



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

INSTITUTO INTERAMERICANO DE
TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

TESIS

“ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL DEL ACUÍFERO COSTERO DE SAN JOSÉ DEL CABO, BAJA CALIFORNIA SUR, CONSIDERANDO LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA REGIÓN”

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

Presenta:

Marco Antonio López Montoya

Director de Tesis:

Dra. en G. María Vicenta Esteller Alberich

Codirectores de tesis:

Dr. en I. Guillermo Pedro Morales Reyes

Dr. en I. José Luis Expósito Castillo

Toluca, Estado de México, México

MARZO, 2022



IITCA

Resumen

En el noroeste de México se localiza el acuífero de San José del Cabo, en el Estado de Baja California Sur, el cual se encuentra sometido a un crecimiento urbano intenso, siendo dependiente del entorno natural y de la disponibilidad de recursos naturales, además de estar bajo condiciones climáticas áridas y afectado por eventos ciclónicos. Esta situación despertó el interés por estimar la recarga del agua subterránea y evidenciar el comportamiento de las condiciones climáticas que influyen en el proceso de recarga, considerando esta estimación de la recarga como un factor de apoyo en el desarrollo de planes de manejo y conservación de recursos naturales.

Este trabajo de investigación cumplió con el objetivo de estimar la recarga potencial del acuífero costero con clima árido-semiárido de San José del Cabo, considerando métodos apropiados, para relacionar el efecto de la variabilidad climática con la recarga. Es por ello que de entre todos aquellos métodos de estimación de recarga se consideró el método de balance de humedad del suelo como el más idóneo para éste estudio.

La tendencia de la precipitación media anual indico una variabilidad descendente significativa ya que la pendiente de la recta fue de -12.40y el resto del test Mann-Kendall también indico una tendencia significativa decreciente. Para la temperatura máxima, el test Mann-Kendall reporta una tendencia no significativa creciente, y con un valor de $R^2=0.00009$, demostrando que no existe una gran variabilidad en el comportamiento de esta variable. En el caso de la temperatura mínima, el resultado obtenido para el test Mann-Kendall presenta una tendencia no significativa creciente, y con un $R^2=0.4636$, lo que señala una mayor variabilidad en comparación con la temperatura máxima.

El análisis de cambio de uso de suelo reflejo al uso agrícola como el de mayor cambio acaecido en el periodo de 1995 a 2017, aumentando más de la mitad de su área con respecto al total de la superficie de la zona de estudio, incrementándose de 1.88% a 4.09%, mientras que el suelo desnudo presento una disminución de 6.66% a 4.03%. El resto de usos de suelo no presentaron cambios mayores.

Con la inclusión de los eventos meteorológicos extremos (ciclones) se comprobaron las condiciones de recarga en aquellos meses en los cuales la presencia de eventos ciclónicos fue

variada y la precipitación se comportaba de manera distinta en comparación con los años en que la precipitación presenta valores medios. De esta forma, se comprobaron los cambios en el volumen de recarga a nivel mensual en años ciclónicos y en años promedio.

Como resultado de la aplicación del método seleccionado para la estimación de recarga bajo el análisis de variabilidad climática, variabilidad ciclónica y el cambio de uso de suelo, se determinó para 1993 esta recarga fue 381.39 hm³ (5 eventos ciclónicos), para 1997 de 267.05 hm³ (1 evento ciclónico), para 2017 de 21.30 hm³ (1 evento ciclónico) y para 2019 se recargaron 149.91 hm³ (3 eventos ciclónicos). Estos datos permitieron concluir la gran variación que existe en el volumen de recarga al estar influenciada por la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos.

Abstract

In northwestern Mexico, the San José del Cabo aquifer is located, in the State of Baja California Sur, which is subject to intense urban growth, being dependent on the natural environment and the availability of natural resources, in addition to being under arid climatic conditions and affected by cyclonic events. This situation aroused interest in estimating groundwater recharge and evidencing the behavior of climatic conditions that influence the recharge process, considering this estimate of recharge as a support factor in the development of natural resource management and conservation plans.

This research work fulfilled the objective of estimating the recharge of the coastal aquifer with arid-semiarid climate of San José del Cabo, considering appropriate methods, to relate the effect of climatic variability with recharge. That is why, among all those recharge estimation methods, the soil moisture balance method was considered the most suitable for this study.

The trend of the average annual precipitation indicates a significant decrease since the slope of the line was -12.40 and the rest of the Mann-Kendall test also indicates a significant decreasing trend. For the maximum temperature, the Mann-Kendall test reports a non-significantly increasing trend, and with a value of $R^2=0.00009$, demonstrating that there is no great preference in the behavior of this variable. In the case of the minimum temperature, the result obtained for the Mann-Kendall test shows a non-significantly increasing trend, and with $R^2=0.4636$, which indicates a greater scarcity compared to the maximum temperature.

The analysis of change in land use reflected agricultural use as the one with the greatest change that occurred in the period from 1995 to 2017, increasing more than half of its area with respect to the total surface of the study area, increasing from 1.88 % to 4.09%, while bare soil showed a decrease from 6.66% to 4.03%. The rest of the land uses did not present major changes.

With the inclusion of extreme meteorological events (cyclones), the recharge conditions were verified in those months in which the presence of cyclonic events was varied and precipitation behaved differently compared to the years in which precipitation presents

average values. . In this way, the changes in the volume of recharge at the monthly level in cyclonic years and in average years were verified.

As a result of the application of the method selected for the estimation of recharge under the analysis of climatic variability, cyclone variability and land use change, it was determined for 1993 this recharge was 387.39 hm³ (5 cyclone events), for 1997 it was 267.05 hm³ (1 cyclonic event), for 2017 of 21.30 hm³ (1 cyclonic event) and for 2019 149.91 hm³ (3 cyclonic events) were recharged. These data allowed to conclude the great variation in the recharge volume as it is influenced by the occurrence of extreme meteorological events.

Contenido

	Pág.
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Justificación.....	2
1.2. Hipótesis.....	3
1.3. Objetivos.....	3
Capítulo 2. Descripción de la zona de estudio.....	4
2.1. Características generales del Acuífero San José del Cabo.....	4
2.1.1. Localización.....	4
2.1.2. Geomorfología.....	5
2.1.3. Clima.....	6
2.1.4. Geología.....	9
2.1.4.1. Litología.....	10
2.1.4.2. Geología estructural.....	13
2.1.4.3. Secciones geológicas.....	13
2.1.5. Hidrología superficial.....	16
2.1.6. Hidrología Subterránea.....	17
2.1.7. Edafología.....	20
2.1.8. Uso de suelo y vegetación.....	22
2.2. Estudios previos del área de estudio.....	23
Capítulo 3. Marco Teórico.....	26
3.1. Conceptos generales.....	26
3.1.1. Ciclo hidrológico.....	26
3.1.2. Recarga de agua subterránea.....	28
3.1.3. Variabilidad climática.....	30
3.1.4. Fenómenos meteorológicos extremos.....	31
3.2. Métodos de estimación de recarga.....	32
3.2.1. Métodos basados en el balance hídrico.....	33

3.2.2. Métodos con apoyo de la modelación.....	37
3.2.3. Métodos basados en datos de aguas superficiales.....	42
3.2.4. Métodos físicos en la zona no saturada.....	43
3.2.5. Métodos físicos en la zona saturada.....	46
3.2.6. Métodos con trazadores químicos.....	49
3.2.7. Métodos con trazadores de calor.....	50
3.3. Métodos de recarga implementados en México	51
3.4. Marco legal y normativo.....	52
Capítulo 4. Materiales y métodos.....	54
4.1. Selección del método de estimación de recarga.....	55
4.1.1. Modelo conceptual del acuífero.....	55
4.1.2. Comparación de métodos de estimación de recarga.....	57
4.1.3. Insumos requeridos para la aplicación del método.....	62
4.2. Determinación de variabilidad climática.....	67
4.3. Cambios de uso de suelo: revisión y análisis de imágenes satelitales.....	76
4.4. Estimación de la recarga potencial del acuífero San José del Cabo.....	83
4.4.1. Insumos y métodos para la estimación del método de balance de humedad del suelo.....	83
4.4.2. Estimación de recarga potencial.....	104
Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados.....	106
5.1. Selección del o métodos de estimación de recarga.....	106
5.2. Variabilidad climática.....	109
5.3. Cambios de uso de suelo.....	117
5.4. Estimación de recarga del acuífero San José del Cabo.....	129
5.5. Análisis de comportamiento de la recarga con respecto a la variabilidad climática.....	138
Capítulo 6. Presentación de conclusiones y recomendaciones.....	143
Referencias.....	146
Anexos.....	154

Índice de figuras

	Pág.
Figura 2.1 Mapa de ubicación del acuífero San José del Cabo, Estado de Baja California Sur.....	4
Figura 2.2 Mapa de pendientes de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC.....	6
Figura 2.3 Mapa de climas de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC.....	8
Figura 2.4 Mapa de precipitación media anual de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC	9
Figura 2.5 Mapa geológico de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC.....	11
Figura 2.6 Sección Geológica A-A'	15
Figura 2.7 Sección Geológica B-B'	15
Figura 2.8 Mapa de hidrología superficial de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC.....	16
Figura 2.9 Mapa de hidrología subterránea de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC.....	19
Figura 2.10 Mapa edafológico de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC.....	20
Figura 2.11 Mapa de uso de suelo y vegetación de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC.....	22
Figura 3.1 Procesos del ciclo del agua.....	28
Figura 3.2a Curva de retención de agua para arenas y limos.....	45
Figura 3.2b Curva de conductividad hidráulica para arena y limos.....	45
Figura 4.1 Esquema metodológico para evaluar la variabilidad climática sobre el proceso de recarga.....	54
Figura 4.2 Esquema para generar el modelo conceptual hidrogeológico del ASJC.....	56
Figura 4.3 Árbol de decisión para la selección del método de estimación de recarga del ASJC...	58
Figura 4.4 Modelo digital de elevación del ASJC.....	68
Figura 4.5 Modulo “Macro Modeler” de TerrSet con proceso para la obtención del polígono del ASJC.....	69
Figura 4.6 Polígono del ASJC.....	69

Figura 4.7	Mapa ejemplificativo de precipitación anual de 1990 en el ASJC.....	70
Figura 4.8	Mapa ejemplificativo de temperatura máxima anual de 1990 en el ASJC	70
Figura 4.9	Mapa ejemplificativo de temperatura mínima anual de 1990 en el ASJC.....	70
Figura 4.10	Composite_L5_Octubre_1995.....	77
Figura 4.11	Composite_S2_Octubre_2018.....	78
Figura 4.12	SEG2_L5_OCT1995_10.....	78
Figura 4.13	SEG2_SEN2_OCT2018_10.....	79
Figura 4.14	Composite_L5_OCT1995 + SEG2_L5_OCT1995.....	79
Figura 4.15	Composite_S2_OCT1995 + SEG2_S2_OCT1995.....	80
Figura 4.16	Reclasificación de uso de suelo y vegetación de imagen satelital Lansat5, octubre 1995.....	82
Figura 4.17	Reclasificación de uso de suelo y vegetación de imagen satelital Sentinel2, octubre 2018.....	83
Figura 4.18	Mapa ejemplificativo de precipitación media mensual en el ASJC para septiembre del año de 1993.....	84
Figura 4.19	Mapa ejemplificativo de precipitación media mensual en el ASJC para septiembre del año de 1997.....	85
Figura 4.20	Mapa ejemplificativo de precipitación media mensual en el ASJC para septiembre del año de 2017.....	85
Figura 4.21	Mapa ejemplificativo de precipitación media mensual en el ASJC para septiembre del año de 2019.....	85
Figura 4.22	Macro modeler con organización de afiches para obtención de imágenes de temperatura media mensual.....	86
Figura 4.23	Mapa ejemplificativo de temperatura media mensual en el ASJC para septiembre del año 1993.....	86
Figura 4.24	Mapa ejemplificativo de temperatura media mensual en el ASJC para septiembre del año 1997.....	87
Figura 4.25	Mapa ejemplificativo de temperatura media mensual en el ASJC para septiembre del año 2017.....	87
Figura 4.26	Mapa ejemplificativo de temperatura media mensual en el ASJC para septiembre del año 2019.....	87
Figura 4.27	Herramienta Image Calculator con ecuación de imágenes para obtención de valor de f_i	89
Figura 4.28	Mapa ejemplificativo de evapotranspiración mensual en el ASJC para septiembre del año 1993.....	91

Figura 4.29	Mapa ejemplificativo de evapotranspiración mensual en el ASJC para septiembre del año 1997.....	91
Figura 4.30	Mapa ejemplificativo de evapotranspiración mensual en el ASJC para septiembre del año 2017.....	92
Figura 4.31	Mapa ejemplificativo de evapotranspiración mensual en el ASJC para septiembre del año 1993.....	92
Figura 4.32	Mapa de permeabilidad de los suelos del ASJC.....	94
Figura 4.33	Mapa de texturas del ASJC en formato raster.....	95
Figura 4.34	Reclasificación de uso de suelo y vegetación para determinación de <i>Ce</i> de 1995....	96
Figura 4.35	Reclasificación de uso de suelo y vegetación para determinación de <i>Ce</i> de 2018....	97
Figura 4.36	Reclasificación de uso de suelo y vegetación para determinación de <i>Ce</i> de 1995 en formato raster.....	98
Figura 4.37	Reclasificación de uso de suelo y vegetación para determinación de <i>Ce</i> de 2018 en formato raster.....	98
Figura 4.38	Modelo digital de elevación.....	98
Figura 4.39	Mapa de pendientes del ASJC.....	99
Figura 4.40	Herramienta Image Calculator con ecuación de imágenes para obtención de coeficiente de escurrimiento.....	100
Figura 4.41	Coeficiente de escurrimiento de 1995.....	101
Figura 4.42	Coeficiente de escurrimiento de 2018.....	102
Figura 4.43	Mapa ejemplificativo de escurrimiento mensual en el ASJC para septiembre del año 1993.....	102
Figura 4.44	Mapa ejemplificativo de escurrimiento mensual en el ASJC para septiembre del año 1997.....	103
Figura 4.45	Mapa ejemplificativo de escurrimiento mensual en el ASJC para septiembre del año 2017.....	103
Figura 4.46	Mapa ejemplificativo de escurrimiento mensual en el ASJC para septiembre del año 2019.....	103
Figura 4.47	Herramienta Image Calculator con ecuación de imágenes para obtención de recarga mensual del ASJC.....	104
Figura 4.48	División de áreas geográficas para explicar la variabilidad espacial de la recarga para los años 1993, 1997, 2017 y 2019.....	105
Figura 5.1	Modelo conceptual hidrogeológico del ASJC.....	108
Figura 5.2	Comportamiento de la precipitación anual en el ASJC para el periodo de 1990-2019.....	110

Figura 5.3	Comportamiento de la temperatura máxima anual en el ASJC para el periodo de 1990-2019.....	111
Figura 5.4	Comportamiento de la temperatura mínima anual en el ASJC para el periodo de 1990-2019.....	112
Figura 5.5	Grafica de representación de anomalías de precipitación anual de 1990 a 2019 en el ASJC.....	114
Figura 5.6	Grafica de representación de anomalías de temperatura máxima anual de 1990 a 2019 en el ASJC.....	115
Figura 5.7	Grafica de representación de anomalías de temperatura mínima anual de 1990 a 2019 en el ASJC.....	115
Figura 5.8	Frecuencia de eventos ciclónicos con influencia en el ASJC.....	116
Figura 5.9	Comportamiento de eventos ciclónicos vs precipitación anual en el ASJC, periodo de 1990-2019.....	117
Figura 5.10	Porcentaje de distribución de uso de suelo y vegetación para octubre de 1993 y octubre de 2018.....	119
Figura 5.11	Comportamiento de precipitación media mensual en el ASJC para los años 1993, 1997, 2017 y 2019.....	120
Figura 5.12	Comportamiento de evapotranspiración mensual en el ASJC para los años 1993, 1997, 2017 y 2019.....	124
Figura 5.13	Comportamiento del escurrimiento mensual en el ASJC para los años 1993, 1997, 2017 y 2019.....	126
Figura 5.14	Mapa de recarga anual acumulada del ASJC para el año de 1993.....	129
Figura 5.15	Mapa de recarga anual acumulada del ASJC para el año de 1997.....	130
Figura 5.16	Mapa de recarga anual acumulada del ASJC para el año de 2017.....	131
Figura 5.17	Mapa de recarga anual acumulada del ASJC para el año de 2019.....	132
Figura 5.18	Representación de la recarga media mensual en hm ³ para los años de 1993, 1997, 2017 y 2019.....	134
Figura 5.19	Comportamiento de variables para el año 1993 en valores medios mensuales.....	139
Figura 5.20	Comportamiento de variables para el año 1997 en valores medios mensuales.....	139
Figura 5.21	Comportamiento de variables para el año 2017 en valores medios mensuales.....	140
Figura 5.22	Comportamiento de variables para el año 2019 en valores medios mensuales.....	140
Figura 5.23	Eventos meteorológicos extremos registrados por año vs recarga por el impacto de eventos meteorológicos.....	142

Índice de tablas

		Pág.
Tabla 2.1	Tipos de climas de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC.....	7
Tabla 2.2	Porcentaje de distribución según tipo de suelo en el ASJC.....	21
Tabla 2.3	Uso de suelo y vegetación en el ASJC, y distribución.....	23
Tabla 2.4	Estudios previos realizados y enfocados a la temática del trabajo.....	23
Tabla 4.1	Ventajas y desventajas de los grupos de métodos de estimación de recarga.....	59
Tabla 4.2	Ventajas y desventajas de los métodos de estimación de recarga seleccionados de los grupos de métodos de estimación.....	61
Tabla 4.3	Métodos disponibles para la obtención de evapotranspiración.....	64
Tabla 4.4	Datos obtenidos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para el periodo 1990-2019.....	71
Tabla 4.5	Registros de eventos ciclónicos con precipitación representativa sobre el ASJC....	72
Tabla 4.6	Test's de tendencias estadísticas.....	75
Tabla 4.7	Descripción de la significancia del test Mann-Kendall.....	75
Tabla 4.8	Escenas de imágenes satelitales usadas para clasificación supervisada de uso de suelo y vegetación del ASJC.....	77
Tabla 4.9	Clasificaciones de uso de suelo para el ASJC.....	81
Tabla 4.10	Porcentaje de horas luz o insolación en el día para cada mes del año en relación al número total en un año.....	89
Tabla 4.11	Etapas de desarrollo de cultivo (Kc).....	90
Tabla 4.12	Coefficientes de cultivo (Kc) recomendados por la FAO, adaptados al uso de suelo.....	91
Tabla 4.13	Clasificación textural y grado de permeabilidad del suelo en el área del ASJC.....	93
Tabla 4.14	Reclasificación de uso de suelo y vegetación según Benítez.....	96
Tabla 4.15	Clasificaciones de pendientes dependiendo el porcentaje de inclinación.....	99
Tabla 4.16	Clasificación de pendientes dependiendo el porcentaje de inclinación.....	99
Tabla 4.17	Valores de coeficiente de escurrimiento (Ce).....	100
Tabla 4.18	Valores representativos de coeficiente de escurrimiento (Ce) con valor real.....	101
Tabla 5.1	Resultados de la aplicación del test Mann-Kendall.....	113
Tabla 5.2	Resultados de la revisión de anomalías.....	113

Tabla 5.3	Superficie ocupacional de usos de suelo y vegetación del ASJC, 1995 y 2018.....	118
Tabla 5.4	Aumento o disminución de los usos de suelo y vegetación del ASJC del año 1995 al 2018.....	119
Tabla 5.5	Datos de precipitación mensual de los años 1993, 1997, 2017 y 2019.....	120
Tabla 5.6	Datos de temperatura media mensual de los años 1993, 1997, 2017 y 2019.....	121
Tabla 5.7	Coefficientes de cultivo (<i>Ke</i>) recomendados por la FAO, adaptados al uso de suelo y a la estación del año.....	121
Tabla 5.8	Valores de coeficiente de correlación de temperatura (<i>Kti</i>) de los años 1993, 1997, 2017 y 2019.....	123
Tabla 5.9	Valores de factor climático (<i>fi</i>) de los años 1993, 1997, 2017 y 2019.....	123
Tabla 5.10	Valores de evapotranspiración del cultivo (<i>ETe</i>), para los años de 1993, 1997, 2017 y 2019.....	124
Tabla 5.11	Valores de escurrimiento (<i>ES</i>), para los años 1993, 1997, 2017 y 2019.....	125
Tabla 5.12	Balance de humedad del suelo correspondiente al año 1993.....	127
Tabla 5.13	Balance de humedad del suelo correspondiente al año 1997.....	127
Tabla 5.14	Balance de humedad del suelo correspondiente al año 2017.....	128
Tabla 5.15	Balance de humedad del suelo correspondiente al año 2019.....	128
Tabla 5.16	Recarga potencial a nivel mensual para los años de 1993, 1997, 2017 y 2019.....	133
Tabla 5.17	Recarga a nivel mensual de 1993 conforme a la división de zona montañosa y de valle.....	136
Tabla 5.18	Recarga a nivel mensual de 1997 conforme a la división de zona montañosa y de valle.....	137
Tabla 5.19	Recarga a nivel mensual de 2017 conforme a la división de zona montañosa y de valle.....	137
Tabla 5.20	Recarga a nivel mensual de 2019 conforme a la división de zona montañosa y de valle.....	138

Índice de anexos

		Pág.
Anexo 1	Trabajos de estimación de recarga en México y temas a fines.....	154
Anexo 2	Mapa de trayectoria de eventos ciclónicos con influencia en el ASJC.....	155

Abreviaturas

Acuífero San José del Cabo.....	ASJC
Banda 1, Banda 2, Banda 3, Banda #.....	B1, B2, B3, B#
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.....	CIB
Centro de Investigaciones y Estudios Superiores de Ensenada.....	CICESE
Comisión Nacional del Agua.....	CONAGUA
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.....	CONABIO
Consejo Nacional de Población.....	CONAPO
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.....	CPEUM
Departamento de agricultura de Estados Unidos.....	USDA
Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental.....	FEA
Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua.....	IITCA
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.....	INECC
Instituto Nacional de Estadística y Geografía.....	INEGI
Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.....	IPN-CICIMAR
Latitud-Longitud.....	LATLONG
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente.....	LGEEPA
Metros sobre el nivel medio del mar.....	msnm
Milímetros.....	mm
Modelo digital de elevación.....	DEM
Norma Oficial Mexicana.....	NOM
Organización de las Naciones Unidas.....	ONU
Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentos.....	FAO
Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.....	UNESCO
Organization of the States of America.....	OAS
Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático.....	IPCC
Plano del flujo cero.....	ZFP
Red, Green, Blue.....	RGB
Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.....	SEDATU
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.....	SEMARNAT
Servicio Geológico Mexicano.....	SGM

Servicio Meteorológico Nacional.....	SMN
Shapefile.....	SHP
Sistema de Información Geográfica.....	SIG
Unidades de respuesta hidrológica.....	HRU
United States Geological Services.....	USGS
Universal Transversal de Mercator.....	UTM
Universidad Autónoma de Baja California Sur.....	UABCS
Universidad Autónoma del Estado de México.....	UAEM
Universidad Autónoma de Aguascalientes.....	UAA
Universidad Autónoma de Chihuahua.....	UAC
Universidad Nacional Autónoma de México.....	UNAM
Universal Tranversal Mercator.....	UTM

CAPÍTULO 1

Introducción

El agua es el núcleo de los recursos naturales, y es fundamental para la vida del planeta. La diversidad de sus usos es de gran relevancia, ya sea como un uso doméstico, agrícola e industrial, entre muchos otros. Ante ello, el agua se plantea como un recurso fundamental para la existencia de vida, y la adaptación de los ecosistemas, de ahí la importancia de su estudio.

De acuerdo con UNESCO (2019), el uso de agua en el mundo se ha incrementado en un 1% anualmente a partir de los años 80, y se plantea que aumente a un ritmo parecido hasta el año 2050. Para el año 2019 más de 2,000 millones de personas habitaban en países con gran escasez de agua, y se espera que esta situación sea más grave a causa del cambio climático.

En México, en la parte septentrional, existen regiones con climas áridos y semiáridos que abarcan, aproximadamente, un 31% del territorio, y en donde las precipitaciones varían de los 300 a 500 mm anuales, llegando en algunas áreas a ser de 200 mm o menos (SEMARNAT, 2010). Estas regiones presentan temperaturas anuales medias que oscilan de los 18 a 22°C, y en casos muy extremos la temperatura media alcanza los 28°C.

En estas regiones de clima árido-semiárido se encuentra la península de Baja California, la cual ha presentado problemáticas relacionadas con el abastecimiento de agua, como producto de una alta demanda proporcional al crecimiento poblacional (Greenpeace, 2014). Para el año 2011 la población considerada a nivel mundial era de 7,000 millones de personas, esperando que para el año 2050 se aumente hasta alcanzar 9,700 millones, pudiendo llegar a un pico de crecimiento cercano a los 11,000 millones de habitantes para el año 2100 (ONU, 2019).

La población demanda servicios, en donde el más importante es el abastecimiento de agua el cual se cubre esencialmente con agua subterránea. Esta elevada demanda junto a una limitada recarga del acuífero debido a las pocas precipitaciones ha provocado el descenso de niveles piezométricos; pero la presencia de eventos meteorológicos extremos, como ciclones

tropicales que producen un incremento de la recarga, da lugar a un cierto porcentaje de recuperación del nivel piezométrico (Wurl et al., 2018).

