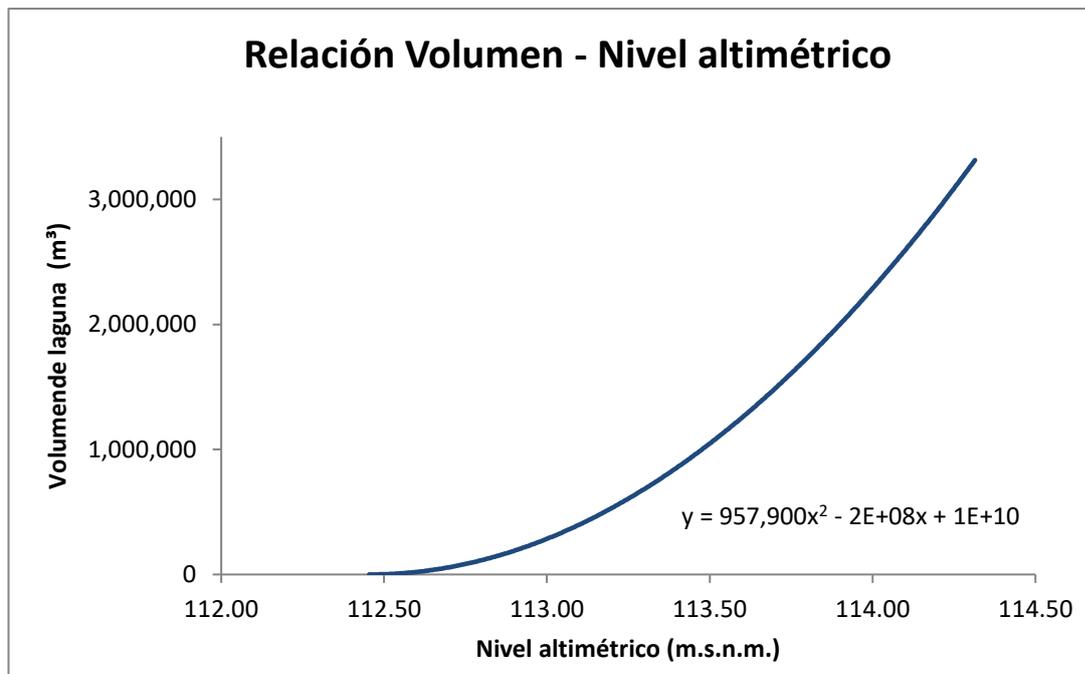


Figura B98: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°50.

## Laguna N°51

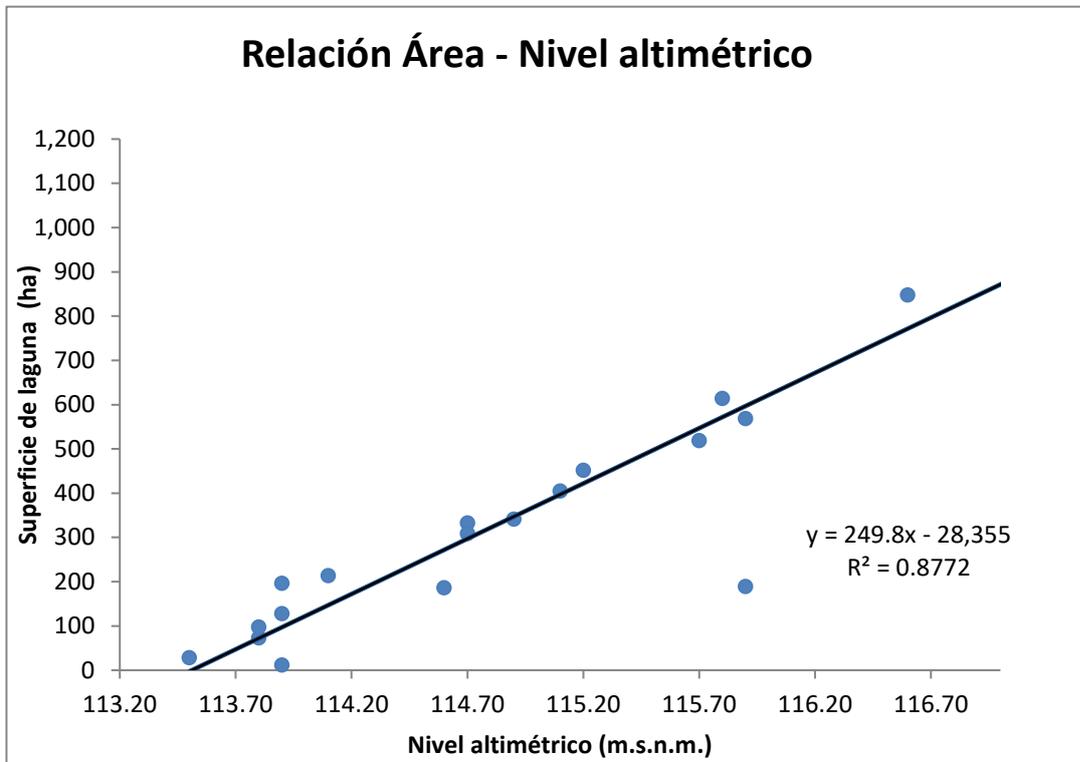


Figura B99: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°51.

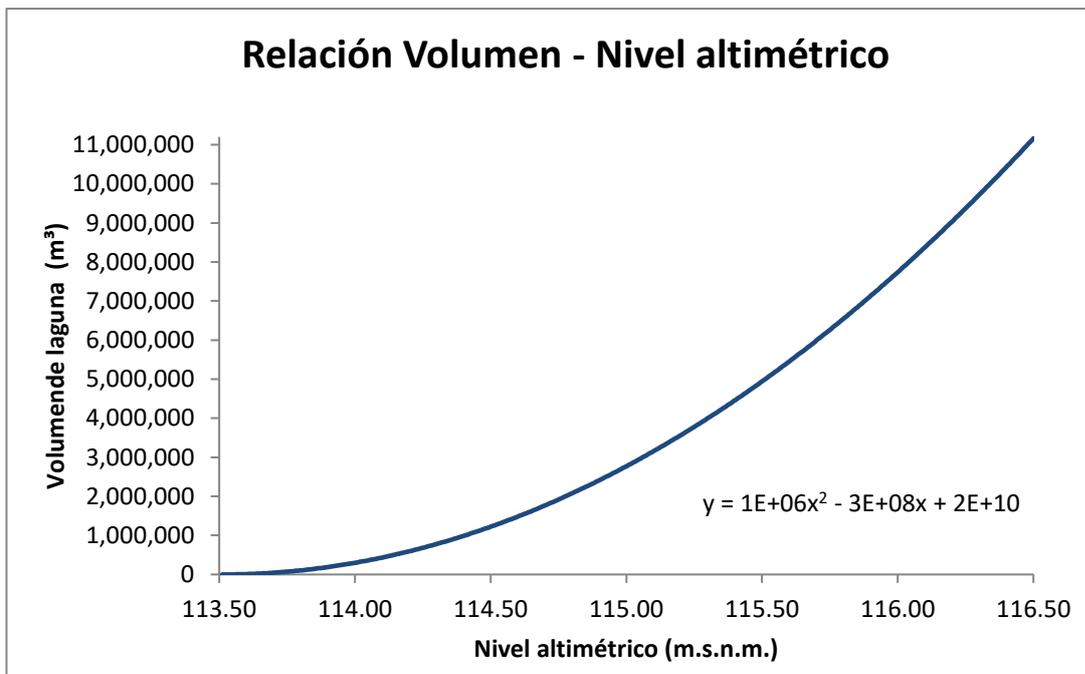


Figura B100: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°51.