En este contexto, se pretende estimar la recarga de agua en el Acuífero de San José del Cabo (ASJC), en cual está ubicado en la porción costera de la península de Baja California. Con este estudio se busca profundizar en el conocimiento de la recarga del acuífero, mismo que también servirá para entender el comportamiento de la recarga respecto al tiempo.

1.1. Justificación

En escenarios donde el agua es un recurso importante, y existe ausencia de agua superficial, se tiene que recurrir a la explotación de los recursos subterráneos, cuyo volumen está influenciado por diversos factores, uno de ellos es la recarga que es considerada como un proceso complejo y cada vez más difícil de estimar (Alcalá et al., 2012).

Baja California Sur es uno de los estados del Pacífico más expuestos a la ocurrencia de eventos meteorológicos, que producen precipitaciones torrenciales en lapsos de tiempo muy cortos, aunque también se presentan periodos amplios de sequías, aunadas al acelerado aumento en las temperaturas (UABCS et al., 2012).

El ASJC es el más importante de la península de Baja California, siendo una fuente que suministra agua a las ciudades de San José del Cabo y Cabo San Lucas, así como a otras poblaciones. El municipio de Los Cabos contaba con una población de 351,111 habitantes para el año 2020, de acuerdo al censo realizado por INEGI (2020), y de acuerdo con la proyección de la CONAPO para el 2050 se contempla un aumento de 0.55% anual de la población con respecto a la cifra correspondiente de 2015 (CONAPO, 2015).

El ASJC presentó un déficit de $-5.3 \text{ hm}^3/\text{año}$, de recurso extraído de almacenamiento no renovable (CONAGUA, 2020), ocasionando por el incremento poblacional y de las actividades socioeconómicas, que da lugar a una intensa explotación de recursos hídricos subterráneos (Trasviña, 2017).

Considerando las particularidades del sitio descrito anteriormente, el presente trabajo tiene como propósito estimar la recarga del acuífero, mediante el uso de un método apropiado, evaluando la variabilidad climática como factor espacio-temporal que define los posibles

cambios en los valores de recarga del acuífero. Además, la información obtenida servirá para conocer la situación futura de la recarga y la disponibilidad de agua.

1.2. Hipótesis

La recarga en los acuíferos está influenciada por diversos eventos meteorológicos, por lo tanto, la estimación de la recarga potencial del ASJC, basada en la aplicación de un método apropiado, permitirá evaluar el impacto de la variabilidad climática sobre las condiciones de recarga.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Estimar la recarga potencial del acuífero costero de San José del Cabo, a través de métodos apropiados, que permitan comprobar el efecto de la variabilidad climática sobre dicha recarga.

Objetivos específicos

- Obtener, revisar y analizar estudios y datos existentes relacionados con la temática de estudio y las características del acuífero para poder contar con la información necesaria.
- Revisar y analizar métodos de estimación de la recarga para seleccionar el método más apropiado para su aplicación.
- Evaluar y sintetizar la información disponible, incluyendo la revisión y análisis de los regímenes de temperatura y precipitación, y los cambios de uso de suelo, para la aplicación del método de estimación de la recarga potencial seleccionado.
- Estimar la recarga potencial respecto del tiempo considerando escenarios históricos para evaluar su variabilidad.
- Analizar la evolución de la recarga histórica respecto al comportamiento de eventos meteorológicos extremos, para proponer posibles acciones de gestión hídrica.

CAPÍTULO 2

Descripción de la zona de estudio

2.1. Características generales del Acuífero San José del Cabo

2.1.1. Localización

El ASJC, con clave de registro 0319 de CONAGUA, se ubica en la porción sur del Estado de Baja California Sur. Se localiza en su totalidad dentro de los límites del municipio de Los Cabos, y entre las coordenadas geográficas, 23.01 y 23.46 latitud norte y -109.53 y -109.98 longitud oeste, cubriendo una superficie de 1,284 km² (CONAGUA, 2018).

Limita al norte con el Acuífero Santiago, al este con el Acuífero Cabo Pulmo, al oeste con los Acuíferos El Pescadero, Plutarco Elías Calles y Migriño, como límites al suroeste se localiza el Acuífero Cabo San Lucas, mientras que al sureste se encuentra sobre su porción costera el Océano Pacífico (Figura 2.1).

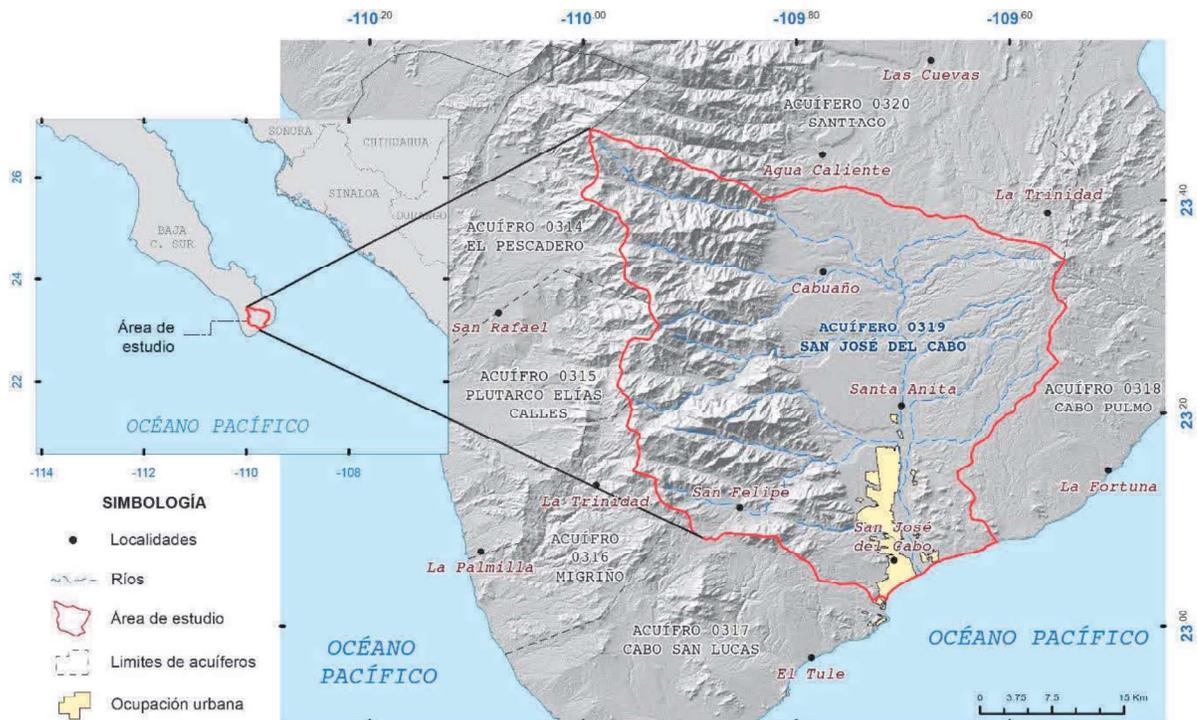


Figura 2.1 Mapa de ubicación del acuífero San José del Cabo, Estado de Baja California Sur (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2018; INEGI, 2001 y 2010).

2.1.2. Geomorfología

Las características geomorfológicas de la región en la que se encuentra el ASJC dependen, fundamentalmente, de factores exógenos modeladores del terreno como el intemperismo, así como las características propias de la litología existente en la cual predominan determinadas geoformas. La Figura 2.2 representa la geomorfología de la región, donde predomina: mesetas, llanuras y lomeríos (SEDATU, 2013).

- *Llanura*: Zonas de relieve casi nulo o nulo. Compuestas de rocas sedimentarias de reciente deposición relacionadas con arroyos procedentes de las serranías.
- *Lomerío*: Este tipo de geoformas suele tener un relieve moderadamente pronunciado por lo cual se encuentra modelado mayormente por efectos erosivos. Los materiales son el resultado de la degradación de rocas existentes de las cercanías.
- *Meseta*: Tipo de estructura elevada de terreno con cima plana de poca inclinación y laderas que tienden a ser acantilados abruptos.

El área conforma una planicie alargada con dirección norte-sur, y está delimitado al oeste por la Sierra La Laguna y al este por la Sierra Agua Escondida-Sierra La Trinidad.

- *Sierra La Laguna*: Se localiza en el extremo sur del Estado de Baja California Sur, extendiéndose desde el municipio de La Paz hasta el municipio de Los Cabos siendo la estructura de mayor altitud del estado con 2,080 msnm (Solís et al., 2015).
- *Sierra Agua Escondida y Sierra La Trinidad*: La Sierra Agua Escondida es la estructura montañosa que se encuentra en la zona oriente del municipio de Los Cabos, siendo la segunda estructura de mayor importancia en el municipio con una altitud máxima aproximada de 740 msnm, en conjunto con ella se integra la Sierra La Trinidad que, aunque es de menor proporción también es representativa del sitio, con una altitud aproximada de 880 msnm (INEGI, 2002).

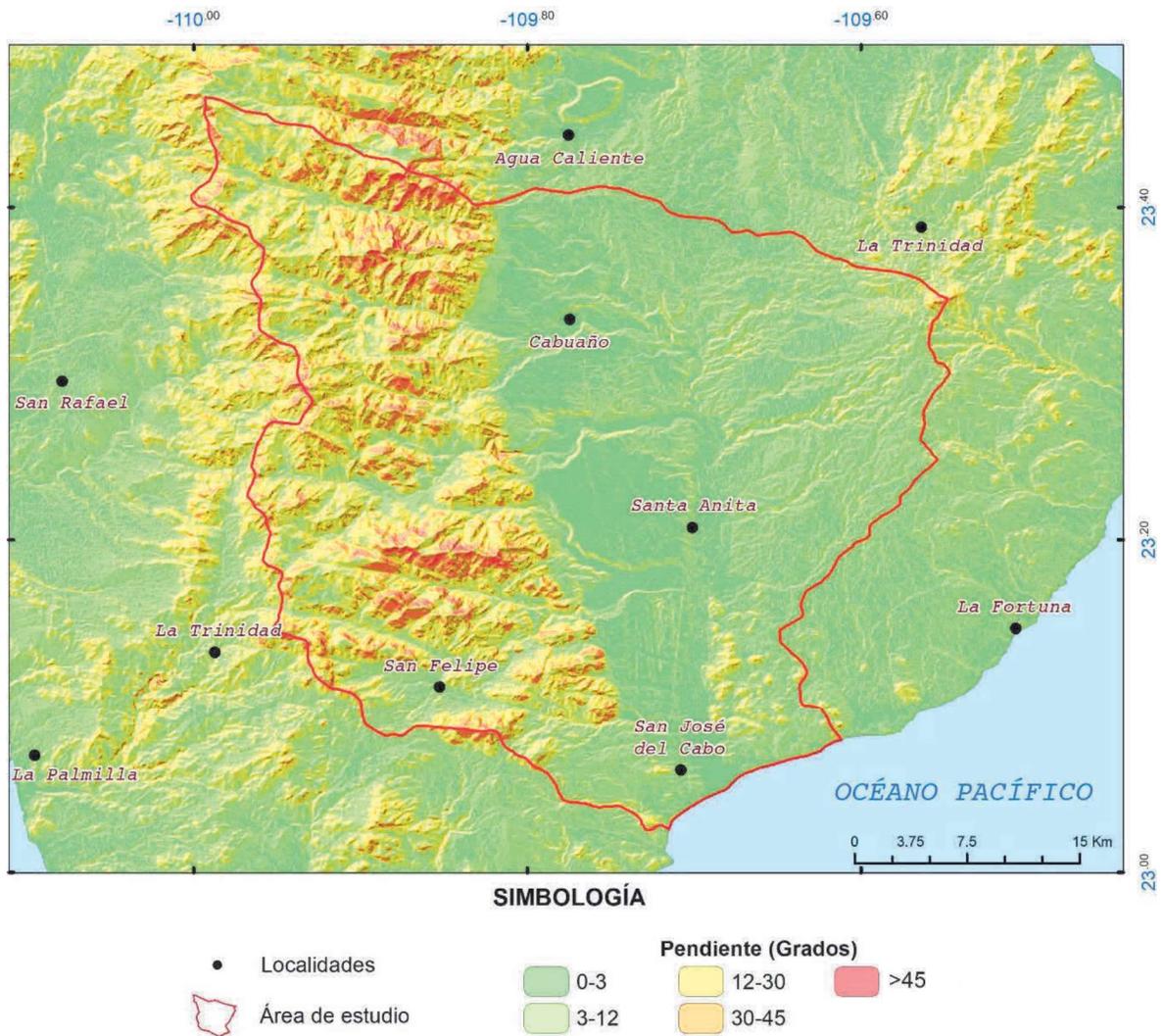


Figura 2.2 Mapa de pendientes de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC (Elaboración propia con base en CONABIO, 2018; Google Earth, 2020; INEGI, 2001 y 2010).

2.1.3. Clima

Los climas predominantes como se observa en la Figura 2.3 son: muy árido, árido, semiárido, cálido, semicálido, templado y subhúmedo, con un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% con respecto al total anual (Tabla 2.1), según la clasificación de climas de Köppen, modificada por García (1998), la cual está adaptada a las condiciones de nuestro país.

La precipitación media anual es de 421.5 mm, fluctuando entre los 230.5 mm a 522.4 mm anuales (Figura 2.4). Es una región en donde los periodos de sequías suelen ser muy amplio, mismos que se ven interrumpidos por la ocurrencia de tormentas tropicales y huracanes, los

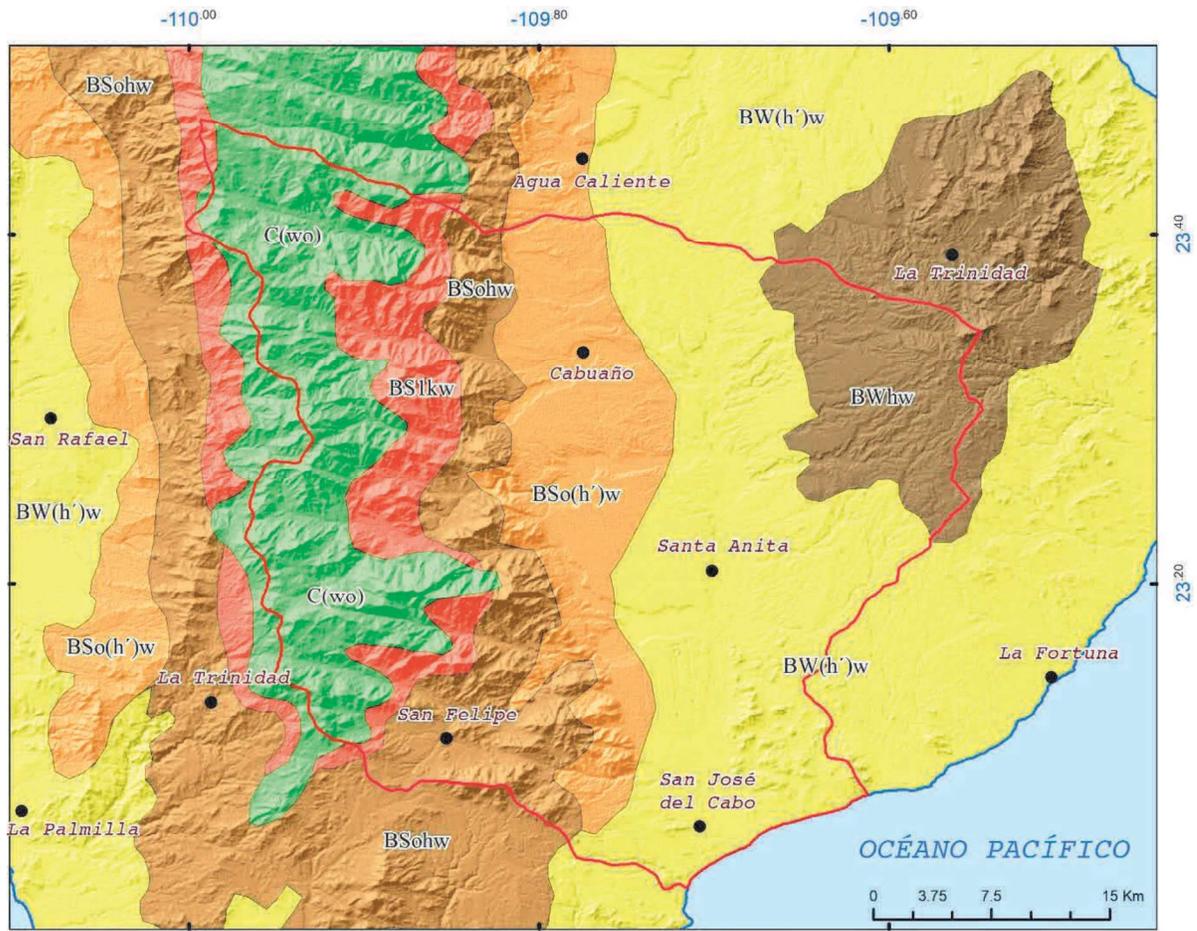
cuales generan intensas precipitaciones que llegan a rebasar las medias anuales generando una rápida recuperación en cuanto a la recarga del acuífero (CONAGUA, 2018).

Respecto a la temperatura se estima un promedio anual de 23.5°C, considerando valores extremos de temperaturas que varían de 42°C con registros en el mes de julio, a los -3°C en el mes de febrero. Para el caso de la evaporación potencial se contempla un valor de 2,131.5 mm anuales con base en datos para San José del Cabo y San Felipe (CONAGUA, 2018).

Tabla 2.1 Tipos de climas de la cuenca Arroyo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC.

Clima	Descripción
BW(h')w	Muy árido, cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
BWhw	Muy árido, semicálido, temperatura media anual entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor a los 22°C, con lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
BSo(h')w	Árido, cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
Bsohw	Árido, semicálido, temperatura entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, con lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anua.
BS1kw	Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C, con lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anua.
C(wo)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente en menos de 22°C, con precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, con lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anua.

Fuente: García (1998).



SIMBOLOGÍA

- | | | | |
|-------------------|-----------|------------|---------|
| ● Localidades | ■ BW(h')w | ■ BSo(h')w | ■ BS1kw |
| ▭ Área de estudio | ■ BWhw | ■ BSohw | ■ C(wo) |

Figura 2.3 Mapa de climas de la cuenca Arrollo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC (Elaboración propia con base en CONABIO, 1998; INEGI, 2001 y 2010).

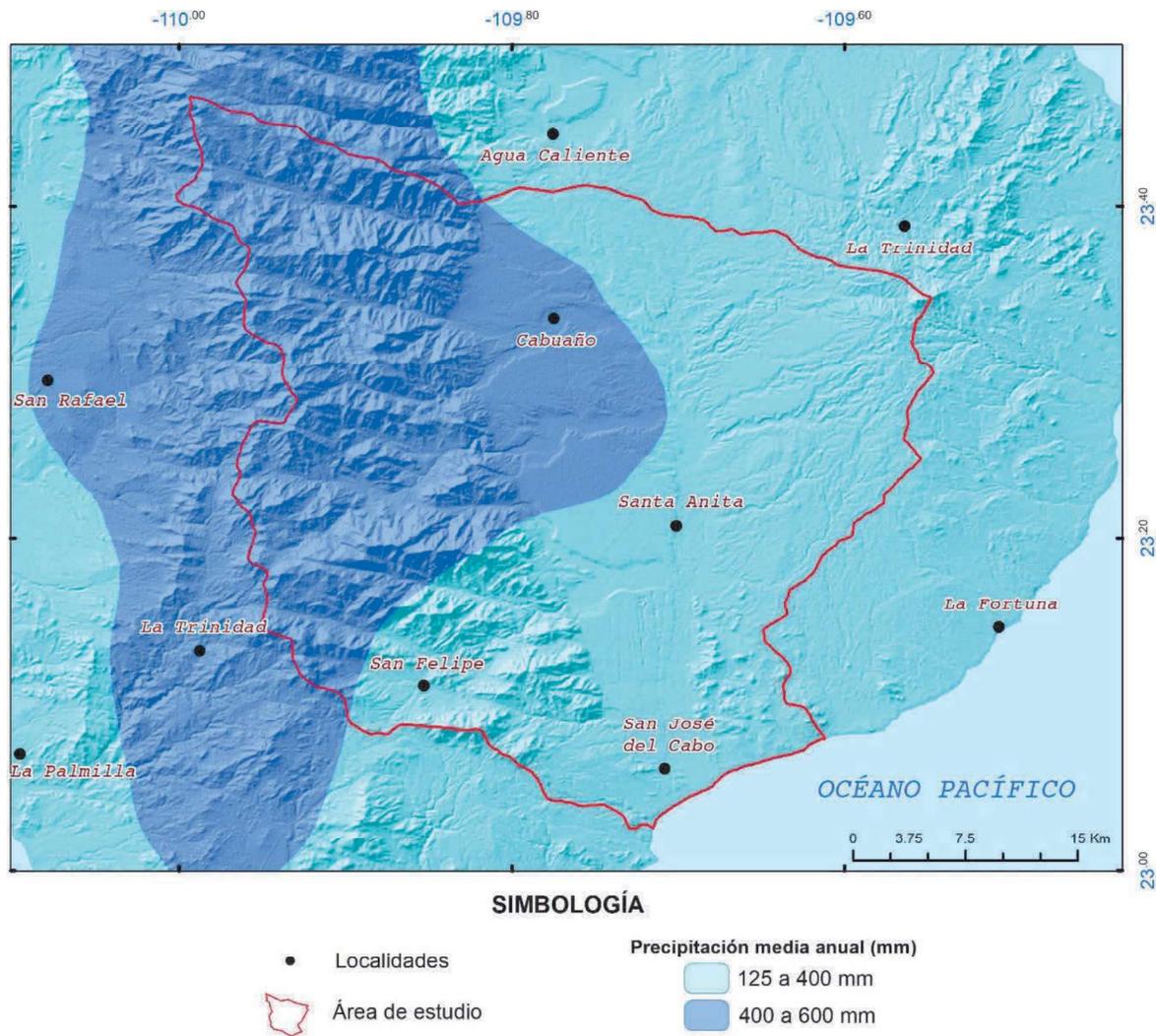


Figura 2.4 Mapa de precipitación media anual de la cuenca Arrollo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC (Elaboración propia con base en CONABIO, 1998; INEGI, 2001 y 2010).

2.1.4. Geología

La geología de la zona de estudio debe de ser considerada dentro de un contexto regional, al entender que la historia tectónica del Golfo de California y provincias peninsulares es muy compleja al ubicarse en el margen continental, resultando en afectaciones de procesos de convergencia y divergencia. En la historia de la península se identifican dos importantes eventos tectónicos regionales, el primero corresponde a la Orogenia Laramide del Cretácico Superior, el cual generó movimientos compresivos a causa del choque de la Placa Farallón con la Norteamericana y que dio origen a la intrusión de grandes masas ígneas marcando el final de la Orogenia Laramide (CONAGUA, 2018).

El segundo evento tectónico se desarrolló desde el Mioceno Medio al Pleistoceno Temprano, cuando se formó el límite entre la Placa Pacífica y la Placa Norteamericana y que, por medio de movimientos oblicuos extensionales en dirección noroeste-sureste, dio origen al Golfo de California modelando el relieve peninsular generando fallas y fracturas, y que provocaron elevaciones significantes en la región y área de estudio (CONAGUA, 2018).

2.1.4.1. Litología

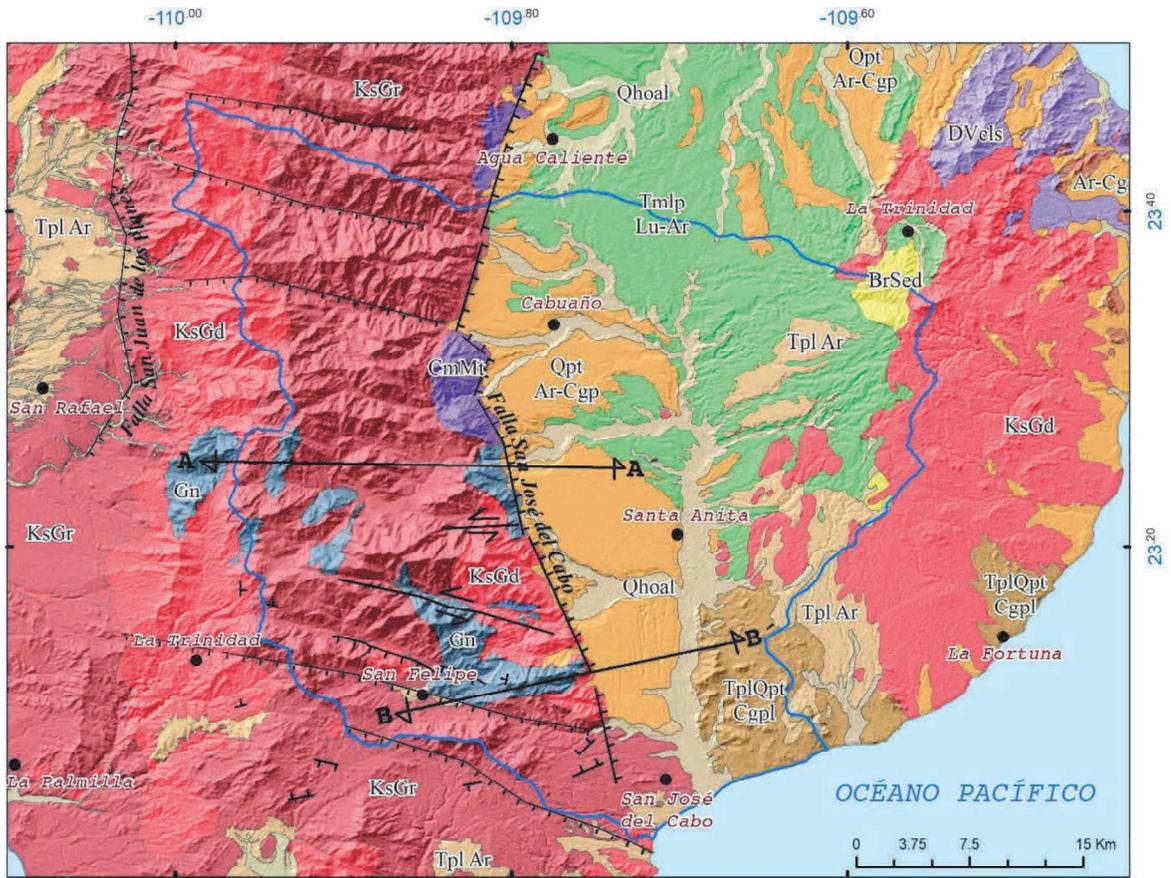
La litológica permite agrupaciones de rocas: ígneas intrusivas y extrusivas, sedimentarias y complejos metamórficos. (SEDATU, 2013).

Las rocas ígneas se integran en la porción de la Sierra La Laguna (granodiorita y granito), y en la parte de la costa con la presencia de los depósitos vulcanoclásticos (Figura 2.5):

- *Granodiorita (ksGd)*. De origen intrusivo, se presentan en los laterales este y oeste del acuífero, con texturas faneríticas de grano medio a grueso, de color gris claro que tiende a ser rosado, compuestas por cuarzos, plagioclasas, feldespato alcalino, biotita y hornblenda, y con una edad correspondiente al Cretácico Superior. Se identifica como granodiorita San Carlos (CONAGUA, 2018).
- *Granito (ksGr)*. Constituye, en su mayoría, la Sierra La Laguna y aflorante en la porción oeste del acuífero. Está compuesto de cuarzo, feldespato y micas, y con una edad del Cretácico Superior (SGM, 2002).
- *Vulcanoclásticos (DVcls)*. Rocas del tipo ígneo extrusivo, y con texturas clásticas, producto de procesos volcánicos.

Las unidades sedimentarias se localizan principalmente en la porción central de la región, en donde se forma el valle entre el acuífero San José del Cabo y el acuífero Santiago (Figura 2.5). Las facies se integran por:

- *Aluvión (Qhoal)*. Se identifica como rocas de reciente formación, generadas por los arrastres de corrientes de agua, mismas que definen los arroyos y ríos.



SIMBOLOGÍA

- Localidades
- ▭ Área de estudio
- ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS
 - Falla de desgarre
 - Sección geológica
 - Falla normal

LITOLOGÍA

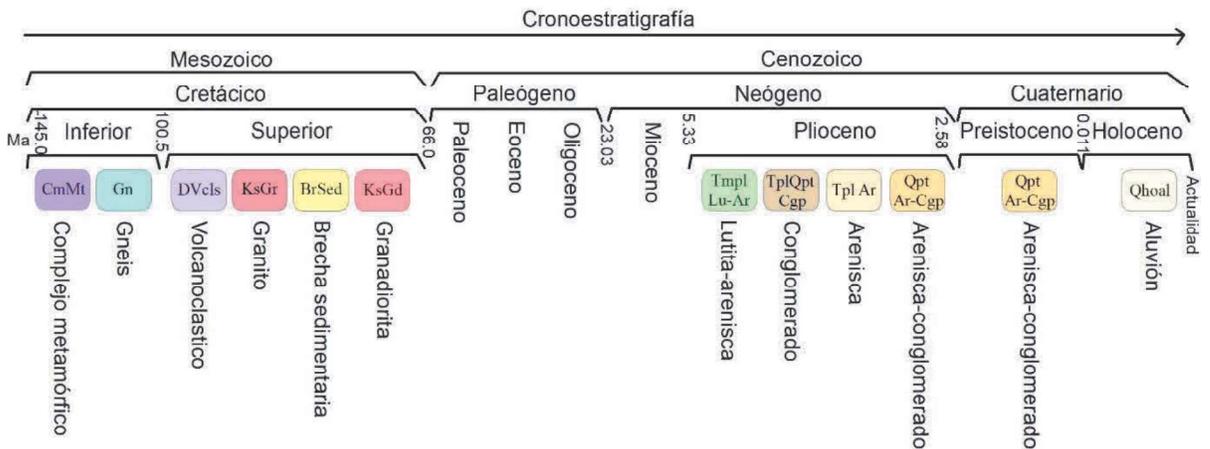


Figura 2.5 Mapa geológico de la cuenca Arrollo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2018; INEGI, 2001 y 2010; SEDATU, 2013; SGM, 2000-2019).

- *Areniscas (Tpl Ar)*. Rocas de tipo detrítico consolidado de colores variables. Al ser rocas de reciente formación se encuentran como rellenos superficiales, o bien como relleno de algunas fracturas.
- *Brecha sedimentaria (BrSed)*. De origen detrítico. Estas rocas se distinguen por estar integradas de clastos procedentes de distintas rocas madres y de tamaños mayores a 5 mm, mal clasificados, con poco contenido de arcillas, limos y clastos, observando la particularidad de que se integran clastos angulosos y redondeados, a diferencia de los conglomerados (SEDATU, 2013).
- *Conglomerado (TplQpt Cgp)*. Roca sedimentaria del tipo detrítico formada mayormente de clastos redondeados de dioritas, monzonitas, tobas dacíticas y andesitas, con tamaños mayores a 2 mm hasta 1 m. Afloran en estratos de espesor potente a mediano con una matriz de arenas cuarcíferas de grano grueso con intercalaciones de arcillas. Están presentes primordialmente en la porción sureste del acuífero (Figura 2.5) (CONAGUA, 2018).
- *Arenisca-Conglomerado (Qpt Ar-Cgp)*. Unidad con una mejor clasificación de clastos en comparación con los conglomerados, y con un mayor contenido de arenas y limos. Se encuentra compuesta de clastos de rocas intrusivas con tamaño de hasta 50 cm cementados por arcillas finas y oxidadas que causan una tonalidad rojiza (CONAGUA, 2018). Además, se identifica una pequeña porción de material metamórfico. Son depósitos terrestres de origen fluvial con una edad aproximada al Pleistoceno (SEDATU, 2013).
- *Lutita-arenisca (Tmpl Lu-Ar)*. Rocas detríticas que se caracterizan por dos fases de deposición, una de componente areno-conglomerático de horizontes marinos de carácter arenoso de grano grueso a medio y otra fase arcillo-arenosa, en la cual se distinguen limos y arcillas plásticas (CONAGUA, 2018). Este tipo de rocas representa un 45%, aproximado, de todas las rocas sedimentarias.

Por último, se identifica el *Complejo metamórfico (CmMt)*: Es la unidad litológica más antigua, integrada por esquistos de biotita y gneis anfibológico que afloran como remanente metasedimentario, y con edad del Cretácico (CONAGUA, 2018). Dicho complejo aflora en la parte centro-oeste del acuífero (Figura 2.5).

2.1.4.2. Geología estructural

En el aspecto geológico estructural de la región la falla San José del Cabo es la más importante, al tener una extensión aproximada de 200 km con dirección irregular aproximada nor-noroeste, norte-sur y noreste (Figura 2.5). La falla se desarrolló bajo un régimen tectónico extensional (Martínez-Gutiérrez y Sethi, 1997). La falla traza el límite entre las rocas sedimentarias del Mioceno-Cuaternario, y el complejo metamórfico de la Sierra La Laguna (Pérez-Venzor, 2013).

La falla generó el rompimiento de las facies de rocas plutónicas y metamórficas dejándolas como piso del actual acuífero de San José del Cabo, permitiendo que sobre estas rocas se depositaran rocas sedimentarias (Camarena, 2015). De acuerdo con Pérez-Venzor (2013), la falla podría dividirse en tres zonas distintivas, al occidente de la falla se identifica la zona de fracturamiento, en la zona intermedia hay brechas de falla características de material fragmentado y triturado sin integración, y al oriente se define una zona proximal de roca molida de manera intensa.

Partiendo de la falla San José del Cabo y hacia el oeste, se encuentra el sistema de fallas del mismo nombre con dirección noroeste-sureste, las cuales buzcan en dirección suroeste y se considera que fueron formadas por los procesos de presión y extensión de manera simultánea, generados por la falla San José del Cabo y la falla San Juan de Los Planes, las cuales presentan buzamientos en dirección nor-noreste (Fletcher y Munguía, 2000).

2.1.4.3. Secciones geológicas

Las secciones geológicas son una representación en plano vertical de una estructura geológica (Gregorio, 2017). Para la realización de estas secciones se partió de las secciones presentadas en la carta Geológico-Minera de San José del Cabo con clave F12-B44 del Servicio Geológico Mexicano (2008), y con apoyo del mapa geológico (Figura 2.5), mismo que se generó a partir de datos de diversas fuentes, obteniendo como resultado las secciones geológicas presentadas en las Figuras 2.6 y 2.7, descritas a continuación.

Sección Geológica A-A' (Figura 2.6)

La sección definida A-A' presenta las coordenadas en A: Lat 23.26, Long -109.98 y en A': Lat 23.24, Long -109.73. Identificada como la unidad más antigua y descrita en la carta geológico-minera (SGM, 2008) se encuentran las rocas metamórficas tipo gneis (Gn). Dichas rocas tienen una edad aproximada del Cretácico Inferior.

Las rocas granodioríticas (KsGd) se encuentran parcialmente presentes en una franja en dirección norte-sur en la parte oeste del acuífero. En la sección trazada también está identificado el Granito Santa María (KsGr). En comparación con las demás rocas de su tipo, son más jóvenes, por lo cual se les atribuye una edad del Cretácico Superior.

En la sección se distingue la falla San José del Cabo, la cual funciona como límite entre unidades de gneis (Gn) y la unidad de arenisca-conglomerado (Qpt Ar-Cgp). Esta última constituye un relleno a partir de la falla y en dirección este.

Sección Geológica B-B' (Figura 2.7)

La sección B-B' presenta las coordenadas en B: Lat 23.18, Long -109.62 y en B': Lat 23.16, Long -109.59. En esta sección se identifican seis unidades, considerando al afloramiento más antiguo a las rocas gneis (Gn), seguido de afloramientos de Granito Santa María (KsGr). La falla lateral dextal, de nombre El Saltito, corta este granito, y en la superficie corta un depósito de rocas sedimentarias de aluvión (Qhoal).

Hacia la parte central de la sección se encuentra marcada la falla San José del Cabo, que de la misma manera en el caso de la sección A-A', corta el afloramiento de granodiorita (KsGd), generando un escalonamiento que se encuentra parcialmente relleno de arenisca-conglomerado (Qpt Ar-Cgp). En el extremo este, existe un afloramiento de conglomerado (TplQpt Cgp), cubierto parcialmente por un depósito de aluvión (Qhoal).

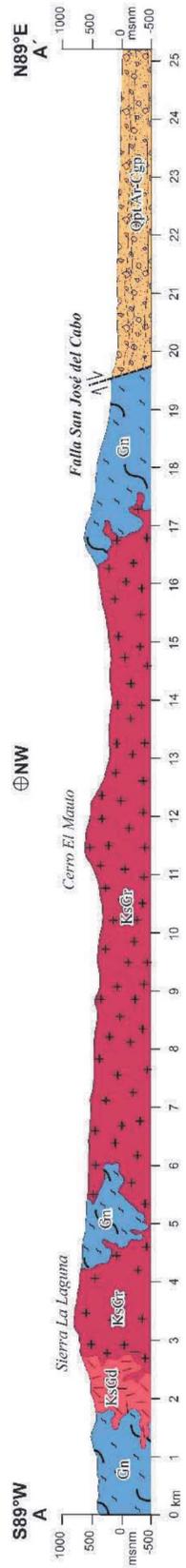
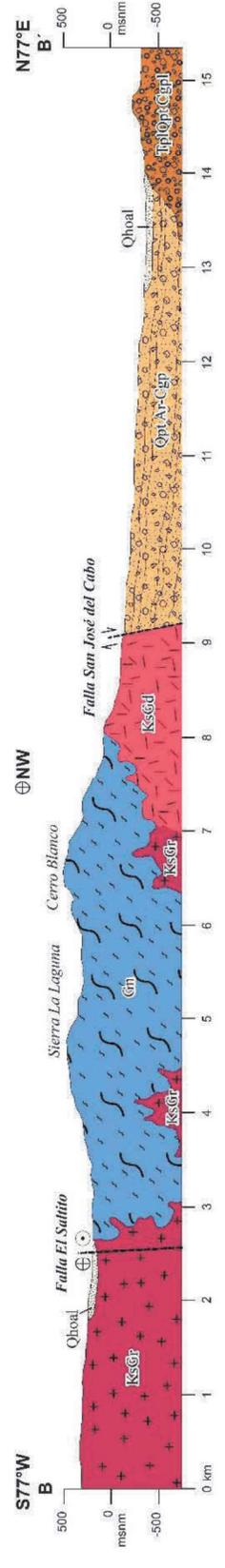


Figura 2.6 Sección geológica A-A' (Elaboración propia con base en SGM, 2008).



SIMBOLOGÍA

- | | |
|---|---|
| Estructuras Geológicas | Litología |
| <ul style="list-style-type: none"> ⊕ ⊙ ⊕ Falla lateral dextal ⊕ ⊕ ⊕ Falla de desgarre ⊕ ⊕ ⊕ Dirección de orientación | <ul style="list-style-type: none"> Aluvión (Qhoal) Arenisca-conglomerado (Opt. Ar-Cgpn) Conglomerado (Tpi Opt. Cgpn) Granito (KsGr) Granodiorita (KsGtd) Gneis (Gn) |

Figura 2.7 Sección geológica B-B' (Elaboración propia con base en SGM, 2008).

2.1.5. Hidrología superficial

El ASJC se posiciona en dos Regiones Hidrológicas (Figura 2.8), la primera se ubica en su porción oeste identificada como la Región Hidrológica No. 3, Baja California Suroeste (Magdalena), cuenca Arrollo Caracol-Arroyo Candelaria, y para el caso de su porción central y hacia el este se encuentra en la Región Hidrológica No. 6, Baja California Sureste, cuenca La Paz-Cabo San Lucas (CONAGUA, 2020).



Figura 2.8 Mapa de hidrología superficial de la cuenca Arrollo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC (Elaboración propia con base en INEGI, 1998, 2001 y 2010).

En la zona de estudio se cuenta con pocas o nulas corrientes de agua superficial, y la mayoría de los arroyos solamente presentan caudal en temporadas de lluvias con volúmenes de agua significativos. En la Figura 2.8 se identifican las corrientes superficiales más importantes como son: El Saltito, San Lázaro, Santa Anita, San Miguelito, La Palma, Caduaño, Boca de la Sierra, El Guayparín y El Peyote, todos ellos arroyos contribuyentes del Arroyo San José, mismo que desemboca en el Océano Pacífico (CONAGUA, 2018, 2020).

En la parte centro-sur del acuífero se encuentra la Presa San Lázaro, ubicada sobre el arroyo del mismo nombre, la cual cuenta con una capacidad de almacenamiento aproximada de 10.70 hm³. Durante eventos extremos funciona como barrera protectora, para las poblaciones cercanas, de los afluentes torrenciales y como barrera que propicia la recarga de agua hacia el acuífero (CONAGUA, 2018, 2020).

2.1.6. Hidrología subterránea

El ASJC se integra, en su parte superior, por materiales sedimentarios del Cuaternario no consolidados mientras que en su parte inferior está constituido de rocas ígneas y metamórficas que presentan fracturamiento y alteración (CONAGUA, 2018, 2020).

Estos materiales corresponden a dos unidades hidrogeológicas, la primera caracterizada por materiales fracturados formando el piso del acuífero, mientras que la unidad superficial se compone de materiales porosos.

- *Unidad Fracturada:* Esta unidad corresponde a las unidades geológicas ígneas y metamórficas, tales como: Granito del Cretácico Superior (KsGr), Granodiorita del Cretácico Superior al Terciario (KsGd), Gneis del Cretácico Inferior (Gn), depósitos vulcanoclásticos del Cretácico Superior (DVcls) y Complejos metamórficos del Cretácico al Terciario (CMT). En la porción central del acuífero, esta unidad fracturada se encuentra bajo la unidad porosa (sedimentaria), la cual se distribuye hacia el este y oeste.

La permeabilidad de esta unidad se considera elevada debido a los sistemas de fallas y fracturas que la atraviesan en múltiples direcciones, comportándose como la unidad de aporte de recarga horizontal a la unidad porosa.

- *Unidad Porosa:* Comprende las unidades de: Aluvión de reciente formación (Qhoal), Arenisca del Plioceno Superior (TplAr), Brecha sedimentaria del Cretácico (BrSed), Arenisca-Conglomerado del Pleistoceno en superficie y Plioceno en el subsuelo (Qpt Ar-Cgp), Lutita-Arenisca del Plioceno (Tmpl Lu-Ar) y Conglomerados del Plioceno (TplQpt Cgp). Al ser una unidad de composición sedimentaria se considera que tiene una permeabilidad excelente a media y con alta capacidad de almacenamiento de agua (SGM, 2008).

La unidad porosa se distribuye a lo largo de todo el valle principalmente desde el Acuífero Santiago y partiendo de la mitad del ASJC en dirección este. Al ser la unidad con mayor capacidad de almacenamiento es la más atractiva para la extracción de agua subterránea, localizándose pozos de extracción distribuidos en las periferias de los arroyos más importantes.

Respecto a las profundidades del nivel de agua subterránea con base en información piezométrica para el periodo 1990-2011, se registran valores de 2.0 a 25 m, los cuales están relacionados directamente con la topografía, al reconocerse los niveles de menor profundidad cercanos a la costa y en aumento conforme se avanza al norte (CONAGUA, 2018).

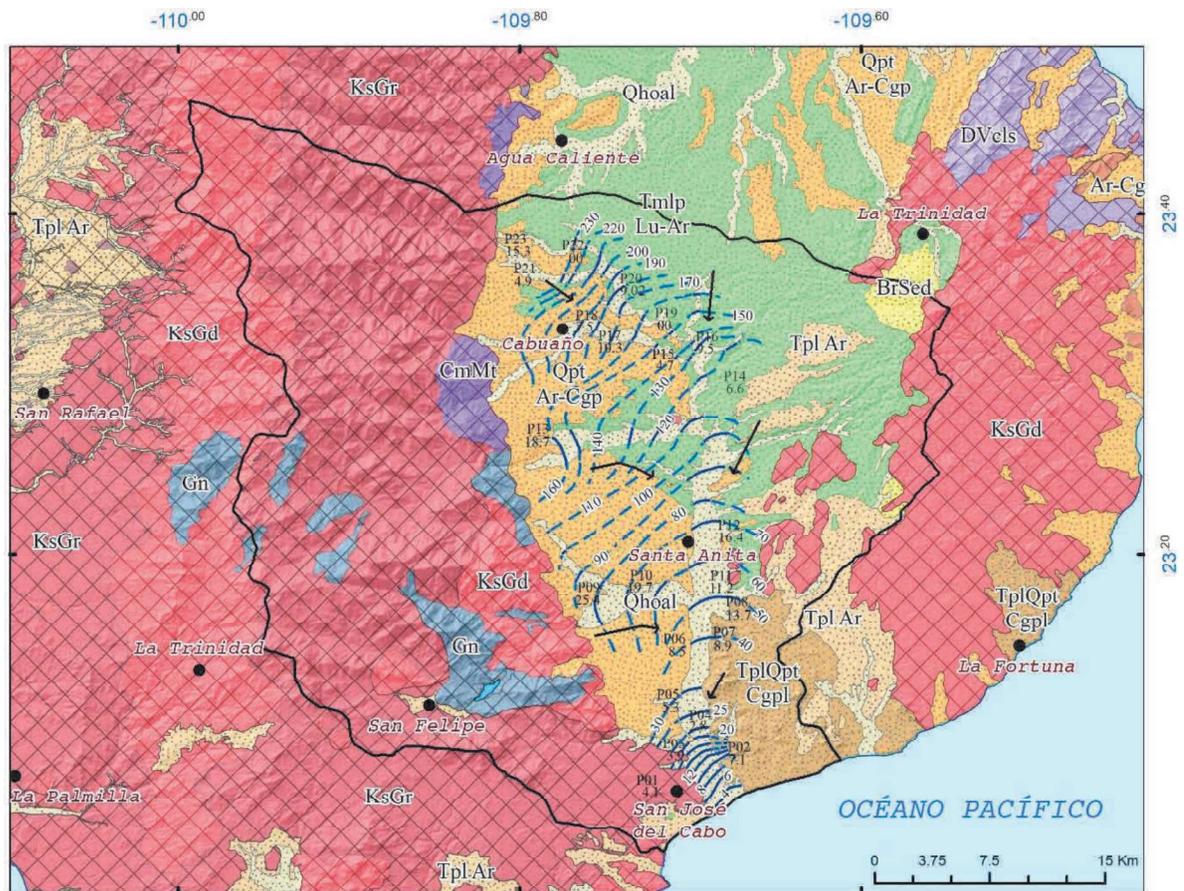
La configuración piezométrica del acuífero indica que la dirección de flujo de agua subterránea es norte-sur limitándose al oeste por la Falla San José del Cabo y al este por la Sierra Trinidad y la Sierra Agua Escondida (Figura 2.9).

De acuerdo con el modelo conceptual para el acuífero elaborado por CONAGUA (2018), la recarga de agua está dada por la influencia del efecto de infiltración de lluvia que precipita sobre la unidad porosa produciéndose una recarga vertical y sobre las zonas montañosas que delimitan el acuífero, que generan una recarga por flujo horizontal subterráneo.

De acuerdo con la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua en Baja California Sur en el año 2011, se tenían en registro 406 aprovechamientos de agua, mientras que para el año 2018 se contabilizaron 266 aprovechamientos activos y 140 inactivos.

Se estima un volumen de extracción de 29 hm³ anuales, de los cuales 22 hm³ (75.9% con respecto al total del volumen extraído) tienen como finalidad cubrir el uso público-urbano, 6

hm³ (20.7%) se destinan a la agricultura, 0.5 hm³ (1.7%) a servicios y 0.5 hm³ (1.7%) para uso pecuario-domestico (CONAGUA, 2018).



SIMBOLOGÍA

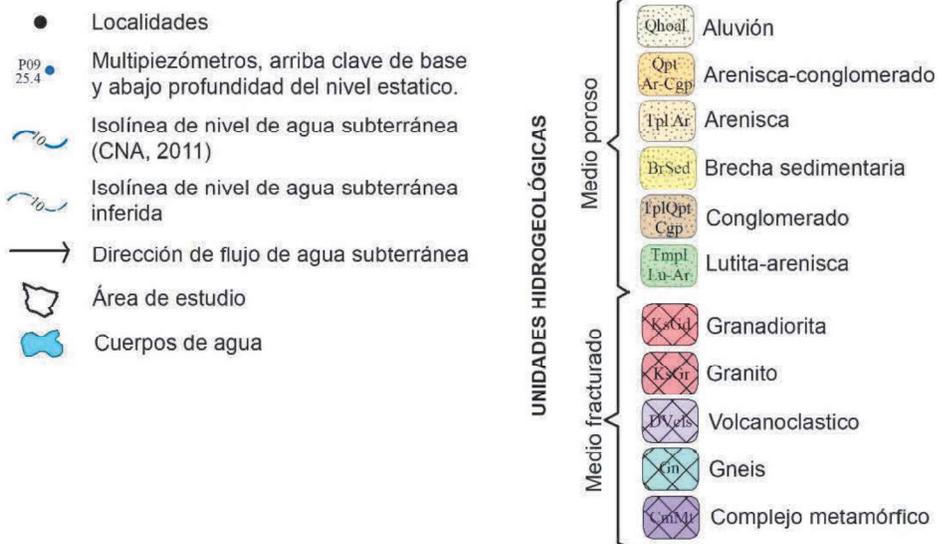


Figura 2.9 Mapa de hidrología subterránea de la cuenca Arrollo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC (Elaboración propia con base en CONABIO, 1998; SGM, 2008, CNA, 2011).

2.1.7. Edafología

En la región del ASJC se identifican los siguientes tipos de suelo con base en la clasificación de la FAO (2008) como los más representativos: Fluvisol, Phaeozem, Solonchak, Calcisol, Regosol y Leptosol. En la Figura 2.10 se observa su distribución espacial mientras que en la Tabla 2.2 se evidencia su extensión en porcentaje para el ASJC.

- *Leptosol*: Es suelo muy somero sobre roca continua con menos del 20% en volumen de material fino. Se desarrolla principalmente en ambientes de altitud media o alta con topografía fuertemente disectada, y con desarrollo en áreas de fuerte erosión. Este tipo de suelo es el que cubre la mayor superficie de la zona de estudio.