## Laguna N°52

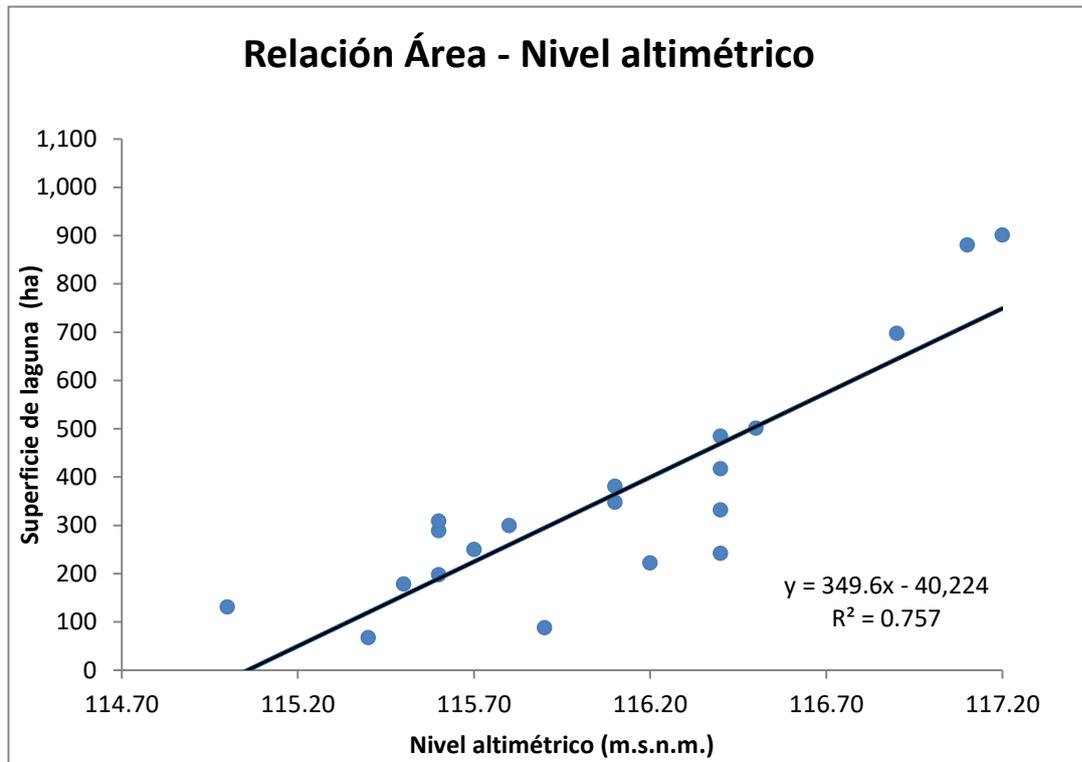


Figura B101: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°52.

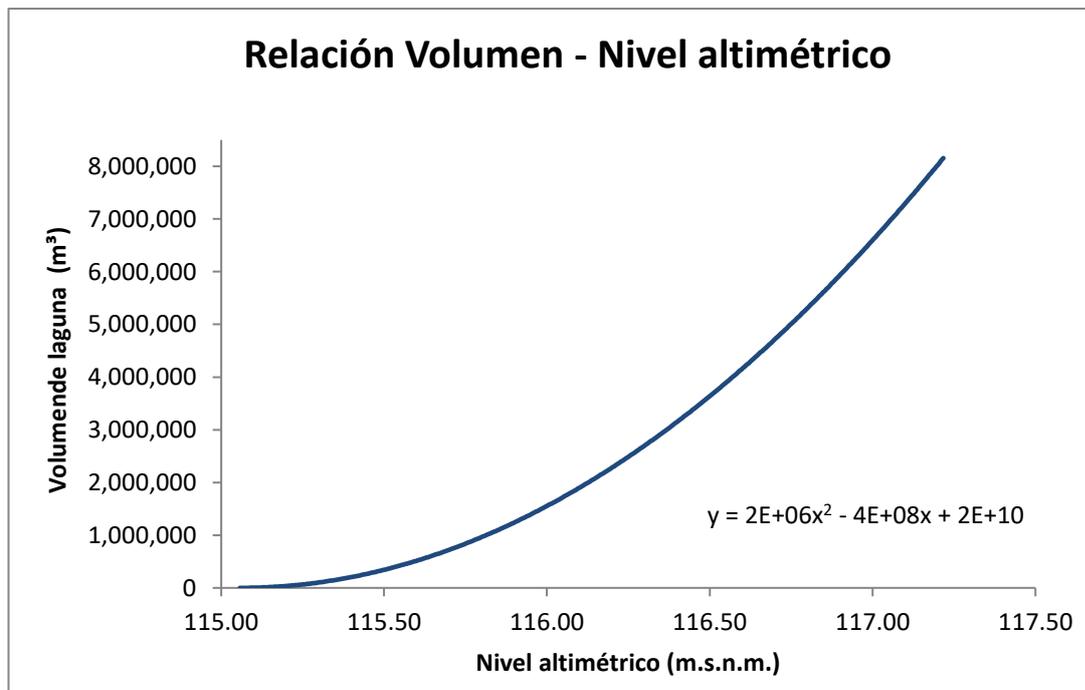


Figura B102: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°52.

## Laguna N°53

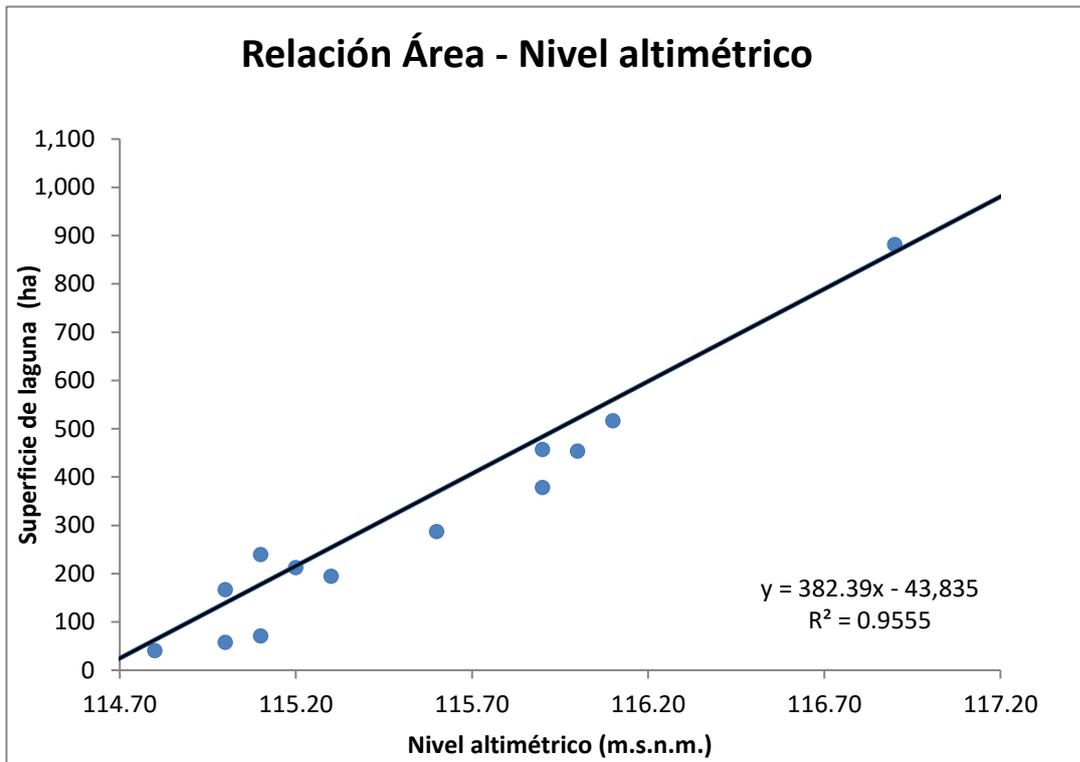


Figura B103: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°53.

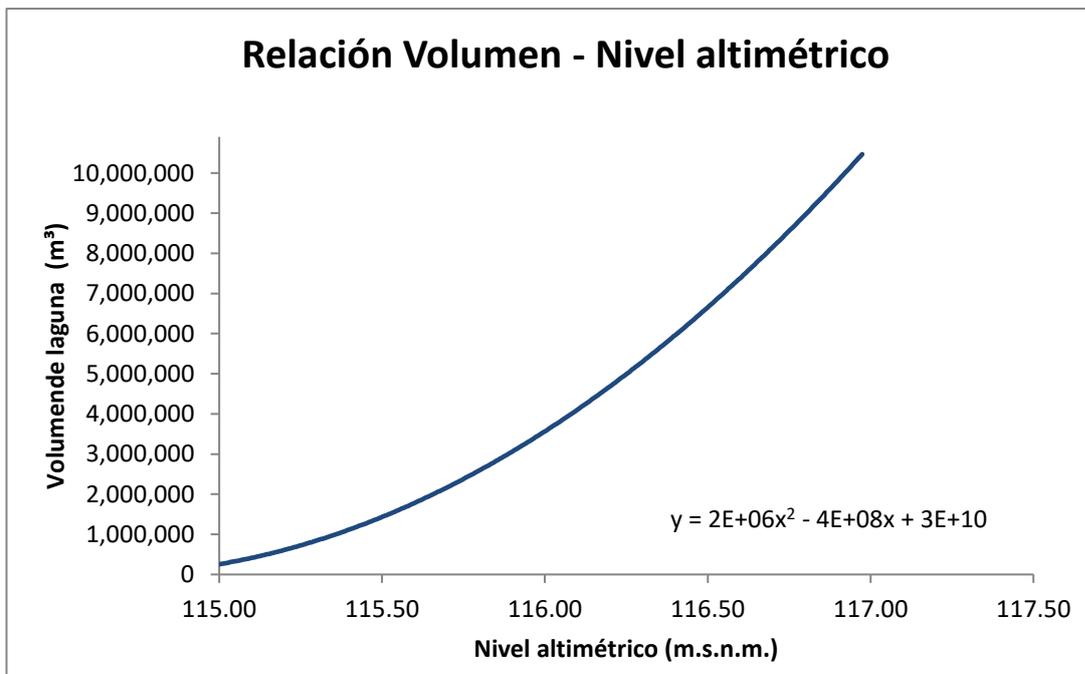


Figura B104: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°53.

## Laguna N°54

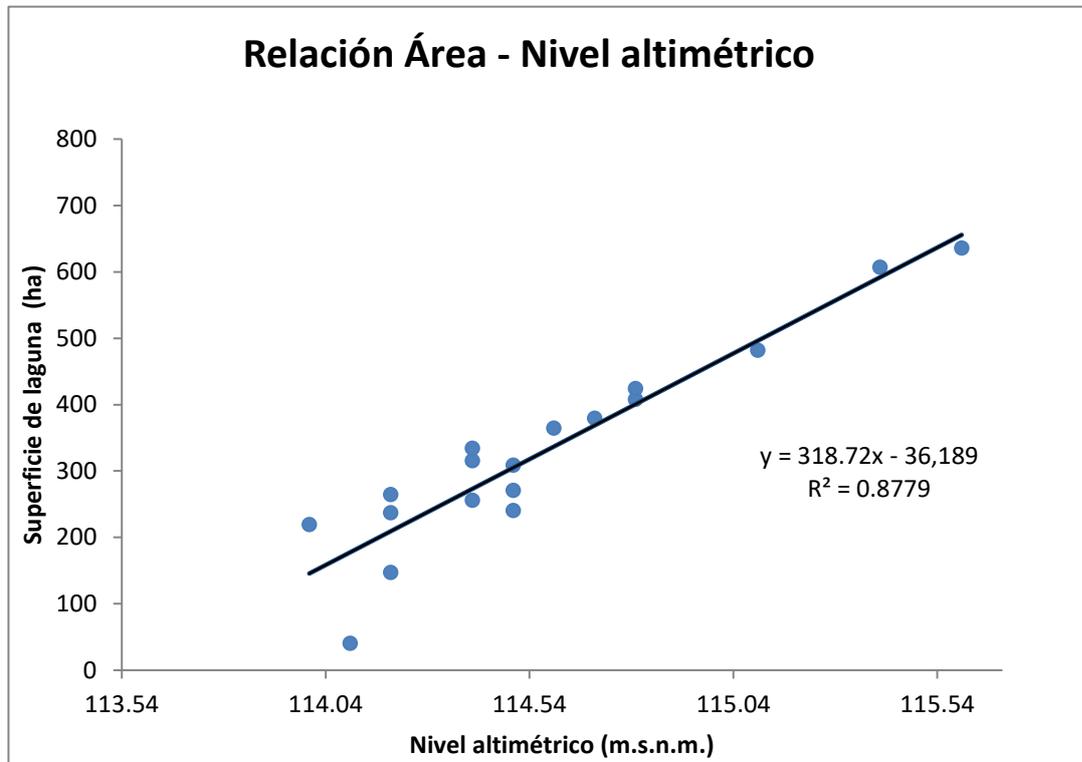


Figura B105: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°54.

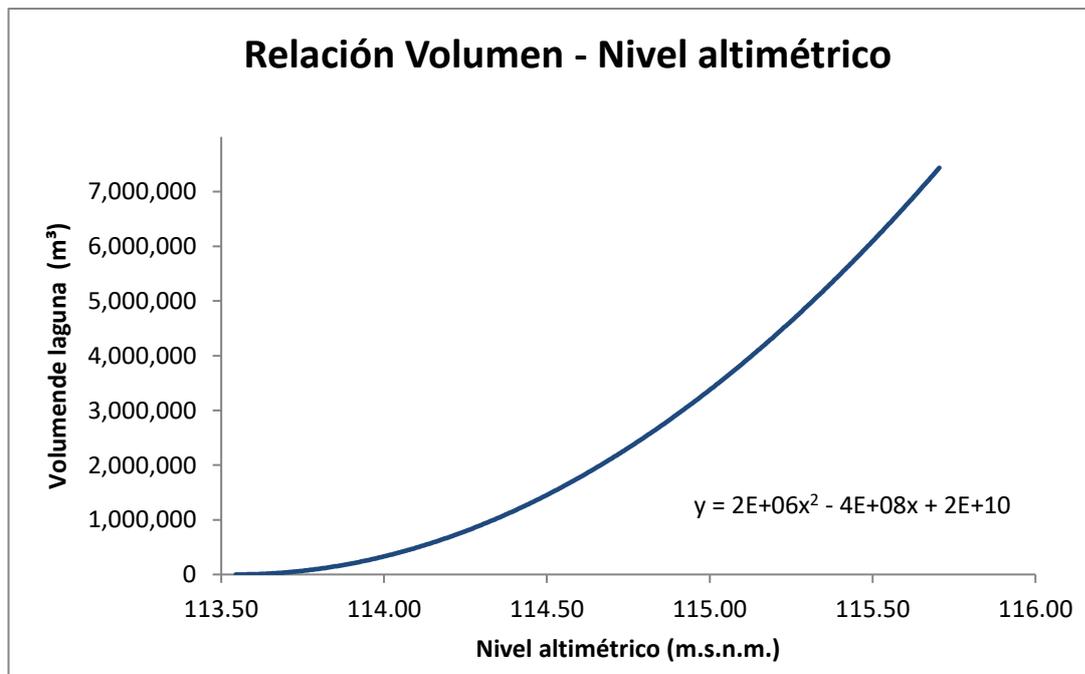


Figura B106: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°54.

## Laguna N°55

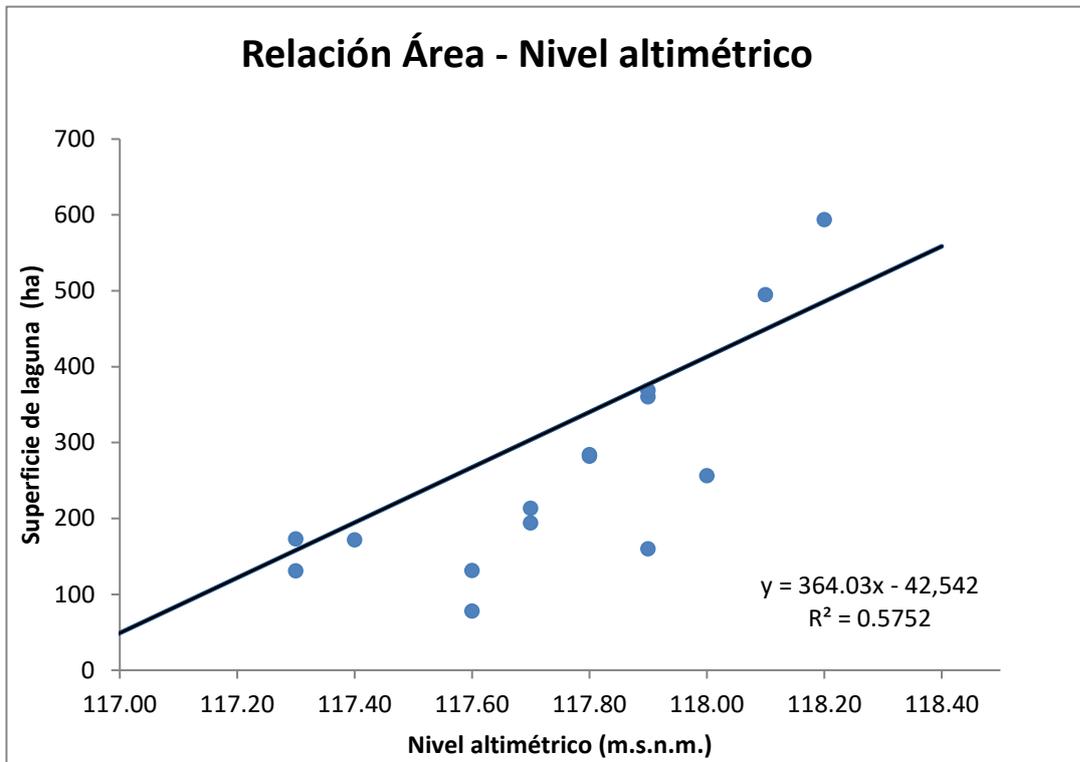


Figura B107: Gráfica de relación nivel altimétrico – área para la laguna N°55.