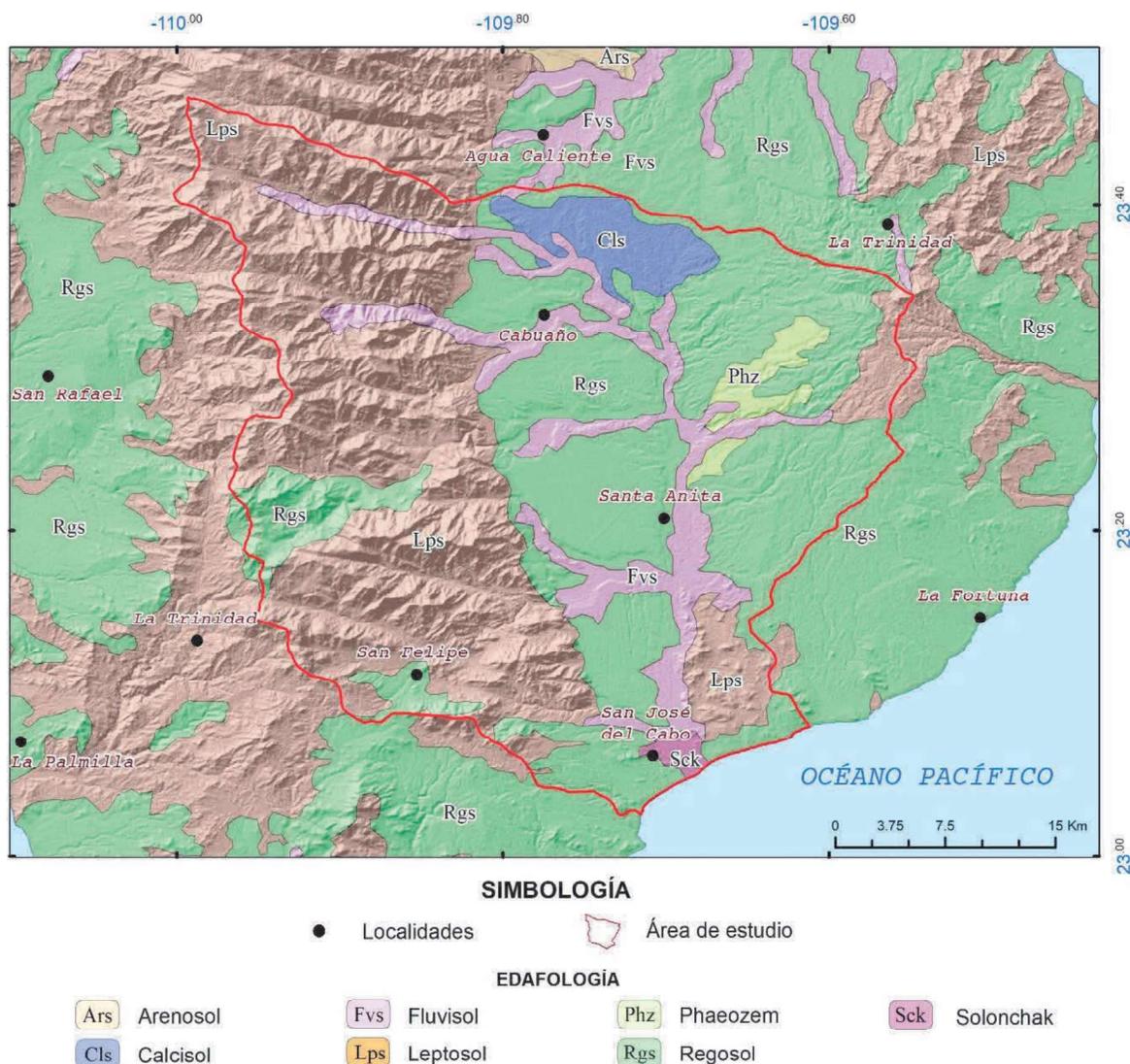


Figura 2.10 Mapa edafológico de la cuenca Arrollo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC (Elaboración propia con base en INEGI, 2001, 2014 y 2010; SEDATU, 2013).

Tabla 2.2 Porcentaje de distribución según tipo de suelo en el ASJC.

Tipo de suelo	Porcentaje representativo (%)
Fluvisol	10.64
Phaeozem	2.16
Solonchak	0.72
Calcisol	3.61
Regosol	39.53
Leptosol	41.51
No identificable	1.8

Fuente: Elaboración propia con base en SEDATU (2013) e INEGI (2014).

- *Regosol*: Suelos débilmente desarrollados procedente de material no consolidado de grano fino. Depositados en ambientes áridos y regiones montañosas, particularmente en playas y dunas. Es el segundo tipo de suelo que ocupa mayor porción de territorio en el acuífero, presente a partir de la Falla de San José del Cabo hacia el este.
- *Fluvisol*: Son suelos genéticamente jóvenes y presentes en ambientes de planicies aluviales, abanicos de ríos, valles y marismas costeras. Se caracteriza por estar formado de materiales de reciente deposición fluvial, lacustre y marino alternando capas de estratificación débil de arena con gravas redondeadas, y con rasgos redoximórficos en la parte inferior del perfil. Suelen ser suelos muy poco desarrollados de estructura débil.
- *Phaeozem*: Se presenta únicamente en el noreste. Corresponde a pastizales relativamente húmedos y en regiones forestales en clima moderadamente continental, que como característica principal suele tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes.
- *Solonchak*: Suelo con la particularidad de un alto contenido de sodio, comúnmente con cloruro y fosfato, y de material no consolidado. Con presencia en zonas climáticas áridas, semiáridas y costeras.
- *Calcisol*: Asociado a climas áridos-semiáridos, que constituye depósitos aluviales, coluviales o eólicos, con altas acumulaciones de materiales calcáreos. Dicho tipo de suelo se presenta en ambientes de pendientes llanas y colinas, en donde la vegetación suele ser escasa y dominada por arbustos y árboles xerófilos y/o pastos efímeros. (Figura 2.10).

2.1.8. Uso de suelo y vegetación

De acuerdo con el Atlas de Riesgos Naturales del municipio de Los Cabos (SEDATU, 2013) y CONABIO (INEGI, 1997), se identifican 9 tipos de usos y un carácter no identificable (Figura 2.11): Bosque de encino-pino, bosque de encino, matorral desértico rosetófilo, mezquital desértico, matorral sarco-crasicaule, pastizal cultivado, agricultura de riego, cauces hidrológicos y zona urbana.

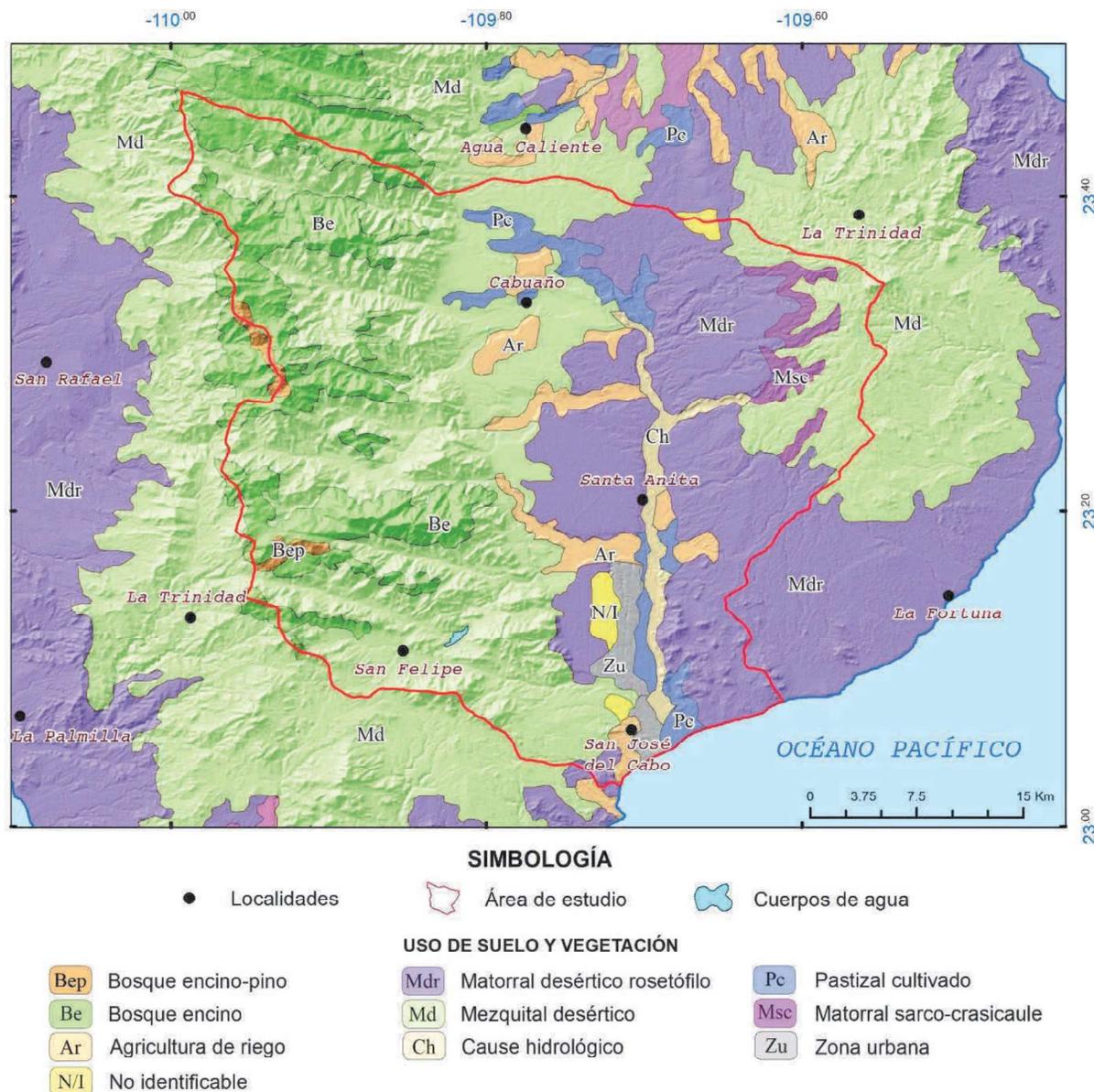


Figura 2.11 Mapa de uso de suelo y vegetación de la cuenca Arrollo Caracol-Arroyo Candelaria donde subyace el ASJC (Elaboración propia con base en INEGI, 1997; SEDATU, 2013).

La Tabla 2.3 indica los porcentajes respectivos de ocupación para cada uno de los tipos de usos en el ASJC. Dentro de las actividades de mayor impacto, se contempla el desmonte y pérdida de vegetación, producto de actividades agrícolas y el continuo desarrollo de áreas urbanas y de producción.

Tabla 2.3 Uso de suelo y vegetación en el ASJC, y distribución.

Clase	Tipo	(%)	Distribución
Uso de suelo	Agricultura de riego	4.69	Centro del acuífero conforme a los cauces de arroyos
	Zona urbana	1.87	En la parte centro-sur del acuífero
	Cauce	2.16	Trazan el centro del acuífero
Vegetación	Bosque encino-pino	0.54	Parcialmente en las zonas altas de la Sierra La Laguna
	Bosque encino	12.02	Se desarrolla en partes de altas de la sierra con mayor presencia que el Bosque de encino
	Matorral desértico rosetófilo	23.93	Cubre casi en su totalidad el valle del acuífero
	Matorral sarco-crasicaule	2.09	Partes medias de la Sierra La Trinidad y la Sierra Agua Escondida
	Mezquital desértico	48.2	Parte del centro del acuífero hacia zonas altas de ambas sierras
	Pastizal cultivado	3.6	Parte norte y sur cercano a los cauces de arroyos
	No aplicable	0.9	Zona sur

Fuente: Elaboración propia con base en SEDATU (2013).

2.2. Estudios previos del área de estudio

En materia de estimación de la recarga de agua subterránea en el área de estudio se encuentran algunos documentos que hacen alusión a la situación del ASJC (Tabla 2.4).

Tabla 2.4 Estudios previos realizados y enfocados a la temática del trabajo.

Trabajos previos realizados	Fuente
Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San José del Cabo (0319)	CONAGUA, 2018
Baja California sur ante el cambio climático: vulnerabilidad, adaptación y mitigación	UABCS et al., 2013
Morfometría en la cuenca hidrológica de San José del Cabo, Baja California Sur, México.	Martínez y Díaz, 2011
Estimación de la recarga y balance hidrológico del acuífero La Paz, Baja California Sur, México.	Cruz et al., 2013a
Precipitación y recarga en la cuenca de la Paz, Baja California Sur, México.	Cruz et al., 2013

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los más relevantes destaca el documento de “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San José del Cabo (0319)” del año 2020, emitido por CONAGUA, mismo que detalla las ecuaciones implementadas para determinar la

disponibilidad media anual de agua, basándose en el método de la ecuación de balance presentado en la NOM-011-CONAGUA-2015 (Ecuación 2.1) (DOF, 2015).

Dicha ecuación se planteó para el periodo 2010-2011, abarcando 100 km², determinando la diferencia entre la suma total de entradas (Recarga) menos la suma total de salidas que se generan en el área (Descargas), mismas que darán como resultado un valor representativo de ganancias o pérdida de almacenamiento de agua en el acuífero. En este estudio no se abordó la estimación de recarga vertical por infiltración de agua de lluvia, si no que esta se calculó despejando este parámetro de la ecuación de balance.

$$Rv = B + Sh + ETR + Dm + \Delta V(S) - Eh - Ri \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

- *Rv* es la recarga vertical,
- *B* es el bombeo, igual a 29.0 hm³/año,
- *Sh* son las salidas por flujo horizontal, igual a 4.0 hm³/año.,
- *ETR* es la evapotranspiración, igual a 1.1 hm³/año.,
- *Dm* es la descarga por manantiales, igual a 5.7 hm³/año.,
- $\Delta V(S)$ es el cambio en el volumen almacenado, igual a 3.9 hm³/año.,
- *Eh* son las entradas subterráneas por flujo horizontal, igual a 30.0 hm³/año.,
- *Ri* es la recarga inducida, igual a 5.6 hm³/año.

Sustituyendo:

$$Rv = 29.0 + 4.0 + 1.1 + 5.7 + 3.9 - 30.0 - 5.6 = 0.3 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Considerando la recarga total (*RT*), esta estará definida por la suma de las entradas:

$$\begin{aligned} RT &= Rv + Eh + Ri \\ Rv &= 0.3 + 30.0 + 5.6 \\ Rv &= 35.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Otro caso de estudio es el de Martínez y Díaz (2011) enfocado a la morfometría y cartografía geológica para la cuenca de San José del Cabo con el propósito de determinar áreas potenciales de recarga, utilizando para ello métodos de percepción remota y sistemas de información geográfica. Se señala como primordial la recarga de agua a través de los medios fracturados, sin embargo, se especifica que deben de realizarse estudios de conductividad hidráulica para determinar con mayor precisión el potencial de recarga de la cuenca, contemplando una cuantificación de la misma.

En el trabajo realizado por la Universidad Autónoma de Baja California Sur en conjunto con la SEMARNAT, el CIB, el CICESE, el INECC, el IPN y el CINAMAR, para el año 2012, titulado “Baja California Sur ante el cambio climático: vulnerabilidad, adaptación y mitigación”, se describen las modificaciones aceleradas de las condiciones naturales de un medio, provocado por el cambio climático. El trabajo se plantea como un recurso de utilidad para determinar vulnerabilidad actual y futura en todos los sistemas.

En el ámbito regional se identifican estudios para la estimación de recarga de agua subterránea para el Acuífero de La Paz, trabajo realizado por Cruz et al. (2013^a y 2013^b), en donde se emplea el método de flujo subterráneo/balance hidrológico. Debido al método de uso se implementan parámetros de recarga adicional como: la recarga de intrusión marina, recarga por riego y la descarga subterránea.

En los estudios de Cruz et al. (2013^a_b) para el Acuífero de La Paz, se determina una superficie de 200 km², para el balance anual del año 2004. El balance se detalla en la ecuación 2.3.

$$\Delta\alpha = (Rv + Rr + Ra + Rh + Rim) - (Ds + Ep) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

- $\Delta\alpha$ es el cambio de almacenamiento,
- Rv es la recarga vertical, igual a 1.33 hm³/año,
- Rr es la recarga por riego, igual a 3.11 hm³/año,
- Ra es la recarga artificial, igual a 0,
- Rh es la recarga horizontal, igual a 16.81 hm³/año,
- Rim es la entrada por intrusión marina, igual a 1.73 hm³/año,
- Ds es la descarga de agua subterránea, igual a 1.90 hm³/año,
- Ep es la extracción de agua por pozos, igual a 30.78 hm³/año.

Sustituyendo:

$$\Delta\alpha = (1.33 + 3.11 + 0 + 16.81 + 1.73) - (1.90 + 30.78)$$

$$\Delta\alpha = 22.98 - 32.68$$

$$\Delta\alpha = -9.70 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$$

CAPÍTULO 3

Marco Teórico

3.1. Conceptos generales

3.1.1. Ciclo hidrológico

Se ha identificado al ciclo hidrológico como componente esencial del funcionamiento del sistema climatológico, al relacionar directamente interacciones entre la atmósfera y la superficie terrestre, ya que proporciona mecanismos de retroalimentación para el transporte, almacenamiento e intercambio de masas y energía (UNESCO, 2020).

En el contexto del ciclo hidrológico se identifica como los reservorios de agua del planeta a los mares y océanos, existiendo un volumen total de agua de 1,385.98 millones de km³, de lo cual el 97.5% es agua salada y del resto únicamente 0.01% o 104,590 km³ es susceptible para ser usada directamente por el humano. Por otro lado, la escorrentía superficial está representada por 42,784 millones de km³ por año aproximadamente, y es considerada como la fuente renovable debido a que establece conexión entre los procesos del ciclo hidrológico como: precipitación, evaporación, infiltración, colmatación y los propios escurrimientos (Marín, 2017).

La Figura 3.1 evidencia los procesos del ciclo hidrológico, entendiendo a la **precipitación** como el proceso primario, aunque al ser un ciclo este puede tener el inicio en cualquiera de los demás procesos. La precipitación ocurre cuando el vapor de agua que se encuentra contenido en una masa de aire como consecuencia de cambios en la presión y en la temperatura del movimiento de la masa, se reúne en minúsculos núcleos de condensación, generando caída de agua por acción de la gravedad en dirección a la superficie de la tierra, en forma de gotas o cristales de hielo (Díaz et al., 2005).

De acuerdo con Breña y Jacobo (2006) el **escurrimiento** es aquella porción de la precipitación que se desplaza por acción de la gravedad sobre la superficie o bien por debajo de ésta, cuando el suelo o sitio de tránsito alcanza un estado de saturación, generando movimiento del agua y desplazándose hasta llegar a almacenarse momentáneamente.

Como producto de la escorrentía se identifica a una parte del agua que no se ha podido infiltrar bajo la superficie, misma que se conserva en estado de estancamiento o en movimiento en donde se puede generar el proceso de **evaporación**. La FAO (2006) describe a la evaporación como “el proceso físico a través del cual el agua pasa de la fase del estado líquido a gaseoso” (proceso de vaporización), retornando a la atmósfera en forma de vapor. El agua evaporada puede ser proveniente de lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada.

La **evapotranspiración**, por otro lado, es el resultado de la evaporación y la transpiración de las plantas, que ocurren de manera simultánea. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado está determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo (FAO, 2006). La evapotranspiración es entendida como la pérdida de agua generada por la transpiración de la vegetación, más la evaporación del suelo y de la superficie húmeda de la vegetación misma.

La **infiltración** se considera como un proceso secuencial de la precipitación pues no toda la precipitación se almacena en el suelo y se escurre, ya que existe una parte que penetra bajo la superficie del terreno a través de fisuras y poros del suelo. De acuerdo con Schulz y García (2015) la infiltración está influida por diversos factores como la fuerza de gravedad, capilaridad, topografía, contenido de humedad inicial del suelo, porcentaje de vegetación, conductividad hidráulica, topografía, cantidad de precipitación, duración de eventos de precipitación y uso de suelo.

La **condensación** es la etapa en la cual el agua pasa del estado gaseoso al líquido, originado por la presión del vapor de agua, por descensos de temperatura, mediante mecanismos naturales de enfriamiento de la atmósfera, siendo contemplada como el último paso del ciclo.



Figura 3.1 Procesos del ciclo del agua (USGS, 2019).

3.1.2. Recarga de agua subterránea

Campos (1998) considera a la recarga como la cantidad de agua que penetra a través de la superficie del suelo y llega a la capa freática incorporándose al acuífero. El proceso de penetración en el suelo es conocido como infiltración, mientras que la recarga es considerada como la infiltración neta o eficaz, que es aquella que alcanza al acuífero (Valle et al., 2019).

La recarga potencial se considera como aquel volumen de agua proveniente de las precipitaciones que se infiltra en el terreno y una vez atravesase la zona radicular, podría alcanzar o no la zona saturada. La recarga real es la que considera el agua infiltrada que logra alcanzar la zona saturada (Schosinsky, 2006). Dicha recarga de agua subterránea puede expresarse en volumen por unidad de tiempo (Valle et al., 2019).

En el sentido literal se entiende por agua subterránea a toda el agua que se encuentre por debajo de la superficie del suelo, aunque en el contexto de la hidrogeología, se considera agua subterránea únicamente a aquella que alcanza la zona saturada, una vez haya circulado a través de la zona no saturada (Poehls y Smith, 2009).

La recarga puede tener una procedencia múltiple y variada, por lo cual Lerner et al (1990), realiza una clasificación de las fuentes que la generan las cuales son:

- Recarga directa o recarga difusa, generada por agua de lluvia.
- Recarga concentrada o indirecta, consecuencia de cauces perenes, intermitentes y efímeros.
- Flujos laterales, procedentes de otros acuíferos.
- Retornos por irrigación o pérdidas en canales.
- Recarga urbana, a causa de fugas en la red de abastecimiento y alcantarillado.

Healy (2010) y Balek (1988) resaltan la variabilidad espacial y temporal de la recarga como aspecto fundamental en cualquier tipo de cálculo de aproximación en la estimación de la recarga. Señalan que las tasas de recarga varían en el espacio y en el tiempo en forma sistemática.

Healy (2010) considera tres criterios de la variabilidad espacial para la estimación de recarga, lo cual incide en la selección del método para la estimación de recarga a implementar:

- Escala local: permite el uso del o los métodos más precisos para medir componentes individuales, con un volumen de control correspondiente a sitios con dimensiones en rangos de 1 m hasta 1 km.
- Meso-escala: se refiere a una cuenca hidrográfica de mediana a grande, con escala de longitud de 1 a 1,000 km. En muchos de los casos se requiere de información con valores representativos de toda la cuenca.
- Macro-escala: representativa de escalas con longitudes que exceden los 1,000 km. Los estudios que se realizan a esta escala son de naturaleza regional, continental o global, y se usan datos de percepción remota. Esta escala tiene cuestionamientos dado que representa cierta incertidumbre.

La variabilidad temporal de la recarga es una de las dificultades que no se supera a la hora de estimar el valor de la recarga de un acuífero (Custodio et al., 2000).

Balek (1988) define cuatro tipos de recarga según la variabilidad temporal:

- Recarga a corto plazo: ocurre ocasionalmente luego de una fuerte lluvia, y se da en regiones donde no hay estaciones húmedas, y las estaciones secas son muy marcadas.

- Recarga estacional: se produce regularmente durante periodos húmedos en regiones húmedas y secas.
- Recarga perenne: ocurre en ciertos lugares del trópico húmedo donde el flujo de agua descendente es casi permanente y puede producir una recarga continua.
- Recarga histórica: este tipo de recarga se presentó hace mucho tiempo y contribuyó a la formación de los presentes recursos de agua subterránea. Está estrechamente relacionada con lo que se conoce como tiempo de residencia, definido como el tiempo que permanece un volumen determinado de agua en las reservas subterráneas desde que se convirtió en recarga hasta que vuelve a incorporarse al ciclo hidrológico activo.

3.1.3. Variabilidad climática

La meteorología es conocida como la rama de las Ciencias Naturales encargada del estudio físico de la atmósfera, sus propiedades y de los meteoros que se generan en ella (Rodríguez et al., 2004). La climatología se identifica como el estudio de los climas, es decir, el conjunto de condiciones atmosféricas de un sitio (Llasat, 2008).

El clima puede ser dinámico, cambiante y con variaciones influenciadas, por lo general, por la radiación solar que se identifica como el combustible de los procesos atmosféricos (Montealegre et al., 2000).

Dentro de los cambios que propician la variabilidad climática se encuentran, la actividad solar, las grandes erupciones volcánicas, las variaciones en oscilaciones atmosféricas y las variaciones químicas en la atmósfera. Se debe de contemplar como mayores factores a fenómenos como son los frentes fríos, células estacionarias secas, huracanes, perturbaciones tropicales y células con humedad desproporcionada (OAS, 2001).

La variabilidad climática está clasificada de cuatro categorías con base en una escala temporal (Montealegre et al., 2000).

- Estacional: indica fluctuación de clima a nivel mensual, dentro de un ciclo anual, en donde se podrán distinguir estaciones como la primavera, verano, otoño e invierno.
- Intraestacional: es la escala de variabilidad menos estudiada ya que representan variaciones de tiempo de decenas de meses o de uno o dos meses. Generalmente estas variaciones pasan desapercibidas en un análisis de ciclo anual.

- Interanual: es la escala que evidencia variación de un año comparado con otro, en donde se considera, por ejemplo, el cambio de precipitaciones respecto al año anterior fluctuando por abajo o encima de la media.
- Interdecadal: para el caso de la escala interdecadal las manifestaciones en las fluctuaciones se presenta en series de tiempo de décadas. En comparación con la escala interanual, la escala interdecadal suele pasar desapercibida ya que la oscilación es menor.