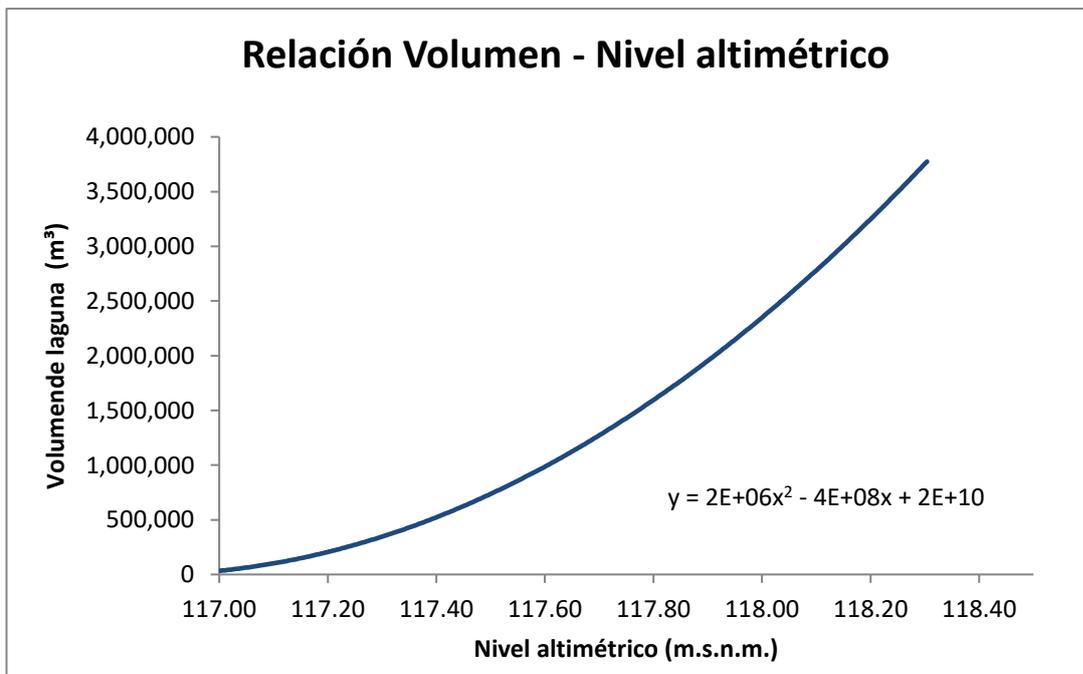


Figura B108: Gráfica de relación nivel altimétrico – volumen para la laguna N°55.

## Anexo C

## Anexo C

Tabla de descripción de la composición de los suelos presentes en el SH Las Encadenadas.

**Tabla C1:** Descripción de los suelos presentes en el SH Las Encadenadas. Extraído de (Espindola, A.; Godagnone, R.; Havrylenko, S.; de la Fuente, J.C.; Mercuri, 2014)

GID	360	575	493
NUM	878	873	962
MUID	A354	A352	A387
SEQN	1	1	1
SNAM	Typic Argiudolls	Entic Hapludolls	Typic Natraqualfs
CMPPCT	100	50	100
NLAYERS	6	3	5
HYDGRP	D	B	C
SOL_ZMX	150	150	150
ANION_EXCL	0.5	0.5	0.5
SOL_CRK	0.5	0.5	0.5
TEXTURE	F-F-FA-A-FA-F	FAR-FAR-ArF	A-FAAr-FAR-FAR-ArF
SOL_Z1	200	300	270
SOL_BD1	1.43	1.56	1.55
SOL_AWC1	0.13	0.07	0.2
SOL_K1	18.13	40.96	13.74
SOL_CBN1	1.70	0.76	0.56
CLAY1	20.1	13.1	7.2
SILT1	33.1	11	8.3
SAND1	46.8	75.9	19.7
ROCK1	0	0	0
SOL_ALB1	0.09	0.09	0.16
USLE_K1	0.55	0.66	0.14
SOL_EC1	0	0	0
SOL_Z2	320	800	400
SOL_BD2	1.43	1.59	1.62
SOL_AWC2	0.14	0.06	0.09
SOL_K2	10.17	49.77	8.63
SOL_CBN2	1.44	0.21	0.05
CLAY2	24.8	11.1	25.1
SILT2	34.6	9.1	11.4
SAND2	40.6	79.8	63.5
ROCK2	0	0	0
SOL_ALB2	0	0	0
USLE_K2	0	0	0
SOL_EC2	0	0	0
SOL_Z3	550	1,450	700
SOL_BD_3	1.48	1.62	1.59
SOL_AWC3	0.13	0.05	0.08

Continuación de **Tabla C1**: Descripción de los suelos presentes en el SH Las Encadenadas.

SOL_ALB3	0	0	0
USLE_K3	0	0	0
SOL_EC3	0	0	0
SOL_Z4	800	0	1,000
SOL_BD4	1.41	0	1.62
SOL_AWC4	0.12	0	0.06
SOL_K4	0.78	0	46.4
SOL_CBN4	0.55	0	0
CLAY4	46.4	0	11.3
SILT4	20.7	0	10.4
SAND4	32.9	0	78.3
ROCK4	0	0	0
SOL_Z5	1,100	0	1,200
SOL_BD5	1.52	0	1.61
SOL_AWC5	0.13	0	0.05
SOL_K5	3.14	0	60.75
SOL_CBN5	0.32	0	0
CLAY5	32	0	8.9
SILT5	30	0	8.9
SAND5	38	0	82.2
ROCK5	0	0	0
SOL_ALB5	0	0	0
USLE_K5	0	0	0
SOL_EC5	0	0	0
SOL_Z6	1,500	0	0
SOL_BD6	1.59	0	0
SOL_AWC6	0.12	0	0
SOL_K6	8.53	0	0
SOL_CBN6	0.2	0	0
CLAY6	22	0	0
SILT6	31.8	0	0
SAND6	46.2	0	0
ROCK6	0	0	0

## Anexo D

## Anexo D

Tipos de complejos hidrológicos y números de escurrimientos respectivos, para la condición II. Extraído de (Orsolini et al., 2008).