Muchos métodos para la determinación de variabilidad climática implementan la regionalización de parámetros con el propósito de evitar la toma de datos muy variantes. Un claro ejemplo se muestra cuando en muchos de los casos de estudio, se trazan fronteras de forma abrupta, sin tener en consideración las características geográficas o particularidades que distinguen la región en estudio, definiendo proceso incompletos o inexactos que generan datos inciertos, en comparación con trabajos que llevan a cabo medidas puntuales tomadas en las zonas límites del área, obteniendo así valores más precisos (Balek, 1988).

Comprender conceptos como el de variabilidad climática es vital en el contexto de este trabajo, ya que se deberá de entender como varían las precipitaciones y temperatura, lo cual a su vez incide en la recarga de acuíferos.

3.1.4. Fenómenos meteorológicos extremos

El concepto de fenómeno meteorológico extremo hace referencia a un suceso fuera de lo habitual en un sitio determinado y que estará influenciado de acuerdo con las características propias del sitio (Alanís, 2011). Algunos ejemplos de estos fenómenos son sequías, temperaturas muy altas o bajas, o lluvias muy intensas (Ríos et al., 2013).

Los fenómenos meteorológicos extremos pueden apreciarse en forma de ciclones, tornados, tormentas, y depresiones, todas de larga duración y con características muy marcadas. Estos fenómenos forman parte del funcionamiento natural de la atmósfera, sin embargo, el cambio climático y/o la variabilidad climática provocan que estos eventos sean cada vez más recurrentes y de mayor intensidad en tiempos muy cortos (National Academy of Sciences: The Royal Society, 2014).

Los desastres vinculados a la presencia de estos fenómenos, no simplemente dependerán de su naturaleza, sino también de la exposición y vulnerabilidad del sitio en específico. Estos fenómenos generan pérdidas de patrimonio culturales, económicas y de vidas humanas. En muchos casos las dependencias encargadas de estos estudios carecen de datos o medios para la realización de estudios que promuevan la gestión del riesgo.

Muchos de estos fenómenos han sido observados, analizados y estudiados ampliamente de manera que en la actualidad existen niveles de confianza con los cuales se pueden categorizar a estos dentro de un panorama regional o mundial, sin excluir del todo la idea de que los fenómenos presenten cambios (IPCC, 2012).

3.2. Métodos de estimación de recarga

La escasez de agua subterránea es una de las principales limitantes del desarrollo socioeconómico de regiones áridas, ya que en estas zonas se carece de agua superficial abundante en cantidad y apta en calidad para satisfacer las necesidades. En estas regiones, el sistema acuífero es considerado como la fuente de insumo de mayor importancia (Del Pilar et al., 2013; Scanlon et al., 2010).

Schulz y García (2015) explican que la selección y aplicación de los métodos de estimación de recarga está sujeta a la disponibilidad de datos y a las características regionales y locales. Por lo general la recarga dependerá de:

- Precipitación, en cuanto a su régimen e intensidad.
- Características del suelo: material constituyente, porosidad, tasa de infiltración, grado de humedad, profundidad reticular, usos, etc.
- Componentes climatológicos que determinan la cantidad de agua susceptible de ser evapotranspirada en el suelo: temperatura, radiación, velocidad del viento, etc.
- Tipo de roca, tanto en la zona no saturada como el propio acuífero: conductividad hidráulica, porosidad eficaz, espesor, etc.
- Topografía del terreno.
- Cobertura vegetal, como condicionante de la evapotranspiración, en función de la escorrentía.

La estimación de la recarga suele enfrentarse a condiciones derivadas de las variaciones que tienen estas características y esencialmente, de las climáticas y los cambios de uso de suelo.

Para establecer cuál es el método idóneo para estimar la recarga de un sitio específico, se sugiere el análisis de los distintos métodos, tanto indirectos como directos, con el fin de obtener valores de estimación lo suficientemente confiables (Schulz y García, 2015). A continuación, se detallan estos métodos tomando como principales referencias a Healy (2010) y Vélez (2019).

3.2.1. Métodos basados en el balance hídrico

Los métodos de balance hídrico son los que usualmente contabilizan el movimiento de agua hacia dentro y hacia afuera del acuífero, además, del cambio de almacenamiento dentro de un volumen controlado. Las ecuaciones de estos métodos tienen la ventaja de poder modificarse al eliminarse o agregarse términos, con el propósito de representar peculiaridades de un sistema, además tiene otra ventaja ya que se pueden usar a diferentes escalas de espacio y tiempo.

La ecuación más simple para la estimación de la recarga es la siguiente:

$$R = P - Es - ET - \Delta S \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

- R es la recarga,
- P es la precipitación,
- Es es la escorrentía,
- ET es la evapotranspiración y
- ΔS es el cambio de almacenamiento.

Las ecuaciones de balance brindan información sobre toda la hidrología de un sistema, que además de la recarga también muestra interrelaciones entre la propia recarga y los componentes del balance hídrico.

La principal limitante de las ecuaciones de balance se basa en la precisión de los datos complementarios para el cálculo de la ecuación implementada, es decir que por más pequeña que sea la inexactitud de un dato complementario, esta causará un impacto en una mayor inexactitud de la estimación de la recarga del sistema.

Este tipo de métodos son útiles para generar estimaciones de recarga difusa. Una consideración importante asume que el flujo de agua transita de manera vertical unidimensionalmente a través de la zona no saturada.

A) Métodos de balance hidrológico de humedad del suelo (recarga potencial)

Los modelos de balance de agua en el suelo usualmente se componen de dos elementos: los balances de agua del suelo o la zona en la cual se calcula el drenaje a través de la base de la zona, y un submodelo de transporte del drenaje hacia el acuífero. El drenaje del suelo se estima y expresa mediante la ecuación 3.2.

$$D = P - ET^{uz} - \Delta S^{uz} - R_{off} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

- **D** es el drenaje del suelo,
- **P** es precipitación más riego,
- **ET^{uz}** es la evapotranspiración de la vegetación,
- **ΔS^{uz}** es el cambio de almacenamiento en el suelo y
- **R_{off}** es escorrentía.

Esta ecuación es apropiada por lo general para valores diarios en estimaciones de drenaje, aunque se puede validar para intervalos de tiempo más amplios, como, semanas, meses o años, aunque pueden ocurrir variaciones en las estimaciones debido al intervalo de tiempo.

B) Balance en ríos y canales de agua (recarga potencial)

Este método en particular se puede aplicar en dos formas distintas (Vélez, 2019):

- Medidas de caudal: resulta ser uno de los métodos más sencillos para estimar las pérdidas por transmisión en el trayecto de un canal, ya sea éste natural o de riego logrando estimarlas mediante el balance. La expresión matemática es la siguiente:

$$R = Q_{A.Ariba} - Q_{A.Abajo} + \Sigma Q_{Entra} - \Sigma Q_{Sale} - E - \Delta S / \Delta t \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

- **R** es recarga,
- **Q** es el caudal,

- $Q_{A.Ariba}$ es el flujo-caudal aguas arriba,
 - $Q_{A.Abajo}$ es el flujo-caudal aguas abajo,
 - Q_{Entra} es el flujo-caudal que llega de los arroyos tributarios, efluentes urbanos e irrigación,
 - Q_{Sale} es el flujo-caudal que sale,
 - E es la evaporación de cuerpos superficiales de agua o lechos de río y
 - ΔS es el cambio de almacenamiento en el canal y en la zona no saturada con respecto al tiempo.
- Encharcamiento: para este caso la recarga se estima considerando la medición en la disminución del nivel de agua luego de aislar una sección del canal. Ocurre al tomar en cuenta las pérdidas de evaporación y cualquier precipitación, atribuyendo el descenso en el nivel de agua en el canal a la infiltración, para lo cual la tasa de pérdida por infiltración en determinada longitud de unidad se obtiene con la ecuación 3.4.

$$q = (d_1 - d_2) \left(\frac{W_1 + W_2}{2t} \right) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

- q es la tasa de infiltración por unidad de longitud ($L^3/T/L$),
- d_1 es la profundidad media inicial (L),
- d_2 es la profundidad media después de un tiempo t (L),
- W_1 es el ancho promedio inicial (L) y
- W_2 es el ancho promedio después de un tiempo t (L).

C) Basados en la descarga de una cuenca (recarga real)

En el contexto del método, las descargas de una cuenca podrían ser manantiales, ríos, lagos y mares, en donde cada parámetro puede ser determinado de acuerdo a su naturaleza, por ejemplo, las descargas de los manantiales se pueden medir a partir de aforos y aplicando la corrección por pérdidas en canal; la descarga por ríos se realiza mediante el análisis de hidrogramas; y la descarga a lagos y mares se determina con apoyo de mediciones de conductividad hidráulica (Vélez, 2019).

Este método considera que la descarga promedio de una cuenca es igual a la recarga neta promedio más la tasa de extracción, pero si el acuífero no es explotado, se considera la tasa de extracción como cero, en donde la descarga promedio será igual a la recarga neta promedio.

Para el caso de cuencas en donde las corrientes de agua superficial son abundantes se considera la recarga el igual de las descargas que se generan, de forma que:

$$R = Q_{SubtSale} - Q_{SubtEntra} + Q^{FB} + ET^{subt} + \Delta S^{subt} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

- R es la recarga,
- $Q_{SubtSale}$ es el caudal subterráneo que sale,
- $Q_{SubtEntra}$ es el caudal subterráneo que entra,
- Q^{FB} es el caudal del flujo base de los ríos,
- ET^{subt} es la evapotranspiración ocurrida en el subsuelo y
- ΔS^{subt} es el cambio de almacenamiento subterráneo.

No obstante, la descarga del flujo base no deberá ser igual a la recarga debido a factores como el bombeo, evapotranspiración y flujo hacia acuíferos profundos.

D) De acuerdo con la NOM-011-CONAGUA-2015 (recarga real)

El método de balance hídrico establecido por CONAGUA, en la NOM-011-CONAGUA-2015 (DOF, 2015), especifica los pasos para determinar la disponibilidad media anual del agua subterránea.

La NOM-011 describe que la recarga total del acuífero estará dada para un intervalo de tiempo, con la ecuación 3.6.

$$E = \pm \Delta S + D \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

- E son las entradas,
- D son las descargas y
- ΔS es el cambio de almacenamiento.

Valle et al. (2019) agrupa distintos tipos de recarga de acuerdo con CONAGUA en DOF (2015), en donde las entradas (**E**) son representativos de la recarga total del acuífero, mismas que pueden ser de origen natural o inducida:

- Recarga natural vertical (precipitación).
- Recargas por fugas de tuberías en áreas urbanas.
- Recarga por retorno de irrigación.
- Entradas subterráneas desde otros acuíferos.
- Recarga desde cuerpos de agua superficiales como ríos, presas y lagos.

Las descargas (**D**), es el resultado de la suma de todas las salidas, ya sea de manera natural como: manantiales, desde el acuífero al mar; o artificial como las salidas generadas por el hombre como la extracción.

El cambio de almacenamiento del acuífero (ΔS) se estima para el intervalo de tiempo considerando en el balance. Se determina a partir de la evolución de los niveles de agua subterránea correspondientes al mismo intervalo y de los valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero.

3.2.2. Métodos con apoyo de la modelación

Los métodos basados en modelos matemáticos pueden proporcionar información importante acerca del funcionamiento de los sistemas hidrológicos ya que resaltan los factores que propician la recarga. Estos métodos pueden predecir comportamientos en el medio por efecto de cambios en el clima, y usos de agua y suelo, además de aspectos que no permiten una recarga óptima (Healy, 2010). Respecto a la escala de tiempo de estimación de la recarga esta se podrá estimar de forma diaria, mensual o anual, esto suponiendo que su comportamiento sea constante sobre la línea de tiempo.

Teniendo en cuenta que la mayoría de los modelos para estimar la recarga de agua se están regidos por ecuaciones de balance, se debe tener en cuenta que este tipo de métodos involucra a los demás dentro de su formulación.

A) Modelos para la zona no saturada basados en la ecuación de Richards (Recarga real)

El flujo en la zona no saturada es principalmente debido al contenido de agua, gradiente de potencial matricial (potencial capilar), y potencial gravitatorio. A diferencia de la zona saturada que se mueve por una carga hidráulica positiva, el flujo en la zona no saturada es por lo general por un gradiente negativo.

Dentro de los modelos basados en la ecuación de Richards, se aplica para cuando el contenido de humedad o el potencial cambia con el tiempo, se identifican, VS2DI, HYDRUS y UNSAT-H, mismos que muestran un enfoque físico del comportamiento del movimiento del agua en su tránsito por la zona no saturada, así como la determinación de tiempo de tránsito desde la zona húmeda de la zona no saturada hasta el acuífero.

La ecuación de Richards surge de la Ley con el mismo nombre, y se describe para un flujo vertical, isotérmico y transitorio para la zona no saturada (Jaramillo, 2002), expresada en forma de la siguiente ecuación:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) * \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

- $C(h) \frac{\partial h}{\partial t}$ es la capacidad específica del suelo (L^{-1}),
- $K(h)$ es la conductividad hidráulica (LT^{-1}),
- t es el tiempo (T) y
- z es la coordenada vertical (L).

Las aplicaciones de estos modelos basados en la ecuación de Richards requieren de datos tales como el contenido de agua en función del potencial matricial y la conductividad hidráulica relativa en función del potencial matricial, determinándose ambos por distintos métodos.

B) Modelos de lluvia y escurrimiento (recarga potencial)

Estos modelos fueron desarrollados inicialmente con el propósito de evaluar los efectos del clima y el uso de suelo, identificando alteraciones en los procesos de evapotranspiración, almacenamiento de agua superficial y subterránea, así como recarga y descarga de aguas

subterráneas. Estos modelos, bajo la implementación de una amplia disponibilidad de datos, se han desarrollado para su uso en estudios de recarga de agua subterránea, química de aguas superficiales y subterráneas, biología y ecología, además de que los resultados sirven de apoyo en la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos, análisis de riesgo e incertidumbres y estudios de impacto ambiental (Healy, 2010).

Los modelos de lluvia y escurrimiento permiten representar los procesos hidrológicos, un ejemplo claro de ello es el modelo PRMS, el cual divide la cuenca en conjuntos de unidades llamadas Unidades de Respuesta Hidrológica (por sus siglas en inglés: HRU), con características uniformes como la vegetación, suelo, elevación y pendiente, en donde se calculan balances de agua y energía de manera diaria, representando los flujos desde y a partir de la atmósfera.

El modelo implementa el supuesto de que el drenaje de agua de reservorios a partir de la zona no saturada se presenta cuando estos se encuentran en un estado saturado máximo, transitando desde la zona no saturada hasta el acuífero a los cual se conoce como recarga, considerando que la recarga total será la suma de las aportaciones de drenaje de cada una de las Unidades de Respuesta Hidrológica.

Otros modelos desarrollados con SWAT y MIKE-SHE, mismos que están basados en la ecuación del balance de agua, pero que varían respecto a las escalas espaciales y temporales, teniendo en cuenta la intercepción, escorrentía, infiltración, evapotranspiración, movimiento de agua en la zona vadosa y flujo de agua subterránea.

Algunos de los modelos de cuencas hidrográficas para la estimación de recarga de agua subterránea, son capaces de predecir cambios futuros en el clima y uso de suelo, mismos que pueden afectar los patrones de recarga. También debe de considerarse la magnitud de la recarga ya que es solo un pequeño componente dentro de la ecuación de balance, mismo que puede generar inexactitud en la estimación de recarga.

C) Modelos de flujo de agua subterránea (Recarga real)

Estos modelos se basan en niveles de agua subterránea, el flujo dentro y fuera que entra y sale del acuífero y las tensiones naturales e inducidas por el ser humano. Estos modelos sirven

para la gestión ambiental de los recursos y proporciona datos de velocidades de flujo de agua subterránea para la simulación de transporte de contaminantes subterráneos.

La ecuación del modelo está basada en la Ley de Darcy y la ecuación de continuidad (o conservación de la masa), que expresa el flujo de agua subterránea como:

$$\partial(K_{xx}\partial H/\partial x)/\partial x + \partial(K_{yy}\partial H/\partial y)/\partial y + \partial(K_{zz}\partial H/\partial z)/\partial z + Q' + R = S_s\partial H/\partial t$$

(Ec. 3.8)

Donde:

- K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} son valores de conductividad hidráulica saturada a lo largo de los ejes de coordenadas x, y, z,
- H es el nivel piezométrico,
- Q' son las fuentes y sumideros, excepto la recarga, incluida el agua extraída de pozos y la evapotranspiración de agua subterránea,
- t es el tiempo,
- S_s es el rendimiento específico.

En muchas de las ocasiones los modelos de flujo de agua resueltos bajo las condiciones de la ecuación 3.8 se resuelven con diferencias finitas o elementos finitos. Los distintos modelos en ocasiones sirven para simular la recarga difusa y puntual, en donde la recarga difusa se asigna como un flujo constante por una celda que representa el acuífero, mientras que la recarga puntual simula celdas que subyacen de características superficiales.

D) Modelo conjunto agua subterránea/ agua superficial (recarga real)

Los modelos combinados permiten visualizar de manera realista la naturaleza dinámica del intercambio de agua superficial y subterránea. También dichos modelos representan las funciones físicas en el proceso de recarga y descarga.

En estos modelos se puede variar la escala de espacio y el tiempo, ello de acuerdo con la influencia del clima, geología, topografía, vegetación y otros factores. El diseño del modelo podría influenciar en la recarga respecto al nivel freático, de la misma manera que la descarga de agua subterránea se puede calcular a partir del nivel piezométrico y los niveles de la corriente de agua subterránea, por lo cual el modelo puede hacer posible una visualización física más realista del comportamiento del agua subterránea.

Una de las complicaciones de la aplicación del modelo son las variaciones espacio-temporales de los diversos factores, como la precipitación, escorrentía y flujo de corriente de agua subterránea, mismos que causan incertidumbre en su precisión para intervalos de tiempo largos, ya que algunos de los datos como la transición del agua a través de la zona no saturada en ocasiones requiere de pasos de tiempo diario, debido a su movimiento relativamente lento.

E) Otros métodos

i) Modelos empíricos simples (recarga potencial)

Se basan en el supuesto de que la recarga será igual a una fracción correspondiente de la precipitación anual expresado a través de la ecuación 3.9.

$$R = aP \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

- ***R*** es la recarga,
- ***a*** es la fracción de la precipitación anual y
- ***P*** es la precipitación anual.

El enfoque de la ecuación 3.9 permite hacer comparaciones de tasas de recarga respecto a diversas escalas espacio-temporales, lo que la hace apropiada para su modificación y aplicación en diversos sitios. Maxey y Eakin (1949) modificaron la ecuación 3.9 con el propósito de estimar la recarga en los valles de Nevada, Estados Unidos, en donde existe una gran variación de precipitación entre las zonas montañosas y el valle. Maxey y Eakin (1949) delimitaron cinco zonas respecto a las tasas de precipitación anual para determinar el coeficiente para cada zona, que viene dado por la ecuación 3.10:

$$R = 0.03P1 + 0.07P2 + 0.15P3 + 0.25P4 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

- ***R*** es el volumen de recarga anual en la cuenca hidrográfica,
- ***P1*** es el volumen donde la precipitación representa de 03 y 305 mm, y
- ***P2, P3*** y ***P4*** son los volúmenes para las zonas de precipitación entre 305 y 381 mm, 381 y 490 mm, y más de 490 mm respectivamente.

ii) *Técnicas de regresión (recarga potencial)*

Las técnicas de regresión tienen múltiples aplicaciones de entre las cuales resalta la extrapolación con el propósito de la estimación de recarga en el tiempo, con la ecuación siguiente:

$$R = aX_1 + bX_2 + c \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

- a, b y c son coeficientes determinados por el análisis de regresión y
- X_1 y X_2 son parámetros independientes que reflejan las características de la cuenca hidrográfica, como textura del suelo, permeabilidad, elevación, vegetación, geología y clima (precipitación y temperatura).

Una de las complicaciones de la aplicación de esta técnica es el requerimiento de datos referente a las características de la ecuación en X_1 y X_2 .

iii) *Técnicas geoestadísticas (recarga potencial)*

Dentro de las técnicas geoestadísticas se encuentra el Kriging, ya que al ser un método de interpolación estima la recarga en cualquier ubicación de la cuenca con estimaciones puntuales, estableciendo una cuadrícula sobre la cuenca hidrográfica y determinando estimaciones para cada punto. El Kriging, se basa en la combinación lineal del conjunto de valores.

$$R^* = \sum_{k=1}^{N_{obs}} \lambda_k R_k \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Donde:

- N_{obs} es el número de puntos donde se conoce la recarga,
- R_k es la recarga en la ubicación k y
- λ_k es el peso de kriging asociado a los datos.

3.2.3. Métodos basados en datos de aguas superficiales

Los métodos basados en datos de aguas superficiales son usados para condiciones en donde el clima suele ser húmedo y subhúmedo, debido a la abundancia de datos que se logran obtener de estos sitios. Originalmente estos métodos fueron desarrollados con el propósito

de dimensionar conductos, aberturas de puentes, predicción de canales de baja corriente y para el estudio de la calidad del agua.

Este tipo de métodos también pueden ser de utilidad para estimar la recarga debido al proceso de infiltración de aguas superficiales hacia aguas subterráneas por parte de cuerpos de agua superficiales, aplicando métodos como balance de agua en corrientes, medidores de infiltración, curvas de duración del flujo de la corriente, análisis tradicionales del método de Darcy y técnicas de separación química e isotópica de hidrogramas.

Estos métodos varían dependiendo de su objetivo ya que pueden implementarse para la estimación de la recarga puntual y recarga difusa, contemplando las escalas de tiempo y de espacio mismas que se determinarán con base en la disponibilidad de datos.

3.2.4. Métodos físicos en la zona no saturada

Los métodos de estimación de recarga a partir de mediciones de flujo y por cambio de almacenamiento para la zona no saturada, son algunos de los métodos que menos se usan, pero permiten estimar la recarga real, ya que estos miden el drenaje producido a través de la zona no saturada, considerando la suposición de que las aguas en tránsito por la zona no saturada llegarán al nivel freático y se considerarán recarga.

Este tipo de métodos se subdivide a su vez en dos grupos: los métodos de balance hídrico y los métodos aplicando la ecuación de Darcy.

A) Métodos de balance hídrico

Este tipo de métodos se relacionan con la interacción de los factores que modifican el almacenaje de agua en la zona no saturada, como la infiltración, el drenaje, y la evapotranspiración.

i) Método del flujo de plano cero

El plano de flujo cero (por sus siglas en inglés ZFP) se refiere a un plano horizontal dentro de la zona no saturada en donde el gradiente hidráulico en posición vertical es igual a 0. Este método hace referencia a las cantidades de agua almacenada a diferentes profundidades dentro de la zona no saturada.

La suposición planteada asume que toda el agua por arriba del ZFP se moverá ascendentemente por evapotranspiración, mientras que toda el agua que se encuentre por debajo del ZFP corresponderá a recarga. El método también contempla la hipótesis de que si se logra determinar la profundidad del ZFP se podrá estimar el drenaje y la evapotranspiración correspondiente, con el propósito de medir el cambio de almacenamiento.

ii) Uso de lisímetros

Los lisímetros son contenedores rellenos de suelo representativas de un sitio en específico simulando las condiciones naturales, incluyendo vegetación. Su implementación tiene el propósito de estudiar la atmósfera, el suelo y el agua en su interacción con las plantas, bajo condiciones naturales o artificiales. El propósito original es la obtención de mediciones de lixiviación y transporte de solutos a través del suelo.

También brindan mediciones directas de evapotranspiración y drenaje a través de la zona no saturada. En el caso de los estudios de recarga se analiza con mayor cuidado la tasa de drenaje que ocurre en la parte inferior del lisímetro.

iii) Métodos basados en la ecuación de Darcy

a) Curvas de retención de agua y conductividad hidráulica

Estas curvas se representan a través de gráficas que muestran la relación existente entre el agua contenida en el suelo con la carga de presión que existe en ella. Esta última influenciada directamente por la composición de texturas del suelo, entendiendo que los sedimentos más gruesos drenarán con mayor facilidad que los de grano fino. Se basa en la medición de la conductividad hidráulica en la zona no saturada (Ecuación 3.13), expresada como el producto de la conductividad hidráulica saturada (K_s) y la conductividad hidráulica relativa (K_r):

$$K(h) = K_s K_r(h) \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde:

- h es la carga de presión (o potencial).

La conductividad hidráulica relativa tendrá un valor máximo de 1, e irá disminuyendo hasta 0 con la carga de presión. Es bajo estas condiciones en las cuales ambas curvas (Figura 3.2^a a 3.2^b) se encuentran estrechamente relacionadas por la influencia de la textura del suelo.

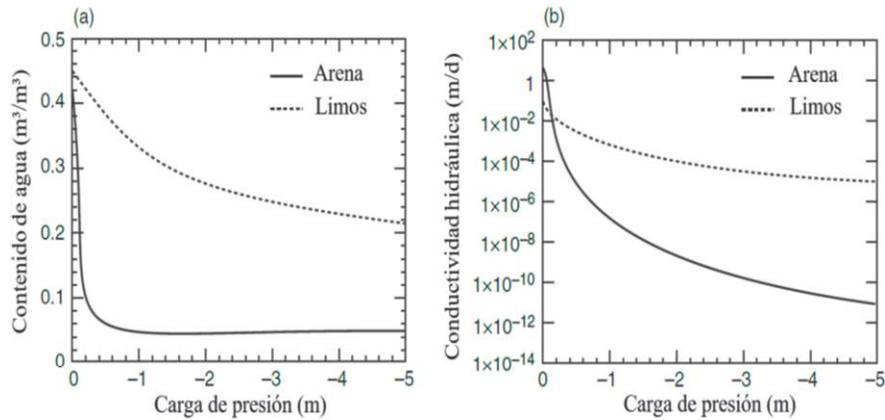


Figura 3.2^a-3.2^b Curva de retención de agua (a) y conductividad hidráulica relativa (b) para arena y limos. (Healy, 2010).

b) Con base en la ecuación de Darcy

La ecuación de Darcy tiene múltiples aplicaciones, entre ellas las enfocadas en la zona no saturada para determinar el drenaje que ocurre a través de esta en forma de flujo vertical (Custodio, et al., 1983).

$$Q = k * A * \left(\frac{\Delta h}{L}\right) \tag{Ec. 3.14}$$

Donde:

- Q es el flujo que circula por la zona no saturada,
- k es la conductividad hidráulica en la zona no saturada,
- A es el área o sección,
- Δh es la profundidad a la cual se mide el contenido de agua,
- L es la longitud.

Este método requiere mediciones o estimaciones del gradiente hidráulico vertical total y la conductividad hidráulica en función del contenido de agua. Este método en específico es apropiado para observar eventos de recarga de forma individual, además de que puede proporcionar información del flujo de agua en dos o tres dimensiones facilitando la comprensión del proceso de recarga.

3.2.5. Métodos físicos en la zona saturada

Este tipo de métodos se basan en datos del nivel de agua subterránea, de forma que se estudian las fluctuaciones del nivel de agua subterránea sobre una línea de tiempo con el propósito de estimar la recarga real en acuíferos libres.

A) Métodos basados en la fluctuación del nivel piezométrico

Las fluctuaciones del nivel piezométrico se basan en el aumento del agua almacenada en acuíferos libres, asumiendo que la recarga llega al acuífero. Se plantea que la cantidad de agua disponible en una columna de unidad de superficie es igual al rendimiento específico multiplicado por la altura del agua en la columna.

El rendimiento específico se toma de forma similar al concepto de almacenamiento, el cual depende exponencialmente del tiempo ya que los cambios de carga de agua y la granulometría del medio a través del cual pasa el agua.

El rendimiento específico de una roca o suelo es el volumen de agua por volumen de sólido, que, al estar saturado, tendera a ceder por acción de gravedad (Meinzer, 1923), mismo concepto que se expresa por la ecuación 3.15:

$$S_y = \varphi - S_r \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Donde:

- φ es el rendimiento específico,
- S_r es la retención específica (volumen de agua retenido por la roca, por unidad de volumen de roca).

Dicha recarga puede estimarse por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta S^{gw} = R = S_y \Delta H / \Delta t \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Donde:

- S_y es el rendimiento específico,
- ΔH es el cambio en la altura del nivel piezométrico y
- Δt es el intervalo de tiempo.

Los niveles de agua subterránea fluctúan en las diferentes escalas de tiempo, debido a cambios en las tasas de recarga por variaciones naturales en el clima o bien por efectos antropogénicos. La estimación de recarga con base en las fluctuaciones de los niveles piezométricos depende comúnmente de la evapotranspiración, presión atmosférica, aire atrapado, precipitación, bombeo de agua subterránea y riego.

Suele ser uno de los métodos de estimar la recarga más implementado, debido a su sencillez e independencia respecto al mecanismo de desplazamiento de agua a través de la zona no saturada.

La recarga se calcula bajo la siguiente expresión:

$$R = S_Y \frac{dh}{dt} = S_Y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Donde:

- S_Y es el rendimiento específico,
- h es la altura del nivel piezométrico y
- t es el tiempo.

B) Métodos basados en la ecuación de Darcy

i) Theis

En el año de 1937, Theis uso la ecuación de Darcy como punto de partida para estimar el flujo a través de una sección transversal. Se planteó el balance de agua asumiendo condiciones constantes y sin extracción de agua, los insumos que requirió, fueron, la conductividad hidráulica saturada (T_s), el gradiente hidráulico, área de la sección transversal y el gradiente de área hacia arriba desde la sección transversal sobre la cual se genera la recarga.

ii) Hantush

Hantush en 1956 consideró la ecuación de Darcy aplicado a acuitardos: Los acuitardos pueden ser la principal fuente de agua de recarga hacia los acuíferos confinados, profundos, y extensos a nivel regional, y en donde el flujo entre acuíferos está basado en los niveles de agua subterránea, suponiendo un posible bombeo el cual generara disminución en el nivel de agua en el acuífero confinado.

Para dichas suposiciones Hantush modificó la ley de Darcy de la siguiente manera:

$$R = Q_c/A_c = (k'/m')\Delta H \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Donde:

- Q_c es la tasa de fuga de agua volumétrica a través del lecho de confinamiento,
- A_c es el área sobre la cual ocurre la fuga,
- (k'/m') es el coeficiente de fuga, (k' , es la conductividad hidráulica vertical) y (m' , es el espesor del lecho de confinamiento), y
- ΔH es la diferencia en la altura total entre el acuífero y parte superior del lecho de confinamiento.

iii) Redes de flujo

El método de estimación de recarga de agua subterránea por medio de redes de flujo se usa para acuíferos confinados y libres. En la actualidad estos métodos han sido reemplazados por los modelos matemáticos de flujo de agua subterránea. El método fue implementado originalmente por Forchheimer (1930) el cual especifica una red de flujo para un sistema isotrópico y homogéneo el cual se integra de dos conjuntos de líneas ortogonales (líneas de flujo y líneas equipotenciales).

Dicho método representa una línea de flujo a través de la cual una molécula de agua se desplaza desde la zona de recarga hasta la zona de descarga, a través de este trayecto se encuentran las líneas de flujo adyacentes las cuales se denominan tubos de flujo, y la línea de potencial equivalente que representa la altura del nivel de agua. Los conjuntos de líneas forman una serie de rectángulos, los cuales servirán para estimar el flujo a través de ellos por medio de la ecuación 3.19 dada por la ley de Darcy.

$$Q = AK_s\Delta H/\Delta l \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Donde:

- A es el área de la sección transversal de uno de los rectángulos,
- K_s es la conductividad hidráulica y
- $\Delta H/\Delta l$ es el gradiente hidráulico a través del ángulo recto.

iv) Análisis de series de tiempo

Este tipo de método se ha desarrollado con el propósito de relacionar patrones de infiltración con patrones de recarga y fluctuaciones en los niveles de agua subterránea.

Su (1994) desarrolló un método para la estimación de la recarga a partir del conocimiento de series temporales de los niveles de agua en pozos de observación. Se supone un flujo de agua subterránea unidimensional en un acuífero no confinado de propiedades uniformes que recubren una base impermeable inclinada, mismo que produce una recarga difusa uniforme.

Su (1994) plantea una ecuación, a partir de la ecuación de Boussinesq para la estimación de recarga la cual considera el tiempo, el rendimiento específico y el espesor del acuífero, una base impermeable inclinada y la conductividad hidráulica, como se expresa en la ecuación 3.20.

$$R = S_y H (\Delta H / \Delta t) / b \quad (\text{Ec. 3.20})$$

Donde:

- ***b*** es el espesor promedio del acuífero,
- ***S_y*** es el rendimiento específico y
- ***H*** es la base inclinada que se mide en relación del acuífero.

Por otro lado, Ostendorf y Col. (2004) se basaron en los supuestos de Su (1994) para desarrollar el método con el cual se pudiera predecir la tasa de recarga constante, para series de tiempo mensuales y anuales mediante el uso de soluciones analíticas para la ecuación unidimensional del flujo de agua subterránea.

3.2.6. Métodos con trazadores químicos

La trazadores, en especial los químicos tienen amplias aplicaciones, de entre las cuales resaltan las estimaciones cuantitativas y cualitativas de la recarga real, además proporciona información sobre velocidades y tiempos de desplazamiento del agua, lo cual favorece la identificación de rutas preferenciales de flujos, provee de información acerca del circuito hidrodinámico y de insumo para la construcción de modelos de transporte de solutos (Healy, 2010).

El tipo de trazadores usados tradicionalmente suelen ser iones, isótopos o gases los cuales se mueven con el agua y pueden detectarse en la atmósfera, aguas del subsuelo y superficiales.

Los trazadores químicos se agrupan en tres categorías:

- Trazadores ambientales naturales: se transportan o se crean en la atmósfera por procesos naturales, así como por fuentes antropogénicas. Los más usados son el cloruro (Cl), incluidos también el cloro-36 (^{36}Cl), tritio (^3H) y carbono-14 (^{14}C).
- Trazadores históricos: conocidos como trazadores antropogénicos se refieren a trazadores introducido al medio por prolongado tiempo a causa de la acción humana, ya que los trazadores no gaseosos llegan a la superficie terrestre por deposición atmosférica, ya sea húmeda o seca, que al entrar en contacto con la infiltración este accede al suelo en una fase disuelta. Como ejemplo de estos trazadores se encuentran: ^{36}Cl y ^3H los cuales se produjeron por pruebas de armas nucleares, el yodo-129 (^{129}I) generado por la reprocesamiento nuclear y el accidente de Chernobyl. También se identifican los gases como clorofluorocarbonos (CFC) y el hexafluoruro de azufre (SF_6).
- Trazadores aplicados: son aquellos que se aplican intencionalmente en la superficie o subsuelo, dicha aplicación suele ser con el propósito de realizar un experimento de trazadores. Para ello se suelen usar tintes de bromuro (Br), Cl y fluoruro, aunque en otras condiciones se utilizan fertilizantes y pesticidas para rastrear el movimiento de agua en el subsuelo.

3.2.7. Métodos con trazadores de calor

Los métodos de trazadores de calor se enfocan en determinar flujos de agua o bien infiltración proveniente de cuerpos de agua usando la temperatura como principal factor, a través de mediciones de temperatura a diferentes profundidades. Dicho factor de temperatura se encuentra relacionada con tendencias espaciales y temporales de la superficie y subsuelo, así como la litología del sitio, lo cual sirve para inferir las velocidades del agua (Scanlon et al., 2002).

Las mediciones de temperatura se usan en conjunto con el modelado inverso mediante el uso de códigos de flujo saturado variable no isotérmico, como el modelo VS2DH con el propósito de estimar la conductividad hidráulica de un medio (Healy y Ronan, 1996; Scanlon et al., 2002). El uso de las mediciones de calor dependerá del rango de fluctuaciones de temperatura de agua superficial y de la escala de tiempo considerada.

Dichos datos de temperatura suelen recolectarse de forma precisa, con termistores y termopares, los cuales son viables económicamente y la toma de datos no requiere forzosamente de recolección de muestras de agua. Con anterioridad las mediciones de calor únicamente se realizaban con una matriz vertical generando un espectro de visualización unidimensional, sin embargo, también se pueden realizar matrices de sensores bidimensionales y tridimensionales los cuales arrojan estimaciones más realistas.

3.3. Métodos de estimación de recarga implementados en México

Se realizó la investigación bibliográfica en diversas fuentes como son los repositorios institucionales: de la UAEMéx, UNAM, IITCA, UAguascalientes, UACHihuahua, y el IPN, además de revistas indexadas. Con dicha búsqueda se logró identificar 12 documentos relacionados a la estimación de recarga (Anexo 1).

La CONAGUA pone a disposición del público documentos que muestran las condiciones de cada acuífero del país, indicando la disponibilidad o no de agua subterránea para ser concesionada. Para ello se realiza una estimación del balance hídrico del acuífero. La CONAGUA sigue las especificaciones para determinar la disponibilidad media anual de aguas de los acuíferos, regida por la NOM-011-CONAGUA-2015, que dentro de su documento en el apéndice normativo “B” especifica el método para la determinación de recarga total media anual de un acuífero.

El método establecido dentro de la NOM-011 (DOF, 2015), es el balance de aguas del subsuelo, el cual se expresa como se muestra en la ecuación 3.21 y bajo consideraciones de requerimientos de datos con amplios periodos de recopilación.

$$\begin{aligned}
 \textit{Recarga total (suma de entradas)} &= \textit{Cambio de almacenamiento del acuífero} + \textit{Descarga total (suma de salidas)} \quad (\text{Ec. 3.21})
 \end{aligned}$$

Este método no significa que sea el único empleado en México, tal es el caso de un estudio Villalobos (1996) que estimó la recarga a través de la modelación inversa. Los parámetros del modelo son calibrados en función de los cambios en las elevaciones de los niveles estáticos, y los volúmenes de extracción, estimando de esta manera de forma directa los flujos

netos. Una desventaja de este método es que pueda marcar el haber un error mayor con base en los registros de datos y en la manera en la cual se calibran las variables.

Otro caso de estudio enfocado en ambientes de condiciones húmedas de México (Breña, 2016) consiste en la separación de hidrogramas, suponiendo que en estos acuíferos el flujo subterráneo tiende a ser somero, a lo cual corresponde un gasto drenado como una recarga total. Se usaron valores a partir de datos diarios de hidrometría y se implementó el método de recesión de flujo base para realizar la separación de hidrogramas. Como resultado se obtuvo que el gasto o caudal base domina la respuesta hidrológica para la mayor parte de las zonas de estudio, mientras que el flujo hidrológico de la recarga supera el escurrimiento directo anual.

En Chihuahua, Rivas (2017) estimó la recarga a través del método de fluctuación niveles freáticos en un proyecto piloto. Para ello considerando dos temporadas (lluvias, secas), evaluando como mejor periodo a la época de lluvias. Llegó a la conclusión de que los tiempos de recarga generada por la precipitación dependerán explícitamente de las características y funciones hidrogeológicas del medio, así como, de la zona no saturada.

3.4. Marco legal y normativo

Dentro de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), artículo 27 reformado en el 2006 (DOF, 2020), párrafo primero y quinto, se establece la propiedad originaria de la nación sobre las aguas, y de acuerdo con el párrafo sexto solo será beneficiario por derecho, aquel a quien se le otorgue una concesión por el Poder Ejecutivo Federal. A su vez el artículo 4, párrafo quinto de la CPEUM establece que todas las personas tienen derecho a un medio ambiente adecuado, incluyendo al agua como un recurso.

La Ley de Aguas Nacionales plasma dentro de ella los principios constitucionales de los usos y aprovechamientos del agua, regulando su funcionalidad, como registro de derechos, permisos de concesión, así como la transferencia de derechos. Por su parte la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente (LGEEPA) (DOF, 2018) establece criterios con los cuales se tiene contemplado el propósito de prevenir y controlar la contaminación del agua, y también surge de apoyo para la formulación de Normas Oficiales Mexicanas en función de controlar la contaminación y su explotación.

Respecto a las Normas Oficiales Mexicanas vigentes, en el marco de la presente investigación, se identifican las siguientes (CONAGUA, 2016):

- NOM-011-CONAGUA-2015: Conservación del recurso agua - Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- NOM-014-CONAGUA-2013: Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
- NOM-015-CONAGUA-2007: Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.

Como instituciones encargadas del manejo del agua se encuentran en primer lugar la SEMARNAT, con funciones para formular y conducir la Política Nacional en materia de aguas, establecer las NOM, organizar, dirigir y reglamentar los trabajos de hidrología en las cuencas, administrar y reglamentar los aprovechamientos de estas, y establecer y vigilar las descargas de aguas residuales. Con propósito de ello y con objetivo de que se cumplan las obligaciones, se formó en el año de 1989 la CONAGUA, como autoridad (FEA et al., 2006).

CAPÍTULO 4

Materiales y métodos

La Figura 4.1 describe los pasos metodológicos, así como la secuencia con que estos fueron aplicados con el propósito de obtener los insumos requeridos para la estimación de la recarga del ASJC, en donde se contempla a la variabilidad climática como presión de cambio y, del mismo modo, el cambio de uso de suelo como factor alterador de características del sitio.

Al existir cierta complejidad en el trabajo queda especificado que existen variables que deben de obtenerse inicialmente para saber cuál es la situación actual del acuífero, lo cual servirá en la toma de decisiones al momento de estimar la recarga.

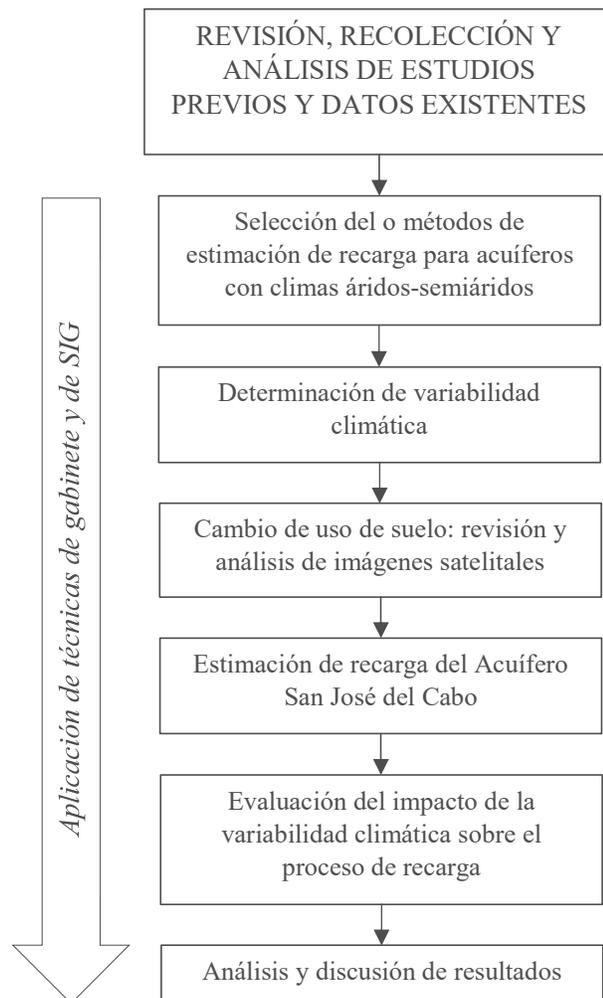


Figura 4.1. Esquema metodológico para evaluar la variabilidad climática sobre el proceso de recarga (Elaboración propia).

4.1. Selección del método de estimación de recarga

Para la selección del método de estimación de recarga se requirió de una minuciosa revisión de estudios previos en el área de estudio y áreas aledañas, además de documentos relacionados con el tema de investigación, muchos de ellos consultados de fuentes públicas e institucionales como: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Geológico Mexicano (SGM), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS); así como también de artículos indexados y bibliografía temática dentro de la cual resaltan las fuentes como: Healy (2010) y Vélez (2019).

Como primer paso en la selección del método, se identificaron las diferentes fuentes de consulta en donde se encontraron los distintos métodos, posteriormente se realizó el análisis individual de cada uno, identificando sus características y requerimientos. Además, se elaboró el modelo conceptual del acuífero para con ello conocer las características y funcionamiento básico del mismo, lo cual permitió saber en qué condiciones se lleva a cabo la recarga. Finalmente, y como resultado del análisis, se identificaron los insumos requeridos para el método seleccionado.

4.1.1. Modelo conceptual del acuífero

La elaboración del modelo conceptual del ASJC, tiene como propósito identificar el funcionamiento del acuífero y por ende el proceso de recarga. Para ello se requieren conocer las características físicas del sitio como morfología, litología, geología, hidrología superficial y subterránea, y climatología, entre otras. Para el desarrollo de dicho modelo se usaron las herramientas y programas especializados como lo son ArcGis (ArcMap, ArcScene), TerrSet, Qgis y Excel, para el tratamiento y análisis de datos.

El modelo conceptual tiende a ser dinámico debido a que se ve totalmente regido por las variables que lo integran. El análisis del modelo conceptual se vuelve relevante al momento de considerar las características del área de estudio para la definición del método para la estimación de recarga de agua subterránea.

La información que se integra en el modelo conceptual (Vélez, 2010) se detalla en la Figura 4.2. Como punto clave, y que podría generar complicaciones, está la identificación de las

unidades hidrogeológicas las cuales podrían no reflejar las propiedades hidráulicas, debido a la variación litológica del sitio y al hecho de que no se encuentra tanta información disponible de las mismas.

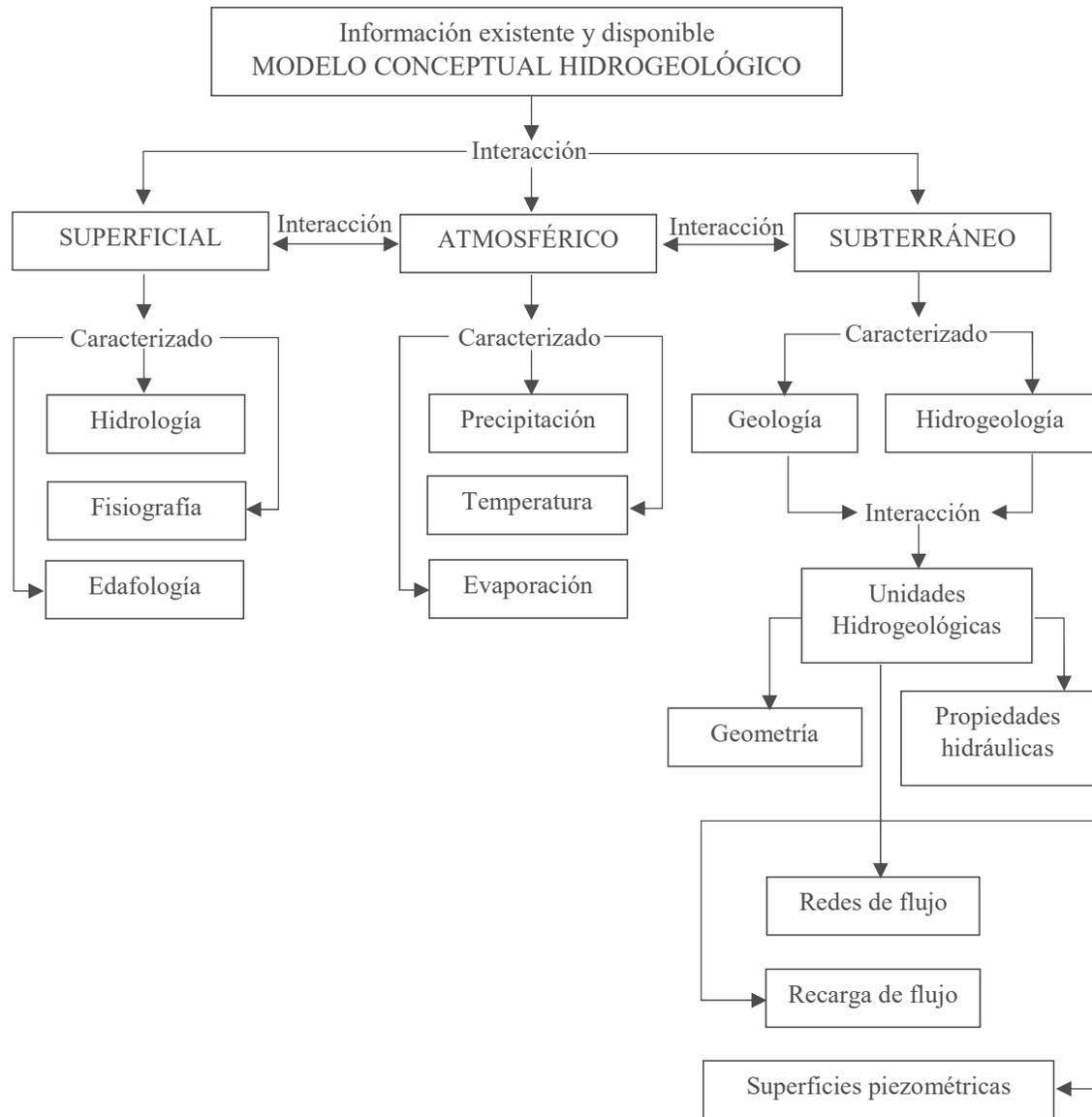


Figura 4.2. Esquema para generar el modelo conceptual hidrogeológico del ASJC (Vélez, 2010).

Dentro del análisis del modelo conceptual se contempla adicionalmente considerar la variabilidad climática y cambio de uso de suelo, ya que son características fundamentales en la selección del método de estimación de recarga.

Por lo tanto, se entiende que la selección del método de estimación de recarga deberá de considerar los datos existentes que puedan mostrar cambios (suelos y clima), para comprender la variación de la recarga del acuífero durante un periodo histórico.

4.1.2. Comparación de métodos de estimación de recarga

La selección del método se basó en las características del acuífero, con base en el modelo conceptual, incluyendo a la variabilidad climática y al cambio de uso de suelo como factores fundamentales de la investigación, así como, las particularidades del trabajo, requerimientos, alcances y posibilidades.

Otros factores considerados fueron:

- Alcance del proyecto.
- Escala espacial del área de estudio.
- Disponibilidad de recursos humanos y materiales.
- Información disponible.
- Costos de implementación del método.
- Tiempo estimado para la realización de la investigación.

Como parte de la selección del método de estimación de la recarga para el ASJC se desarrolló un árbol de decisión (Figura 4.3), el cual muestra gráficamente cuales fueron los criterios contemplados con propósito de definir el método que se implementaría.