**Tabla D1:** Tipos de complejos hidrológicos y números de escurrimientos respectivos, para la condición II.

Clase y uso del suelo	Tipos de suelos				
	Ident	A	B	C	D
Suelos naturales de pastoreo y tierras en barbecho de varios años. La cubierta vegetal los cubre prácticamente todo el año.	A				
Suelos naturales de tipo intermedio, generalmente llanos con cubierta densa.	A1	45	63	75	79
Suelos naturales bajos, inundables con escasa capacidad de infiltración.	A2	65	73	84	88
Suelos naturales altos, con lomas y pendientes pronunciadas con cubierta medianamente densa.	A3	62	71	80	87
Suelos anteriores con afloramiento de tosca visibles.	A4	62	71	80	87
Suelos anteriores con afloramiento de tosca en superficie.	A5	68	78	87	92
Suelos accidentales de tipo rocoso, dentro de área de serranías y montañas.	B				
Suelos accidentados rocosos, con cubierta vegetal intercalada, de fuertes pendientes.	B1	72	79	84	90
Suelos accidentados rocosos, con cubierta vegetal intercalada, de mediana pendiente.	B2	64	74	80	86
Suelos accidentados rocosos, con escasa vegetación o sin cubierta vegetal definida de fuertes pendientes.	B3	73	80	86	92
Suelos accidentados rocosos totalmente desnudos, con mediana a fuerte pendiente y muy escasa capacidad de infiltración.	B4		78	82	90
Suelos accidentados rocosos totalmente desnudos, con fuerte pendiente y muy escasa capacidad de infiltración.	B5			90	95
Suelos cultivados (arable y cultivable), suelo arado y libre de cultivos en período de análisis. Mayor capacidad de infiltración.	C				
Suelos cultivados, arados y libres con topografía plana o muy baja pendiente, menor al 5 por mil.	C1	26	47	59	68
Suelos cultivados, arados y libres con mediana a escasa pendiente de 5 a 20 por mil.	C2	30	55	64	73
Suelos cultivados, arados y libres con pendiente > 20 por mil.	C3	37	60	69	78
Suelos arables cultivados con cereal tipo cosecha fina.	C.C				
Tipo cosecha fina con baja pendiente, inferior al 5 por mil.	C4	57	62	69	78
Tipo cosecha fina con pendiente de 5 a 20 por mil.	C5	62	69	76	83
Tipo cosecha fina con pendiente mayor al 20 por mil.	C6	65	72	79	86
Suelos arables cultivados con explotación tipo maíz y/o sorgo.	CN				
Tipo maíz/sorgo con bja pendiente, inferior al 5 por mil.	C7	60	66	72	77
Tipo maíz/sorgo con pendiente, de 5 a 20 por mi.	C8	64	73	78	86
Tipo maíz/sorgo con pendiente, más de 20 por mil.	C9	68	77	82	88
Suelos arables cultivados, con pradera artificial de alfalfa.	D				
Tipo alfalfa con baja pendeinte, inferior al 5 por mil.	D1	62	69	74	80
Tipo alfalfa con pendiente emdia, de 5 a 20 por mil.	D2	66	75	83	89

Continuación de **Tabla D1:** Tipos de complejos hidrológicos y números de escurrimientos respectivos, para la condición II.

Clase y uso del suelo	Ident	Tipos de suelos			
		A	B	C	D
Tipo alfalfa con pendiente mayor al 20 por mil.	D3	69	77	88	95
Suelos medanosos sueltos, muy arenosos, con alta capacidad de infiltración.	M				
Tipo medanoso con pequeñas lomadas y pendientes.	M1	20	27	38	
Tipo medanoso con lomadas mayores y fuertes pendientes.	M2	25	33	43	
Suelos varios. Suelos bajos, anegadizos y hoyas con escasa capacidad de infiltración: tiende a hacerse almacenaje.	N1	40	52	65	78
Cascos de estancia, huertos y montes frutales.	O1	59	72	83	89
Bosques y montes con vegetación media a densa.	Q1	38	55	70	79
Poblaciones y centros poblados.	P1	60	75	85	90
Carreteras y caminos, incluyendo derecho de vías.	R				
Idem sin mantenimiento o ligeramente compactadas.	R1	70	82	88	93
Carreteras afirmadas, asfaltadas o fuertemente compactadas.	R2	75	84	90	95

## Anexo E

## Anexo E

Relevamiento de obras en el punto de cierre - cálculos de descarga.

**Tabla E1:** Cálculos de curva de descarga tipo Q-H (caudal (m<sup>3</sup>/s) versus altura de agua (m)).

Obra N°1	Obra N°2		Obra N°3		ObraN°4	Obra N°5	Obra N°6	h (m)	Área total (m <sup>2</sup> )	Qfinal (m <sup>3</sup> /s)	
area (m <sup>2</sup> )	áng. (°)	área (m <sup>2</sup> )	áreax6 (m <sup>2</sup> )	área (m <sup>2</sup> )	áreax4 (m <sup>2</sup> )	área (m <sup>2</sup> )	áreax3 (m <sup>2</sup> )				área (m <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
1	96	0.12	0.74	0.12	0.49	1.2	0.37	0.6	0.2	4.40	8.3
2	138	0.33	1.98	0.33	1.32	2.4	0.99	1.2	0.4	9.89	18.6
3		0.57	3.39	0.57	2.26	3.6	1.70	1.8	0.6	15.75	29.6
4		0.80	4.80	0.80	3.20	4.8	2.40	2.4	0.8	21.60	40.6
5		1.01	6.04	1.01	4.03	6	3.02	3	1	27.09	50.9
6		1.13	6.78	1.13	4.52	7.2	3.39	3.6	1.2	31.50	59.2
7						8.4		4.2	1.4	34.30	64.5
8						9.6		4.8	1.6	37.10	69.7
9						10.8		5.4	1.8	39.90	75.0
10						12		6	2	42.70	80.3
11						13.2		6.6	2.2	45.50	85.5
30									2.4	45.50	144.9
90									2.6	45.50	263.7
150									2.8	45.50	382.5
210									3	45.50	501.3
270									3.2	45.50	620.1
330									3.4	45.50	738.9
390									3.6	45.50	857.7
Obra N°1: 1 Alcantarilla b=5 m, h=2.20 m.											
Obra N°2: 6 Tubos Ø1.20 m.											
Obra N°3: 4 tubos Ø 1.20 m.											
Obra N°4: 1 alcantarilla doble b=5.60 m, h=2.20 m.											
Obra N°5: 3 tubos Ø=1.20m.											
Obra N°6: 1 alcantarilla b=3.00m, h=2.20.											
Suposición de agua sobre la calzada.											

Fórmula para el cálculo de Q en alcantarillas a sección llena:

$$Q = \mu \cdot \sum \text{áreas} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$



**Figura E1:** Mapa ubicación de las obras constituyentes de la sección de control.



**Figura E2:** Imagen de obra N°1.



**Figura N°E3:** Imagen de obra N°2.



**Figura N°E4:** Imagen de obra N°3.



**Figura N°E5:** Imagen de obra N°4.



**Figura N°E6:** Imagen de obra N°5.



**Figura N°E7:** Imagen de obra N°6.



**Figura N°E7:** Escorrimento del agua en secciones de control para el evento diciembre 2016-enero 2017.



**Figura N°E8:** Vista aérea del escurrimiento del agua en secciones de control para el evento diciembre 2016- enero 2017.

## Anexo F

## Anexo F

**Tabla F1:** Extracto de Coeficientes n de Manning (V. T. Chow, 1959)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<b>C. Canal excavado o dragado</b>			
<b>a. En tierra, recto y uniforme</b>			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.02
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.03
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
<b>b. En tierra, serpenteante y lento</b>			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
<b>c. Excavado con pala o dragado</b>			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
<b>d. Cortes en roca</b>			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
<b>e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar</b>			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad del flujo	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
<b>D. Corrientes naturales</b>			
<b>D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente &lt; 100 pies)</b>			
<b>a. Corrientes en planicies</b>			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
<b>b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos</b>			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070