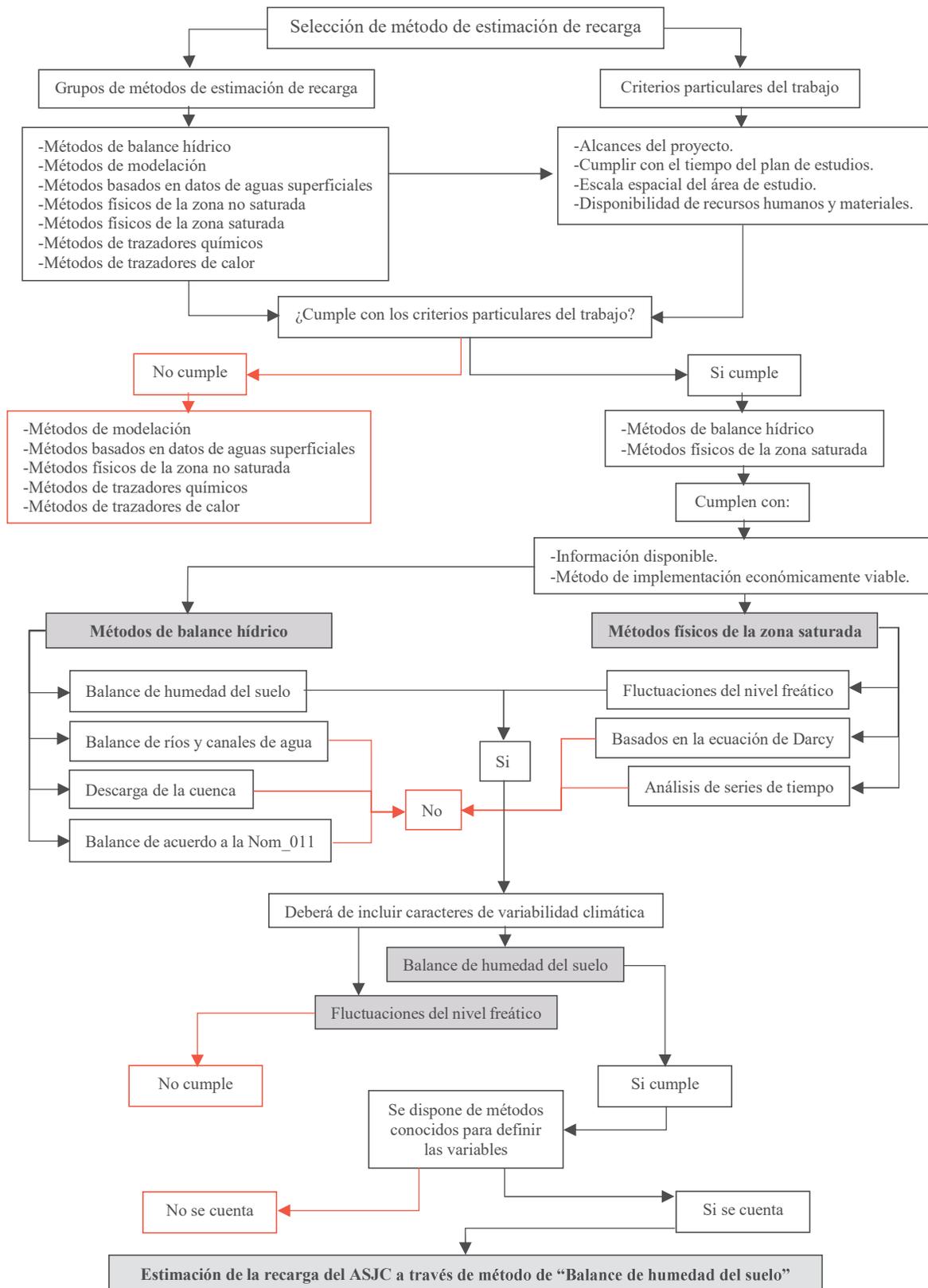


Figura 4.3 Árbol de decisión para la selección del método de estimación de recarga del ASJC (Elaboración propia).

En primer lugar, se plantearon las ventajas y desventajas de cada grupo de métodos con base en el objetivo del presente estudio, las cuales se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Ventajas y desventajas de los grupos de métodos de estimación de recarga.

Grupos de métodos	Ventajas	Desventajas
Métodos de balance hídrico	<ul style="list-style-type: none"> *Las ecuaciones de balance proporcionan información sobre toda la hidrología de un sistema, con información no solo de la recarga, sino también de la interacción con otros componentes. *Proporcionan análisis de supuestos y limitaciones de otras técnicas de estimación de recarga. *Permiten su aplicación en un amplio espectro de escalas espacio y tiempo. *Este tipo de métodos se integran a su vez dentro de los demás métodos. *Incluye componentes superficiales y subterráneos. *Su aplicación suele ser fácil y rápida. *Bajos costos de aplicación. *Considera todas las fuentes de suministro de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> *La precisión de la estimación de recarga está limitada a la precisión de otros componentes que se incluyen en la ecuación de balance. *No suele aplicarse en regiones áridas.
Métodos de modelación	<ul style="list-style-type: none"> *Proporcionan información sobre las características del sistema hidrológico. *Se pueden usar para predecir efectos de cambio en clima, uso de suelo, y gestión de agua en las tasas de recarga. *Los modelos simples son fáciles de aplicar y regularmente requieren de datos de fácil acceso. *Son susceptibles a la aplicación en SIG. *Los modelos complejos pueden representar con mayor detalle los flujos de agua y por ello evidenciar los parámetros que afectan la recarga. *Genera mapas de gran utilidad grafica-visual para identificar áreas de recarga. 	<ul style="list-style-type: none"> *Pueden causar grandes gastos en la recopilación de datos, así como su tratamiento. *La descripción grafica-visual puede ser engañosa debido a la calidad y cantidad de datos que los están representando. *Requiere por lo general capacitación apropiada para el uso del modelo aplicable. *Genera limitación en el tiempo de aplicación ya que son de complejidades mayores. *Debe de anteceder a la aplicación de modelos, una evaluación de beneficios que justifiquen la aplicabilidad de este.
Métodos basados en datos de aguas superficiales	<ul style="list-style-type: none"> *Estos métodos generan estimaciones de recarga puntual o difusa. *Las mediciones de la infiltración en diferentes ubicaciones sirven para determinar la variabilidad de las tasas de recarga. *El uso de programas de computadora facilita la realización de análisis de hidrogramas. *Pueden proporcionar patrones regionales de flujo base. 	<ul style="list-style-type: none"> *En ocasiones suelen representar mediciones puntuales. *Suele conjugar áreas en donde se realizan análisis y zonas en donde no, determinando en estos casos un flujo uniforme. *Requieren de análisis continuos para determinar parámetros secundarios. *Representa un acuífero hipotético que no se adapta a las condiciones de uno real. *Requieren de mayor esfuerzo y en ocasiones no son tan precisos. *Causan problemáticas en la generación u obtención de datos. *Los programas de computadora suelen ser rápidos, aunque puede presentar problemas al momento de omitir datos importantes.
Métodos físicos en la zona no saturada	<ul style="list-style-type: none"> *Ningunos de los métodos se ve limitado en términos de escala de tiempo. *Pueden estimar el drenaje de un frente de humectación de rápido movimiento. * Para el caso de los lisímetros suelen ser usados en cualquier ambiente, además de que si se construyen de manera correcta suelen generar mediciones más exactas. 	<ul style="list-style-type: none"> *Requieren mediciones o estimaciones del gradiente hidráulico. *Requieren de instrumentación apropiada para medir gradientes hidráulicos. *Si el gradiente es pequeño suele presentar errores debido a la precisión de los instrumentos. *El método del plano de flujo cero no se puede aplicar cuando el drenaje ocurre de manera constante. *Suelen generar altos costos.

Fuente: Elaboración propia con base en Healy (2010), Vélez (2019) y Valle et al. (2019).

Tabla 4.1 Ventajas y desventajas de los grupos de métodos de estimación de Recarga (Continuación).

Grupos de métodos	Ventajas	Desventajas
Métodos físicos en la zona saturada	<ul style="list-style-type: none"> *Tienen amplio campo de aplicación. *Abundancia de datos en organismos locales, estatales y federales. *Datos de fácil acceso. *Los avances tecnológicos reducen la inexactitud, gastos y facilitan las mediciones y registros automáticos de los niveles de agua subterránea. *Este tipo de métodos se benefician ampliamente de análisis de datos disponibles por lo cual son apropiados para la combinación con otros métodos. 	<ul style="list-style-type: none"> *La obtención de tasas de recarga requiere de múltiples pozos de medición en el área de estudio. *Los niveles de agua subterránea suelen verse afectados por fenómenos de la atmósfera, bombeo, evapotranspiración, las mareas, etc. *Puede no contabilizar un tipo constante de recarga.
Métodos con trazadores químicos	<ul style="list-style-type: none"> *Utilizables en muchas regiones. *Proporcionan estimaciones desde que se integra el trazador hasta su salida. *Pueden proporcionar información sobre drenaje acumulativo de la recarga durante años a milenios. *Pueden servir de complemento para otros métodos. *Suelen ser rentables. 	<ul style="list-style-type: none"> *Independientemente de si las estimaciones son con datos de zonas no saturadas o datos de agua subterránea, requieren de múltiples puntos de recolección de datos. *Algunos métodos requieren solamente de una sola toma de datos o muestra. *Siempre que se pueda se deben de usar más de un trazador para disminuir el error de mediciones. *Suelen ofrecer medidas indirectas de la recarga considerada sobreestimación de drenaje.
Métodos con trazadores de calor	<ul style="list-style-type: none"> *Los valores de temperatura dentro de un medio geológico son útiles para determinar la conductividad hidráulica. *La temperatura dentro de la zona geotérmica representa condiciones promedio a largo plazo. *Los perfiles de temperatura-profundidad dentro de la zona geotérmica se usan para predecir temperaturas pasadas de superficie de suelo, y para identificar periodos de cambio climático. *La tasa de drenaje estimadas en la zona geotérmica refleja drenaje difuso y constante. *Las mediaciones de temperatura proporcionan información hidráulica útil para cuantificar directamente las tasas de recarga. 	<ul style="list-style-type: none"> *Para estimar el drenaje deben de compararse las fluctuaciones temporales de temperatura diurnas y estacionales. *Actúan bajo la aplicación de modelos analíticos y numéricos.

Fuente: Elaboración propia con base en Healy (2010), Vélez (2019) y Valle et al. (2019).

Una vez evaluados todos los métodos (Tabla 4.1), y con base en los requerimientos de aplicación de los métodos de estimación de recarga, los grupos de métodos que cumplen fueron: los métodos de balance hídrico y los métodos físicos en la zona saturada.

Los métodos de balance hídrico tienen mayor aplicabilidad al sitio y en el marco del desarrollo de la investigación, ya que una de sus características es el requerimiento de información de fácil acceso, como precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc. Se consideró que los métodos puedan ser aplicados a sitios con climas áridos y semiáridos.

Por otro lado, la aplicación de los métodos físicos en la zona saturada, destacan por ser aplicables en múltiples situaciones, además de que, reducen la inexactitud de obtención de resultados. También se considera que estos métodos requieren del uso de datos de pozos de medición, los cuales regularmente son de difícil acceso.

Con el propósito de definir el método a implementar se realizó una reevaluación de los métodos integrados a los dos grupos antes mencionados (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Ventajas y desventajas de los métodos de estimación de recarga seleccionados de los grupos de métodos de estimación.

Grupos de métodos	Métodos	Ventajas	Desventajas
Métodos de balance hídrico	Balance de humedad del suelo	*Requiere de variables que no representan una mayor dificultad en su obtención. *Aplicable a cualquier escala de tiempo.	*En ocasiones su aplicación requiere de datos diarios de las variables. *Requiere de datos secundarios como tipo de vegetación, tipo de suelo, etc.
	Balance de ríos y canales de agua		*No existen cursos permanentes de agua superficial en el área de estudio. *Suelen ser complicados ya que se deben de cerrar canales por algunos días. *Son costosos en comparación con otros.
	Descarga de la cuenca	*Proporciona información útil para la separación de hidrogramas.	*No existen cursos permanentes de agua superficial en el área de estudio. *El método no necesariamente es correcto ya que considera a la descarga como el equivalente a la recarga, sin considerar los bombeos, evapotranspiración, etc. *El método es recomendado para ser aplicado en áreas con extensiones superiores de 1,300 km ² y escalas de tiempo de meses. *Requiere de muchos datos.
	Método de balance de acuerdo con la Norm-011-CONAGUA-2015	*No requiere monitoreo en campo. *Fácil de establecer. *Económico.	*Requiere de datos de salida de agua subterráneas, como: extracciones, descarga, etc. *También se necesitan datos sobre el cambio de almacenamiento, para ello es necesario tener información sobre coeficiente de almacenamiento y variaciones del nivel freático.
	Método de fluctuaciones del nivel freático	*Proporciona mejores resultados si se aplica para niveles freáticos superficiales. *Sencillos e independientes respecto a los mecanismos de desplazamiento de agua en la zona no saturada. *Aplicables para acuíferos libres.	*La tasa de recarga puede variar sustancialmente dentro de una cuenca debido a las diferencias de las características. *Deben de existir pozos representativos del área. *Identificar causas de fluctuaciones del nivel resulta complejo. *Los indicadores de recarga promedio podrían introducir errores, ya que el flujo base representa solo una parte de la descarga total.
Métodos físicos en la zona saturada	Theis	*Fácil de aplicar si se cuenta con los datos de conductividad hidráulica y niveles piezométricos.	*Puede ser costoso al momento para determinar la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico. *La conductividad hidráulica es variable en el espacio.
	Métodos basados en la ecuación de Darcy	Hantush	*La conductividad hidráulica se puede determinar a través de pruebas de bombeo de velocidad constante. *Requiere de disponibilidad de núcleos de la capa confinante para realizar mediciones de conductividad hidráulica. *Suele aplicarse para acuíferos confinados.
	Redes de flujo	*Aplicable en acuíferos confinados y libres.	*Este tipo de métodos han sido reemplazados gradualmente por modelos de flujo de agua subterránea.
	Análisis de series de tiempo	*Los modelos empíricos son útiles para la gestión de recursos de agua subterránea en regiones donde hay poca información disponible de acuíferos.	*Para acuíferos con condiciones uniformes.

Fuente: Elaboración propia con base en Healy (2010), Scanlon et al. (2002), Vélez (2019).

En su mayoría, los métodos descartados requieren de un mayor tiempo de aplicación y en algunos es indispensable las visitas de campo para la obtención de datos y recolección de muestras, además de que pudieran generar costos elevados, ya sea a la hora de obtener datos por medio de muestreo o requerimientos de software especializado.

Los métodos físicos en la zona saturada, y en concreto el uso del método de fluctuaciones del nivel freático, se descartaron debido a que dentro de su ejecución no se integran las variantes climáticas las cuales son parte fundamental de la investigación, siendo uno de los insumos más importantes del trabajo respecto a su análisis de comportamiento, además de que los requerimientos para su desarrollo se vuelven más complejos en su obtención.

Con propósito de dar cumplimiento en forma a la investigación se determinó la implementación del método de balance de humedad del suelo, debido a que:

- El método es apropiado para su aplicación en el tiempo proyectado para el trabajo de investigación.
- Las variables climáticas y de suelo entran en la aplicación del método.
- No genera costos significativos y no requiere de visitas en campo para la recolección de datos.
- Los insumos requeridos para su aplicación son de fácil acceso y mediante la aplicación de métodos conocidos pueden dar como resultado la obtención de insumos faltantes requeridos.

4.1.3. Insumos requeridos para la aplicación del método

Las características generales descriptivas del área de estudio como: geología, geomorfología, clima, uso de suelo y vegetación, corrientes superficiales, etc., se obtuvieron en archivos vectoriales de acceso libre y a diferentes escalas, en diversas instituciones de gobierno y dependencias.

Se consultaron los portales de CONABIO y Google Earth, en donde fue posible identificar y obtener características como:

- Localidades: Generadas a partir de la capa en formato shp de localidades de la República, proporcionada por CONABIO, con identificación en Google Earth, mediante su procesamiento y composición de esta dentro del software ArcGis.

- Límites estatales y municipales: Obtenidos en formato shp de las capas de división política estatal, y la división política municipal del año 2019 desde el portal de CONABIO para INEGI (2019).

Para el resto de información, se reunieron de diferentes fuentes:

- Clima: La capa en formato shp para el ASJC y área circundante se obtuvo a través de la digitalización del mapa de clima del documento de “Aspectos geográficos, del Estado de Baja California Sur” (INEGI, 2018), ya que fue el mapa encontrado con mayor detalle y más reciente, mismo que se procesó dentro de ArcGis.
- Uso de suelo y vegetación: se digitalizó el mapa de “Aspectos geográficos del Estado de Baja California Sur” (INEGI, 2018), y procesado dentro de ArcGis.
- Edafología: Se obtuvo de INEGI (2018) y se digitalizó dentro de ArcGis.
- Mapa de relieve sombreado (*Hill Shade*): Se generó por medio de la obtención del recorte del área de estudio dentro de Google Earth en formato kmz, ingresado posteriormente en el software Global Mapper, de donde se obtuvieron de igual manera las curvas de nivel con un intervalo de 5 m, y mediante procesamiento en ArcGis se generó el Hill Shade.
- Corrientes de agua superficiales: El shp de información de esta característica se realizó en ArcGis por digitalización de ríos y cuerpos de agua de las cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM), con clave, F12-B33, F12-B34, F12-B35, F12-B43, F12-B44 y F12-B45, ya que son las que mayor detalle representan.
- Geología: las características geológicas se obtuvieron las cartas geológico-mineras del SGM, F12-B33, F12-B34, F12-B35, F12-B43, F12-B44 y F12-B45, destacando formaciones litológicas y estructuras geológicas.
- Precipitación: Se realizó a través de la digitalización del mapa de “Aspectos geográficos del Estado de Baja California Sur” (INEGI, 2018) y procesado dentro de ArcGis.

Basándose en los requerimientos para la aplicación del método de estimación de recarga dado por la ecuación 4.1 dada en Healy (2010).

$$D = P - ET^{uz} - \Delta S^{uz} - R_{off} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

- **D** es el drenaje del suelo,
- **P** es precipitación más riego,
- **ET^{uz}** es la evapotranspiración de la vegetación,
- **ΔS^{uz}** es el cambio de almacenamiento en el suelo y
- **R_{off}** es escorrentía.

Los datos requeridos para la aplicación del balance hídrico de humedad del suelo son:

- **Precipitación:** Datos obtenidos del portal de Daymet por imágenes a nivel mensual (2021).
- **Evapotranspiración:** Para la determinación de este parámetro se consideró el método de Blanney-Criddle, ya que fue el más apropiado entre los que se presentan en la tabla 4.3, teniendo en cuenta los insumos y las características del sitio, así como los propósitos de la investigación.

Tabla 4.3 Métodos disponibles para obtención de evapotranspiración.

Método	Medidas necesarias	Otros datos
Thornthwaite	Temperatura.	De la latitud por una tabla se obtienen el n° teórico de horas de sol.
Jensen-Heise	Temperaturas (medias, máx. y mín. del mes más cálido), altitud, radiación solar.	Tablas de n° teórico de horas de sol, La radiación se puede estimar.
Hargreaves	Temperatura, radiación solar	La radiación solar se puede estimar con temperaturas máx. y mín. diarias.
Blanney-Criddle	Temperatura.	Tablas de n° teórico de horas de sol, Coeficiente que depende del cultivo.
Turc	Temperaturas, horas reales de sol.	De las horas de sol se obtiene la radiación global incidente (cal/cm ² .dia) con una fórmula
Penman	Temperatura, horas reales de sal, velocidad del viento, humedad relativa.	Por tablas se obtienen otros parámetros.

Fuente: Elaboración propia con base en Ángeles et al. (2002).

La ecuación 4.2 dada por el método de Blanney and Criddle se especifica como:

$$ETc = Kg * F \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

- ***ETc*** es la evapotranspiración del cultivo,
- ***Kg*** es el coeficiente total del ajuste que depende del cultivo y la ubicación de la zona de estudio,
- ***F*** es el factor climático que es equivalente a la ***ETo*** global.

De inicio este método fue diseñado para estimar evapotranspiración de cultivo durante el ciclo vegetativo. En el presente estudio, la ecuación sufre modificaciones, la primera es la sustitución de ***Kg*** por el Coeficiente de Cultivo (***Kc***) para cada mes del año, quedando de este modo la ecuación 4.3:

$$ETc = Kc * F \quad (Ec. 4.3)$$

Donde:

- ***Kc*** es el coeficiente de cultivo (obtenidos de datos experimentales de acuerdo con el Servicio de Conservación del Suelo, del Departamento de agricultura de Estados Unidos, por sus siglas en ingles USDA).

Por lo tanto, para la obtención de ***F*** se implementa la ecuación 4.4.

$$F = \sum_{i=1}^n fi \quad (Ec. 4.4)$$

Donde:

- ***fi*** son valores del factor climático a nivel mensual.

La ecuación para la obtención de ***fi*** (Ecuación 4.5).

$$fi = \left(\frac{Ti + 17.8}{21} \cdot 8 \right) (Pi) \quad (Ec. 4.5)$$

Donde:

- ***Pi*** es el porcentaje de horas luz del mes respecto al total anual.
- ***Ti*** es la temperatura media mensual.

Phelan también propuso la corrección de la ecuación de Blanney-Criddle en donde los valores de f_i mensuales están en función de las temperaturas medias mensuales, determinando la ecuación 4.6.

$$K_{ti} = (0.031144T_i + 0.2396) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde:

- K_{ti} es el coeficiente de correlación de temperatura,
- T_i es la temperatura media mensual.

debido a las modificaciones realizadas a la ecuación para la obtención del valor de ET_c a nivel mensual es necesario multiplicar el producto de $(f_i * K_{ti})$, por el coeficiente de cultivo a nivel mensual (K_c), de forma que se obtienen la ecuación 4.7:

$$ET_c = (K_c)(K_{ti})(f_i) \quad (\text{Ec. 4.7})$$

- Cambio de almacenamiento: Se consideró que no existe tal cambio, ya que se partió del mismo valor inicial y final.
- Escorrentía: La obtención de datos referidos a escurrimiento superficial se implementó el uso de la ecuación 4.8.

$$Q = P * C_e \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Donde:

- P es precipitación,
- C_e es el coeficiente de escurrimiento.

Para la obtención del coeficiente de escurrimiento se determinó el uso del método de Benítez et al., 1980, partiendo de la aplicación de la ecuación 4.9.

$$C_e = \text{Uso de suelo} + \text{Tipo de suelo} + \text{Pendiente} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Donde:

- $P_{\text{Uso de suelo}}$ está determinado por el uso de suelo que se considera para el estudio,
- $T_{\text{Tipo de suelo}}$ está determinado para las características de permeabilidad del sitio,

- **Pendiente** está determinada por la clasificación del porcentaje de inclinación de la pendiente.

Correspondiendo a valores predeterminados por el método de Benítez et al., 1980.

4.2. Determinación de variabilidad climática

La variabilidad climática está definida en función de las fluctuaciones de factores climáticos como la precipitación y la temperatura durante periodos de tiempo relativamente cortos, registrando valores por debajo o por encima de la normal para un carácter, o bien en donde el cambio en el comportamiento es marcado (Montealegre et al., 2000).

Para la realización de la estimación de variabilidad climática se contempla el análisis de variables como precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, considerando que estos son los parámetros de mayor importancia. Para ello se plantearon una serie de pasos:

- Definición de alcances (Identificación de escala espacial y temporal del análisis)

La escala temporal se determinó para un periodo de 30 años (1990-2019), mismo periodo que sugieren diversos autores como: Pabón, (1998) y Montealegre et al. (2000), como tiempo mínimo apropiado. La variabilidad climática se estableció con una escala temporal interdecadal, ya que esta era la más apropiada para la revisión de las fluctuaciones en los regímenes de temperatura y precipitación.

- Datos (Identificación de fuentes para la obtención de datos)

Los datos empleados fueron: el límite del acuífero, temperatura, precipitación, y registros de eventos ciclónicos, los cuales se describen con más detalle a continuación:

Límite del acuífero: Para trazar el contorno del acuífero se partió del Modelo Digital de Elevación (DEM), dicho insumo se obtuvo de la descarga de un polígono en formato kmz de Google Earth, mismo polígono que se ingresó en el programa Global Mapper que a través de la herramienta “Elevación” generaron curvas de nivel a una distancia de separación de 2 m.

Una vez obtenidas las curvas topográficas se ingresaron al programa ArcGis en donde con la herramienta “ArcToolsbox-” se obtuvo el modelo digital de elevación (Figura 4.4).

Una vez obtenida la imagen se continuo el proceso con la herramienta “Macro modeler” ingresando los afiches presentados en la Figura 4.5, mismos que sirvieron para identificar características del acuífero. El archivo resultante del proceso mostrado en la Figura 4.5 requirió de un replanteo para la obtención del insumo de limite físico del ASJC, al poder apreciar que el archivo resultante contemplaba un área poligonal menor a la que conforma al acuífero, por ello se consideró importar el archivo de “Cnc_SRTMJ1415” en el software ArcGis, en donde con apoyo de otros archivos en formato shp se trazó un polígono más preciso del área de estudio.

El proceso para obtener este polígono contempló el uso de insumos como: DEM del cual se obtuvo el archivo de curvas de nivel a través de la herramienta “ARC TOOLBOX- 3D Analyst Tools- Raster Surface- CONTOUR” asignando un rango de distancia de 2 m entre trazos de curvas de nivel; y del polígono del ASJC a disposición de CONABIO del archivo con nombre “ii_1_acuíferos_disponibilidad_cna” de donde se extrajo únicamente el polígono del acuífero con clave 0319.