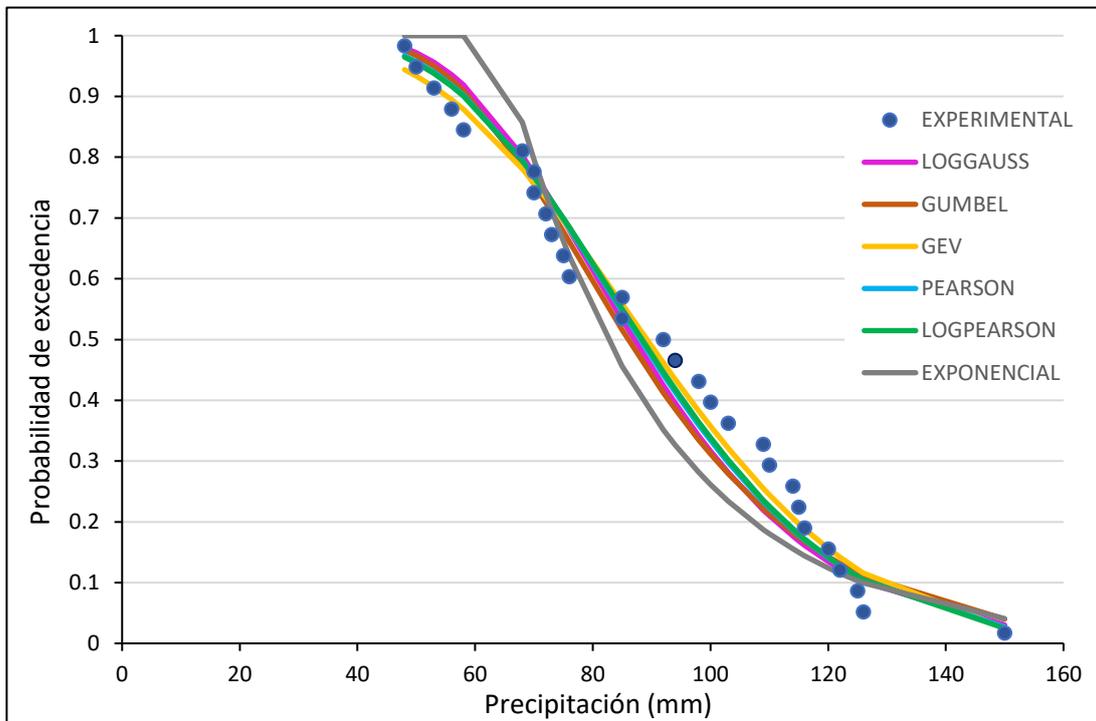
Continuación de **Tabla F1**: Coeficientes n de Manning.

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<b>D-2. Planicies de inundación</b>			
<b>a. Pastizales, sin matorrales</b>			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
<b>b. Áreas cultivadas</b>			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
<b>c. Matorrales</b>			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.050
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
<b>d. Árboles</b>			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.070
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas.	0.080	0.100	0.200
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
<b>D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente &gt; 100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente debido a que los bancos ofrecen resistencia menos efectiva.</b>			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales 0.025 0.060	0.025		0.060
b. Sección irregular y rugosa 0.035 0.100	0.035		0.100

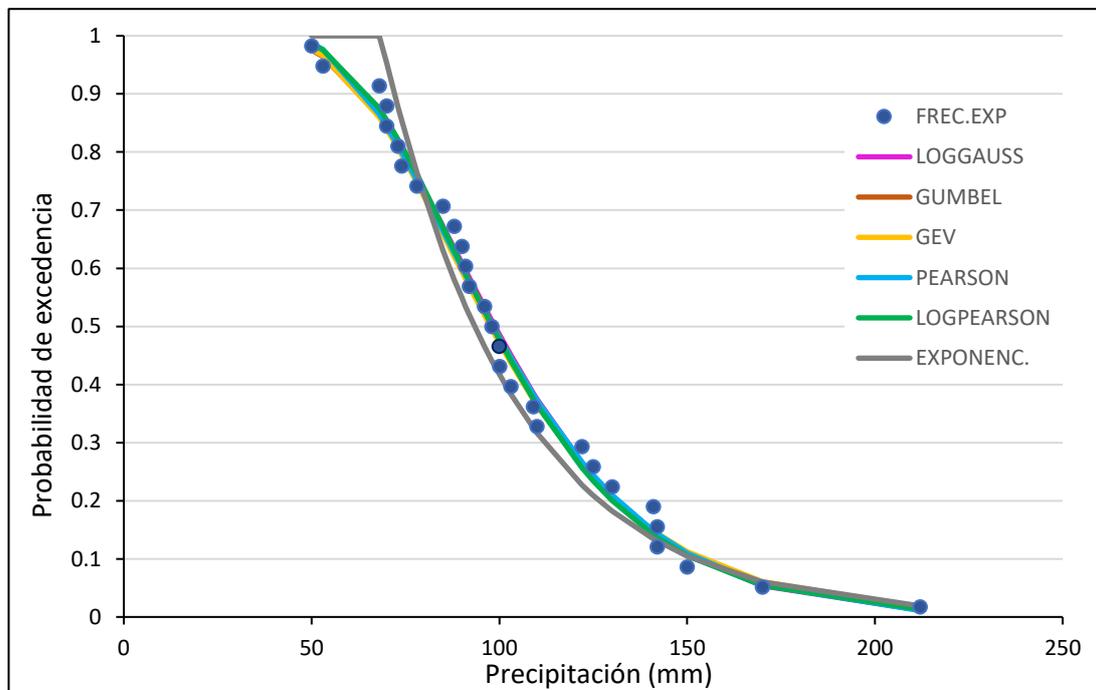
## Anexo G

## Anexo G

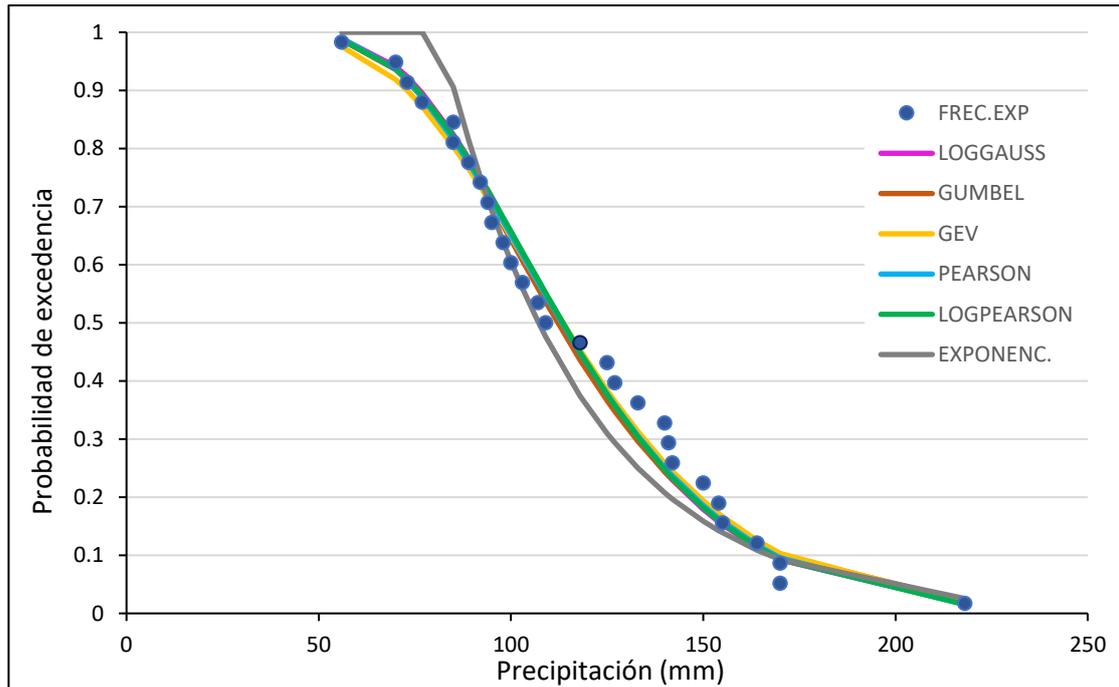
Gráficas de probabilidad de excedencia para las Estaciones Venado Tuerto y Villa Cañas.



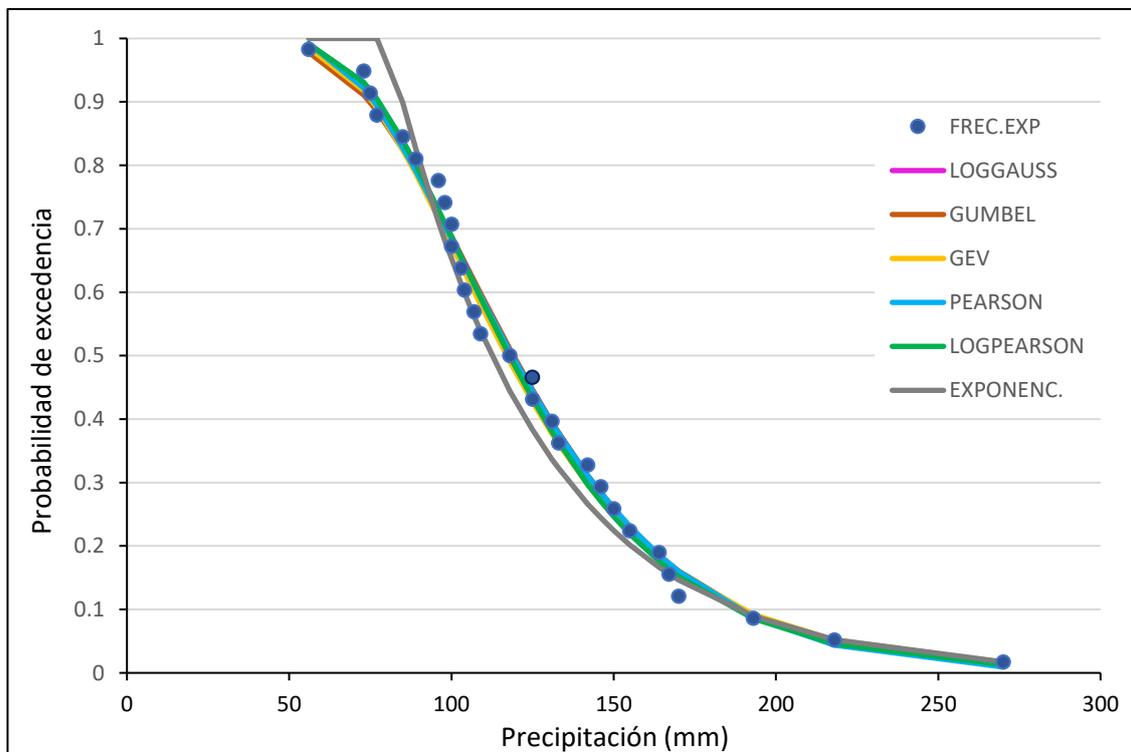
**Figura G1:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones D = 24 h para la estación Villa Cañas.



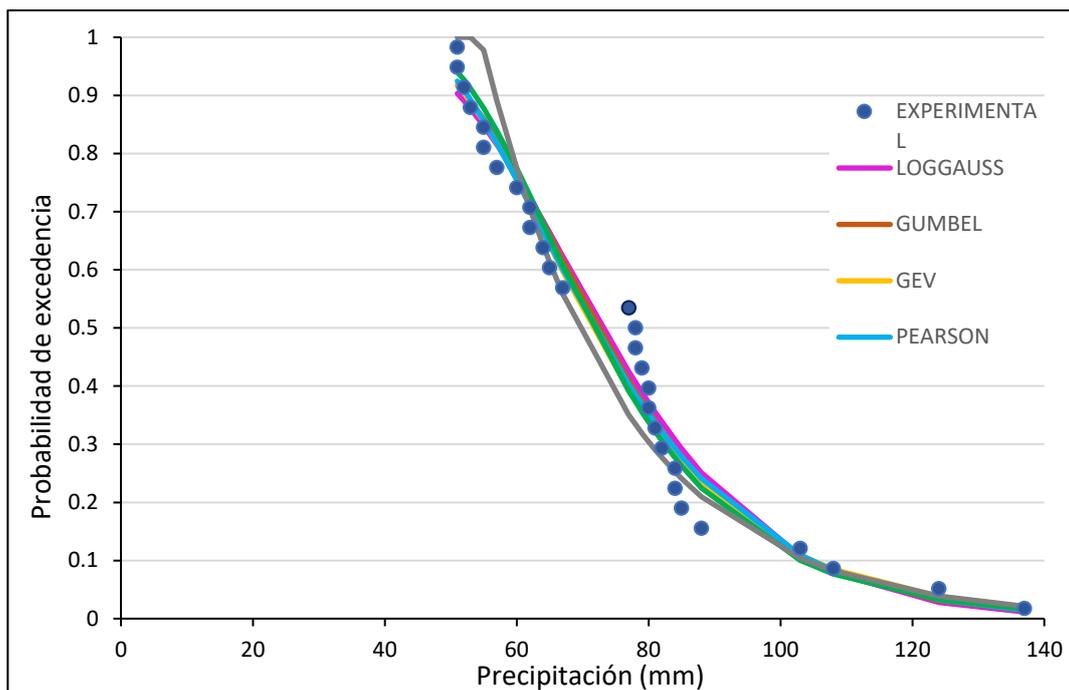
**Figura G2:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones D = 48 h para la estación Villa Cañas.



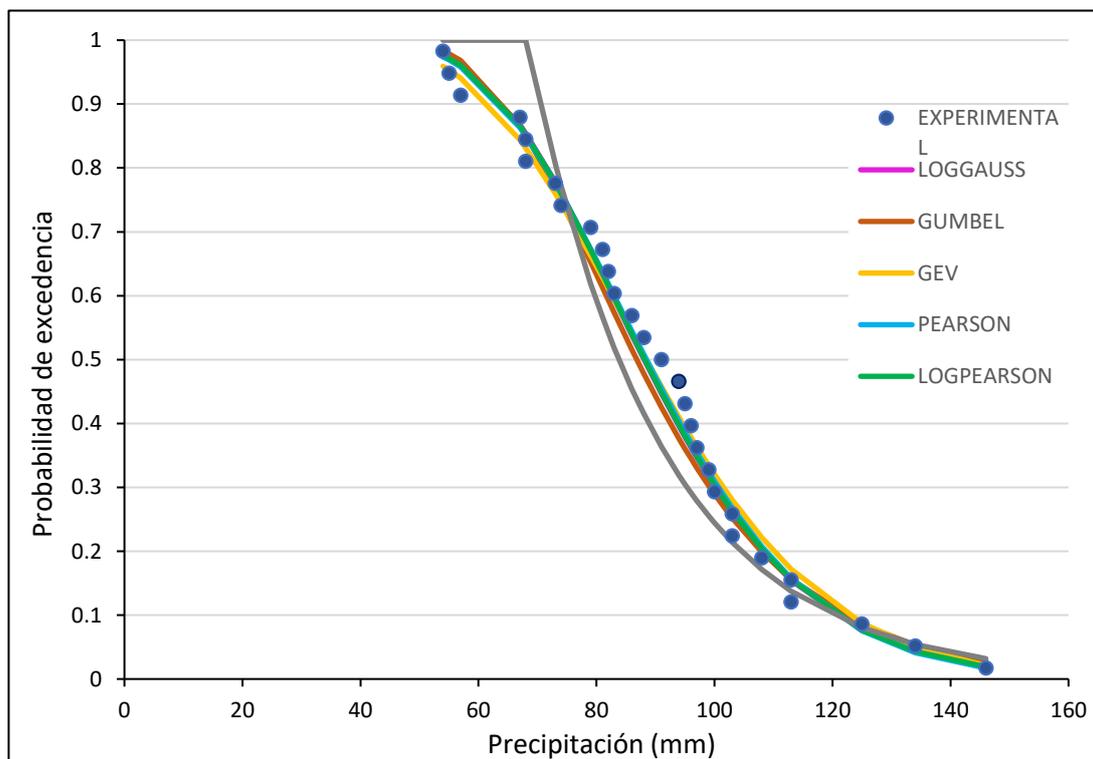
**Figura G3:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones D = 72 h para la estación Villa Cañas.



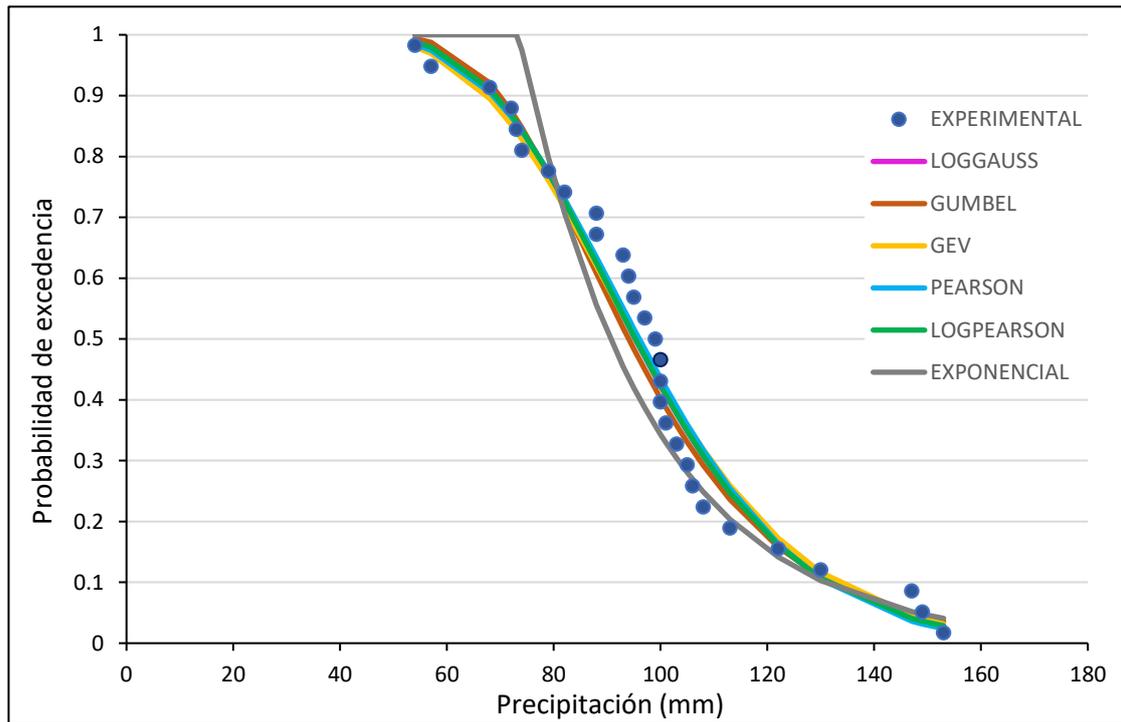
**Figura G4:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones D = 96 h para la estación Villa Cañas.



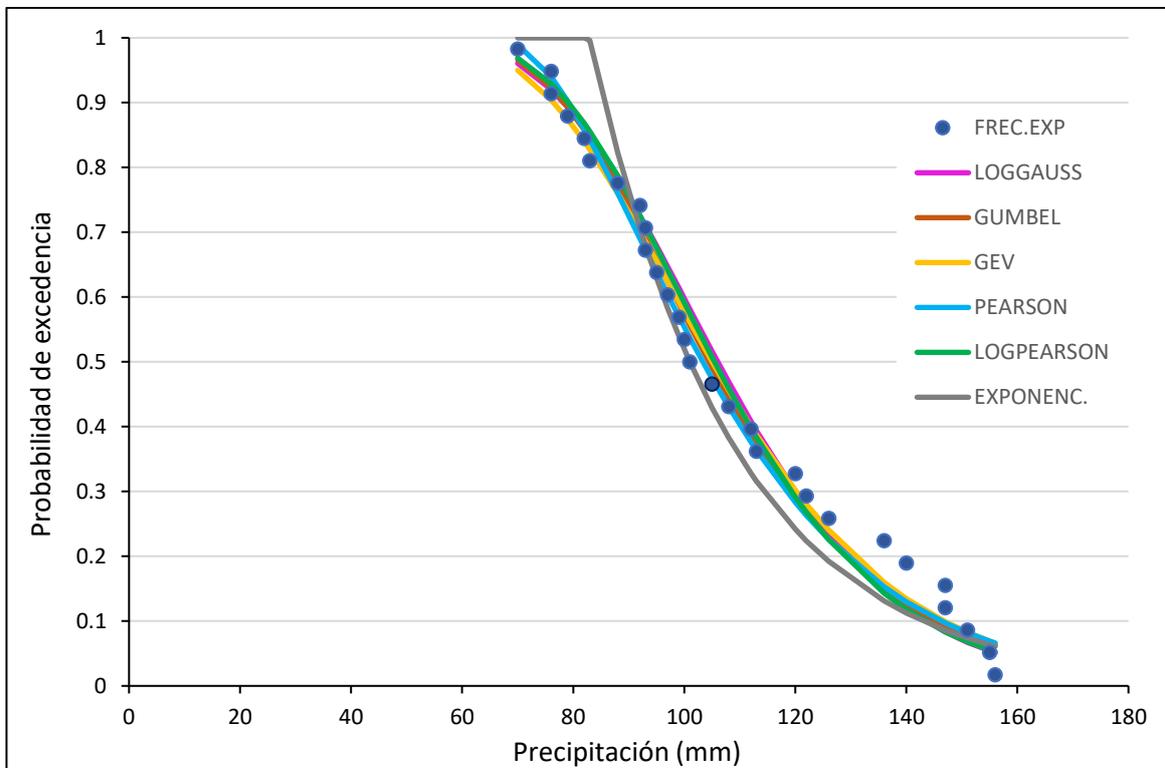
**Figura G5:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones  $D = 24$  h para la estación Venado Tuerto.



**Figura G6:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones  $D = 48$  h para la estación Venado Tuerto.



**Figura G7:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones D = 72 h para la estación Venado Tuerto.



**Figura G8:** Probabilidad de excedencia para precipitaciones D = 96 h para la estación Venado Tuerto.

# Anexo H

Anexo H

**Tabla H1:** Pruebas de bondad de ajuste

Bondad de ajuste		LogGauss	Gumbel	GEV	Pearson	LogPearson	Exponencial
Venado Tuerto 24 h	Kolmogoroff	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	Chi-Cuadrado	---	---	---	---	---	---
	ECMF	0.0536	0.0532	0.0535	0.0521	0.0564	0.0827
	ECMV	4.45	4.00	3.81	3.78	3.72	4.38
Venado Tuerto 48 h	Kolmogoroff	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	Chi-Cuadrado	---	---	---	---	---	---
	ECMF	0.0299	0.040	0.0291	0.0272	0.0292	0.0899
	ECMV	2.41	3.30	2.64	2.28	2.37	6.73
Venado Tuerto 72 h	Kolmogoroff	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	Chi-Cuadrado	---	---	---	---	---	---
	ECMF	0.0488	0.0538	0.0512	0.048	0.0488	0.0965
	ECMV	4.69	5.23	4.76	4.61	4.68	8.27
Venado Tuerto 96 h	Kolmogoroff	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	Chi-Cuadrado	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	ECMF	0.0404	0.0327	0.0321	0.0312	0.0393	0.0693
	ECMV	5.61	6.71	6.46	6.87	5.94	9.3
Venado Tuerto 120 h	Kolmogoroff	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	Chi-Cuadrado	---	---	---	---	---	---
	ECMF	0.0411	0.035	0.0327	0.0309	0.0381	0.057
	ECMV	3.70	3.55	4.30	3.78	3.56	6.15
Villa Cañás 24 h	Kolmogoroff	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	Chi-Cuadrado	---	---	---	---	---	---
	ECMF	0.0561	0.0551	0.0383	0.0477	0.0463	0.0893
	ECMV	5.85	6.98	4.79	5	4.76	10.55
Villa Cañás 48 h	Kolmogoroff	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	Chi-Cuadrado	---	---	---	---	---	---
	ECMF	0.0276	0.0274	0.028	0.0278	0.0267	0.0568
	ECMV	3.92	3.75	3.74	4.04	3.76	6.95
Villa Cañás 72 h	Kolmogoroff	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	Chi-Cuadrado	---	---	---	---	---	---
	ECMF	0.037	0.0351	0.32	0.337	0.36	0.0651
	ECMV	5.13	5.82	5.31	4.96	5	10.58

Continuación de **Tabla H1**: Pruebas de bondad de ajuste

Bondad de ajuste		LogGauss	Gumbel	GEV	Pearson	LogPearson	Exponencial
<b>Villa Cañás 96 h</b>	<i>Kolmogoroff</i>	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	<i>Chi-Cuadrado</i>	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	<i>ECMF</i>	0.025	0.0254	0.0249	0.0243	0.0237	0.0478
	<i>ECMV</i>	4.73	4.64	3.56	5.19	3.99	7.26
<b>Villa Cañás 120 h</b>	<i>Kolmogoroff</i>	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
	<i>Chi-Cuadrado</i>	---	---	---	---	---	---
	<i>ECMF</i>	0.0385	0.0392	0.0386	0.0374	0.0404	0.0529
	<i>ECMV</i>	7.43	7.54	6.52	6.97	6.68	8.94

SIMBOLOGIA PARA LA BONDAD DEL AJUSTE :

A: SE ACEPTA LA HIPOTESIS.

R : SE RECHAZA LA HIPOTESIS.

SE CONSIDERAN 3 NIVELES DE SIGNIFICACION: 5, 1 Y 0.1 % DE ACUERDO A SU UBICACION DE IZQUIERDA A DERECHA EN EL CARACTER DE CALIFICACION.

--- : EL NUMERO DE INTERVALOS DE CLASE RESULTANTE EN EL TEST DEL CHI-CUADRADO ES MENOR QUE 5