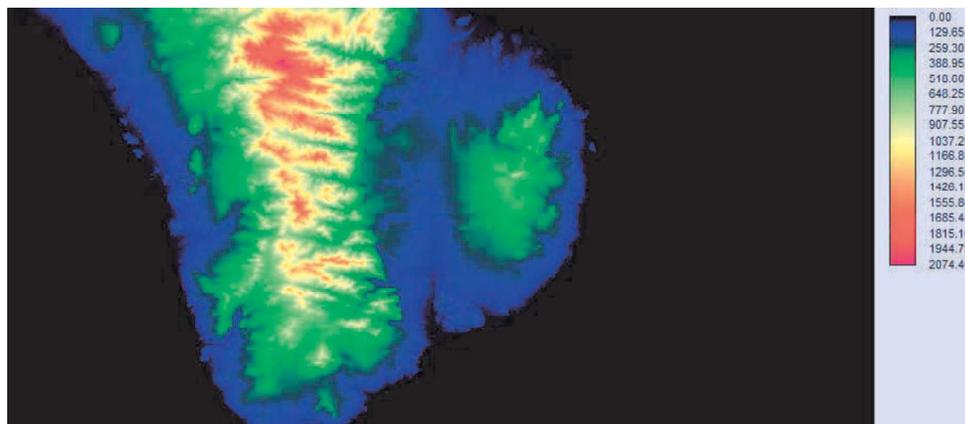


Figura 4.4 Modelo Digital de Elevación del ASJC (Con base en USGS, 2014).

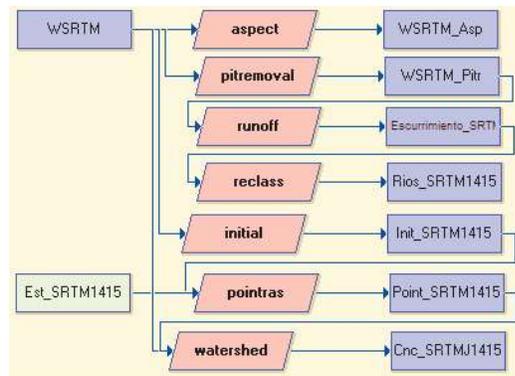


Figura 4.5 Módulo “Macro modeler” de TerrSet con procesos para la obtención del polígono del ASJC.

Con ayuda de este archivo se creó uno nuevo en formato shp con características poligonales en donde se procedió a digitalizar el polígono de acuerdo con referencias del polígono ya establecido y del trazo topográfico de las curvas de nivel. Posteriormente dicho archivo resultante se convirtió al formato raster por medio de la herramienta “ARC TOOLBOX- 3D Analyst Tools- Conversion Tools- To Raster- FEATURE to RASTER”, para poder trabajar con el dentro del programa TerrSet, obteniéndose el archivo presentado en la Figura 4.6.

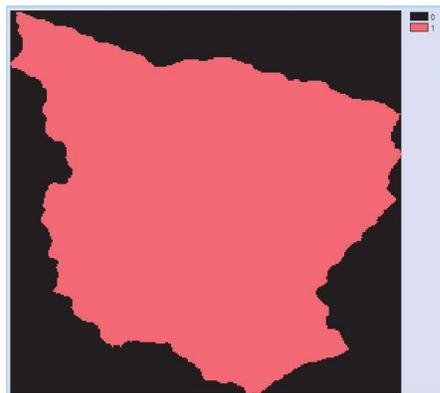


Figura 4.6 Polígono del ASJC (Elaboración propia con base en SRTM).

Datos de temperatura y precipitación: se consideró el uso de capas en formato raster de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, con valores anuales, obtenidos del portal de Daymet. Se identificaron 30 imágenes por carácter, con amplitud de 1 km por pixel. Para cada criterio considerado en el análisis fueron procesados, visualizados y analizados dentro del software TerrSet.

Se requirió de la herramienta Earth Trends Modeler del software de TerrSet, para conformar 3 series de imágenes que integran los datos de la línea temporal establecida, como se muestra en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9.

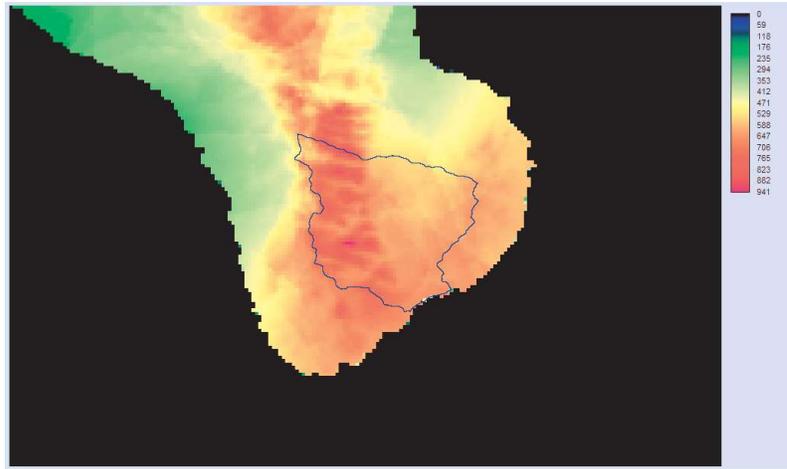


Figura 4.7 Mapa ejemplificativo de precipitación anual de 1990 en el ASJC (Con base en Daymet).

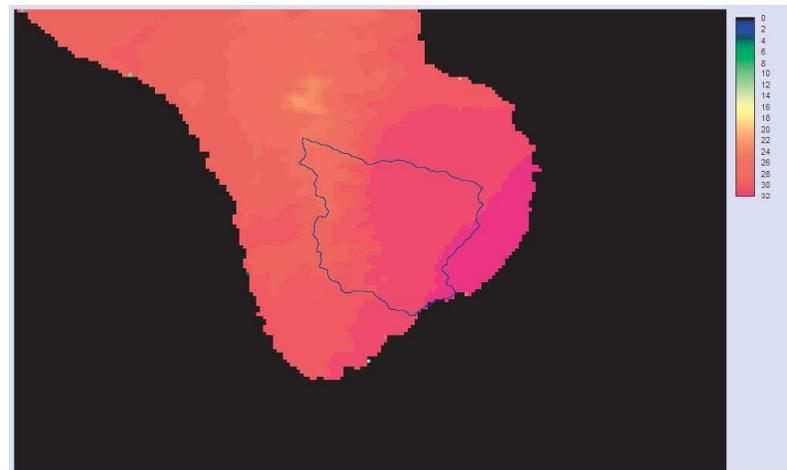


Figura 4.8 Mapa ejemplificativo de temperatura máxima anual de 1990 en el ASJC (Con base en Daymet).

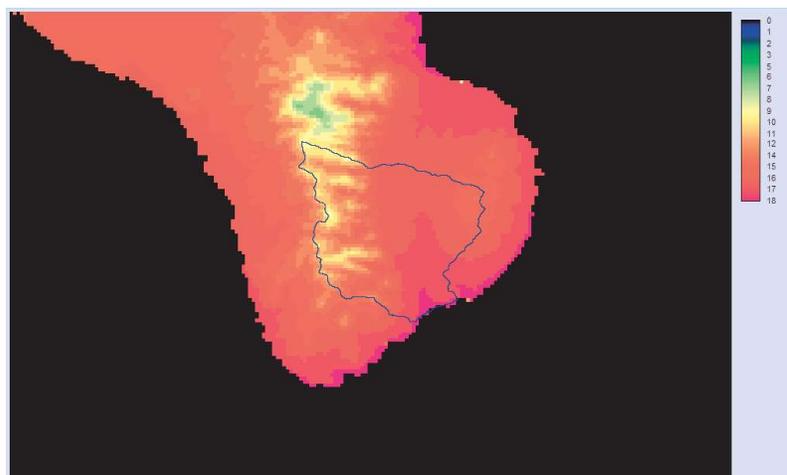


Figura 4.9 Mapa ejemplificativo de temperatura mínima anual de 1990 en el ASJC (Con base en Daymet).

Dicho proceso dio como resultado la obtención de los datos presentados en la Tabla 4.4.

Además, se consultaron los registros históricos de eventos ciclónicos en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), desde el año 1990 al 2019 (Tabla 4.5), mismos que fueron de utilidad para analizar como trasfondo el comportamiento de la precipitación en relación con este tipo de eventos.

Tabla 4.4 Datos obtenidos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para el periodo 1990-2019.

Años	Precipitación (mm)	Temp. Máx. (°C)	Temp. Mín. (°C)	Años	Precipitación (mm)	Temp. Máx. (°C)	Temp. Mín. (°C)
1990	655.80	30.23	14.65	2005	203.72	31.69	14.04
1991	416.96	30.17	13.55	2006	727.76	32.08	14.83
1992	296.70	29.91	13.96	2007	326.99	32.20	13.42
1993	720.96	30.54	13.61	2008	319.60	32.44	13.60
1994	297.25	31.41	14.03	2009	327.29	32.29	13.94
1995	496.72	31.78	14.14	2010	90.21	31.58	13.58
1996	490.74	32.15	13.19	2011	77.73	32.16	14.68
1997	529.00	31.16	14.26	2012	508.08	31.48	14.54
1998	698.92	30.87	14.13	2013	281.73	21.56	17.55
1999	211.74	31.70	14.09	2014	254.15	35.66	17.94
2000	352.81	32.11	13.74	2015	160.46	30.30	16.55
2001	722.93	31.08	13.83	2016	147.00	31.09	16.36
2002	146.93	30.44	13.96	2017	94.42	31.04	16.10
2003	731.20	31.78	15.09	2018	101.51	31.53	17.17
2004	360.11	31.64	14.15	2019	331.88	30.95	15.91

Fuente: Elaboración propia con base en Daymet (2021).

Los datos visibles en imágenes del sitio de precipitación y temperatura presentaron una forma de escalonamiento, debido a que la fuente, Daymet trabaja con datos de gran área mediante un algoritmo que crea sistemas de mosaicos con extensión de 2 grados por 2 grados que se precisan en software de Daymet. Dicho algoritmo implementa el uso de métodos de interpolación de datos de un conjunto de estaciones de observación de la superficie terrestre, registrando datos climatológicos, como la temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación (Daymet, 2021).

El método de interpolación para realizar predicciones en diferentes puntos se logra a través de la estimación iterativa de la densidad de las estaciones locales, implementando la convolución espacial de un filtro gaussiano truncado. Es por ello que el método busca

estaciones de manera radial reduciendo regiones ricas en datos e incrementando las regiones pobres en datos (Daymet, 2021).

Tabla 4.5 Registros de eventos ciclónicos con precipitación representativa sobre el ASJC.

Fecha	Nombre	Tipo	Categoría	Fecha	Nombre	Tipo	Categoría
02-03/10/1990	Rachel	Huracán	TT	02-04/09/2006	John	Huracán	H1
12/11/1991	Nora	Huracán	DT	25-26/10/2006	Paul	Huracán	TT
23-24/07/1992	Lester	Huracán	TT	04-06/09/2007	Henriette	Huracán	H1
27/06-02/07/1993	DT3E	Dep.Trop.	DT	25-26/08/2008	Julio	TTrop.	TT
04-09/07/1993	Calvin	Huracán	TT-DT	07-12/09/2008	Lowell	TTrop.	TT
20-27/09/1993	Hilary	Huracán	TT	11-12/10/2008	Norbert	Huracán	H2
11-14/09/1993	Lidia	Huracán	H2	02-04/09/2009	Jimena	Huracán	H3
23/09/1993	DT14E	Dep.Trop.	DT	21-22/09/2009	Rick	Huracán	TT
04-05/09/1995	Henriette	Huracán	H2	21-23/09/2010	Georgette	TTrop.	DT
15/09/1995	Ismael	Huracán	H1	28-29/09/2012	Norman	TTrop.	TT
14-15/09/1996	Fausto	Huracán	H1	13-17/10/2012	Paul	Huracán	H2
21-25/09/1997	Nora	Huracán	H1	28-30/08/2013	Juliette	Huracán	TT
08-10/08/1998	Frank	TTrop.	TT	13-20/09/2013	Manuel	Huracán	TT
02-03/09/1998	Isis	Huracán	TT	13-15/09/2013	Octave	TTrop.	TT
16-20/10/1998	Medeline	Huracán	TT	01-04/11/2013	Sonia	TTrop.	TT
05-09/09/1999	Greg	Huracán	TT	10-17/09/2014	Odiel	Huracán	H3
14-16/08/2000	Ileana	TTrop.	TT	04-05/11/2014	Vance	Huracán	DT
16-17/09/2000	Miriam	TTrop.	TT	06-09/06/2015	Blanca	Huracán	TT
20-20/09/2000	Norman	TTrop.	DT	07-09/08/2016	Javier	TTrop.	TT
26-30/09/2001	Juliette	Huracán	H1	04-07/09/2016	Newton	Huracán	H1
03-04/10/2001	Lorena	TTrop.	DT	30/08-01/09/2017	Lidia	TTrop.	TT
19-20/09/2002	Iselle	TTrop.	TT	11-15/06/2018	Bud	Huracán	TT
25-26/10/2002	Kenna	Huracán	H4-H5	17-20/09/2018	DT19E	Dep.Trop.	Perturbación
24-27/08/2003	Ignacio	Huracán	H2	18-19/09/2019	Lorena 1er imp.	Huracán	TT
22-24/09/2003	Marty	Huracán	H2	20-22/09/2019	Lorena 2do imp.	Huracán	H1
26/10/2004	DT16E	Dep.Trop.	DT	27/09-01/10/2019	Narda	TTrop.	TT
26-27/06/2006	Emilia	TTrop.	TT				

Fuente: Elaboración propia con base en SMN (2017).

- Evaluación en calidad de datos (Evaluar anomalías de datos)

El análisis de calidad de datos se establece mediante la observación y revisión de los datos mismos, buscando que entre estos no existan anomalías, las cuales se pueden ver representadas como faltantes de datos, y aquellos que evidencien valores que pierden

congruencia total con la realidad, respecto a la temporalidad establecida.

- Análisis (Análisis del comportamiento de la precipitación y temperatura, estimando errores e intervalos de confianza, así como, identificación de eventos extremos)

Una vez establecidos los criterios y obtenidos resultados que evidencien el comportamiento de temperatura y precipitación se realizó el análisis para establecer sitios específicos en la línea temporal, resaltando aquellos años con anomalías de la relación entre ellas, así como, una relación con los registros de eventos ciclónicos.

- Interpretación (Describir comportamiento histórico, explorando relaciones, identificación de anomalías e identificación de eventos extremos)

Con el objetivo de realizar un adecuado análisis se planteó el uso de diversas herramientas y softwares (TerrSet, Excel), con el propósito de analizar visualmente los datos y poder describir la variabilidad climática.

Se considera el uso de test estadísticos para detectar cambios de las variables. Para ello se usó el programa Trend, el cual integra diversos test, los cuales se encuentran descritos a continuación y se integra información dentro de la Tabla 4.6:

- *Test Mann-Kendall*: Es una prueba de las más implementadas en estudios para el análisis de variables de carácter climático, al tener mayor certeza y exactitud en demostrar cambios. Además, el test Mann-Kendall tiene la capacidad de detectar cambios en la media de datos y no asume independencia entre ellos resultando de utilidad para diferenciar cambios (Puertas et al., 2011).
- *Test Spearman's rho*: Prueba no paramétrica que se usa para medir la fuerza de la asociación entre dos variables, donde el valor $r = 1$ significando que la correlación es positiva perfecta y el valor $r = -1$ significa una correlación negativa perfecta.
- *Test Linear regression*: Esta prueba intenta modelar la relación entre dos variables ajustado una ecuación lineal a los datos en observación. Es usado cuando se quiere predecir el valor de una variable (dependiente) en función del valor de otra variable (independiente), en donde el modelador deberá determinar

primero si existe o no una relación entre las variables de interés (Towards data science, 2018).

- *Test Cusum*: Consiste en la acumulación progresiva de los residuos recursivos que posteriormente se normalizan entre la estimación insesgada (valor paramétrico que se desea obtener) de la desviación típica de la perturbación. Suponiendo estabilidad en los valores de dichas sumas acumuladas, deberán de oscilar entre las líneas de significancia representadas por rectas definidas a partir de dos puntos.
- *Cumulative deviation*: Prueba paramétrica en donde los datos son desconocidos en cualquier momento del periodo observado probando si los valores medios anteriores y posteriores son diferentes según se supone sea una distribución normal, averiguando cuantas veces cambia la media después de unas pocas observaciones (Oh et al., 2006).
- *Worsley likelihood y Student's t*: Con estos métodos de prueba paramétricos se determina si la media de dos periodos diferentes es constante suponiendo que los datos se distribuyen normalmente, en donde la hipótesis nula establece que las medias de dos grupos de datos independientes son las mismas (Oh et al., 2006).

Bajo las características de cada test estadístico integrado en el programa Trend, se concluyó el uso del Mann-Kendall ya que es uno de los más usados, además, de que su entendimiento y aplicación en los datos está más relacionada a lo deseado. Para entender los resultados del test Mann-Kendall se requiere del uso de la Tabla 4.7.

Tabla 4.6 Test's de tendencias estadísticas.

Test	Descripción
Mann-Kendal	Prueba no paramétrica, basada en la desviación estándar. Cada par de variables observados y_i, y_j ($i > j$) de las variables aleatorias es inspeccionada para determinar si $y_i > y_j$ o $y_i < y_j$.
Spearman's rho	Es una prueba de rango no paramétrica que determina la existencia de correlación entre pares de datos consecutivos en una serie de tiempo.
Linear regression	Prueba paramétrica que asume que los datos están distribuidos normalmente. Prueba si existe una tendencia lineal al examinar la relación entre el tiempo (x) y la variable de interés (y).
Cusum	Método no paramétrico que prueba si las medias en dos partes de un registro son diferentes (para un cambio de tiempo desconocido).
Cumulative deviation Worsley likelihood	Esta prueba determina si las medias en dos partes de un registro son diferentes para un tiempo de cambio desconocido. La prueba asume que los datos se distribuyen normalmente.
Student's t	Método que prueba si las medias entre dos parámetros diferentes son diferentes. La prueba asume que los datos se distribuyen normalmente.

Fuente: Trend (2005).

Tabla 4.7 Descripción de la significancia del test Mann – Kendall.

Significancia	Descripción/Simbología	Z
Sin tendencia	ST: Cuando el valor absoluto de Z sea igual a 0 la hipótesis nula al nivel de 5% será aceptada.	0
Tendencia significativa creciente	TSC: Siendo el resultado de Z igual o mayor que 1.96 representa valor positivo, indicando tendencia creciente.	$> + 1.96$
Tendencia significativa decreciente	TSD: Siendo el resultado de Z menor que -1.96 representa valor negativo y tendencia significativa decreciente.	$< - 1.96$
Tendencia no significativa creciente	TNSC: Siendo el resultado de Z menor que 1.96 demuestra tendencia no significativa creciente.	$< + 1.96$
Tendencia no significativa decreciente	TNSD: Siendo el resultado de Z mayor que -1.96 indicara tendencia no significativa decreciente.	$> - 1.96$

Fuente: Alencar da Silva et al (2017).

Además, se realizó de manera adicional y como refuerzo a la variabilidad climática, la generación de anomalías, ocurridas para las tres variables integradas en este trabajo (Precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, mismo que sería de apoyo para visualizar el comportamiento de variaciones en las variables para la línea de tiempo planteada (1990 a 2019).

El proceso utilizó de las imágenes de variables dentro del software Terrset, en su módulo “Earth Trends Modeler”, en donde de la serie de datos anuales se generó una media, indicando datos de manera anual sobre cuanto precipitación descendió o aumento con respecto a la media trazada.

4.3. Cambio de uso de suelo: revisión y análisis de imágenes satelitales.

El análisis en el cambio de uso de suelo en el área de estudio aporta información relevante al integrarse dentro de lo planeado para el desarrollo del método de estimación de recarga. Para la evaluación del cambio de uso de suelo se consideró el método de reclasificación supervisada con apoyo del software TerrSet.

La selección de los años representativos en la línea temporal de 30 años considera los comportamientos abruptos en años con altos y bajos registros de precipitación y eventos ciclónicos. Se identificaron 2 años inicialmente, 1993 y 2019, los que presentan una precipitación alta y un alto número de registros ciclónicos. Del mismo modo se identificaron dos años con una presencia mínima de eventos y cuya precipitación fuera equivalente al promedio, que corresponde a los años de 1997 y 2017.

Tomando en cuenta que el cambio de uso de suelo sería similar en años próximos y que el cambio no sería notorio con respecto del tiempo se decidió agrupar estos años tomando un año intermedio entre los más antiguos y los más recientes, por lo cual la selección del año 1995 se consideró representativo del periodo de 1993-1997, y para el periodo de 2017-2019 se eligió al año 2018, dejando una temporalidad intermedia de 24 años.

Weather Spark (2020) define que la temporada de estiaje de San José del Cabo se presenta en los meses de marzo, abril y mayo, mientras que la temporada de lluvias suele presentarse en agosto, septiembre y octubre, por lo cual se obtuvieron las imágenes del mes de octubre para ambos años.

Se dispuso de 4 escenas de imágenes satelitales (Tabla 4.8) obtenidas del sitio del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Dichas escenas a su vez se integran en pares de escenas para cada banda de las imágenes satelitales, de Landsat 5 y para el satélite Sentinel 2, formando únicamente 2 imágenes. Se obtuvieron de diferentes fuentes debido a que uno solo no tenía los datos requeridos de la línea temporal.

Es conocido que las imágenes Landsat 5 se integran de 7 bandas y las de Sentinel 2 se integran de 13 bandas. Para unir estas dos escenas diferentes se empleó la herramienta “IDRISI Image Processing- Restoration- MOSAIC”, obteniendo una imagen uniforme.

Como insumo primordial para la clasificación del uso de suelo se requiere de una imagen compuesta de bandas para formar la imagen RGB (por sus siglas en ingles Red, Green, Blue) la cual debe servir como referencia distintiva al momento de diferenciar un uso de suelo de otro. La integración RGB de Lansat 5 requiere de la combinación de las bandas B3, B4 y B7, mientras que para la imagen Sentinel-2 se requieren las bandas B5, B8a y B11, dicho proceso se realizó dentro de la herramienta “IDRISI Image Processing- Enhancement-COMPOSITE”, obteniendo la Figura 4.10 (Composite_L5_OCT1995) y la Figura 4.11 (Composite_S2_OCT2018) respectivamente.

Tabla 4.8 Escenas de imágenes satelitales usadas para clasificación supervisada de uso de suelo y vegetación del ASJC.

Satélite	Clave de imagen	Resolución (m)
Lansat 5 TM C1	LT05_L1TP_033044_19951011_20170106_01_T1	30
	LT05_L1TP_033044_19951002_20170107_01_T2	30
Sentinel-2	T12QWL_20181019T175329	10
	T12QXL_20181019T175329	10

Fuente: Elaboración propia con base en USGS.

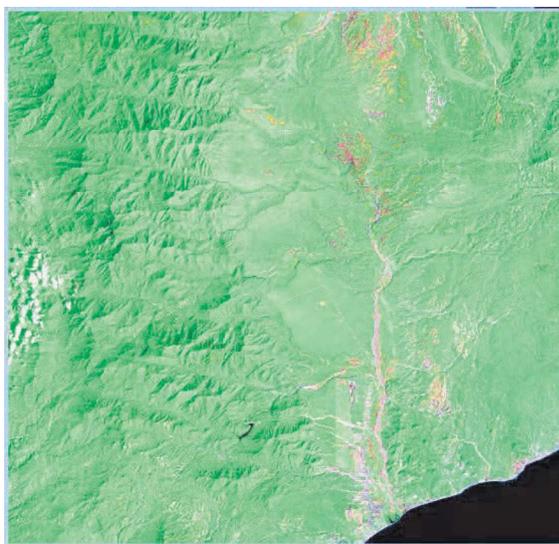


Figura 4.10 Composite_L5_OCTUBRE_1995 (USGS, 2017).

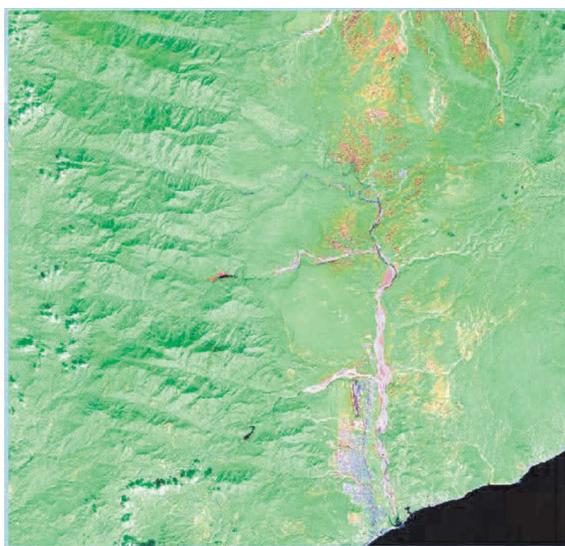


Figura 4.11 Composite_S2_OCTUBRE_2018 (USGS, 2021).

Posteriormente se usó la herramienta “IDRISI Image Processing- Segmentation Classifiers- SEGMENTATION” para obtener la imagen resultante del área de estudio segmentada por polígonos que diferencien la reluctancia del uso de suelo. En el caso de la imagen Landsat-5 se introdujeron las 7 bandas, mientras que en el caso de la imagen Sentinel-2 se agregaron las bandas B2, B3, B4 y B8. La integración de bandas para realizar la segmentación contempla que para el caso de las bandas de Landsat-5 todas ellas tienen una resolución de 30 m y para el caso de la Imagen de Sentinel-2, ésta se integra de bandas de 10, 20 y 60 m de resolución. Con dicho proceso se obtuvieron las Figuras 4.12 y 4.13.

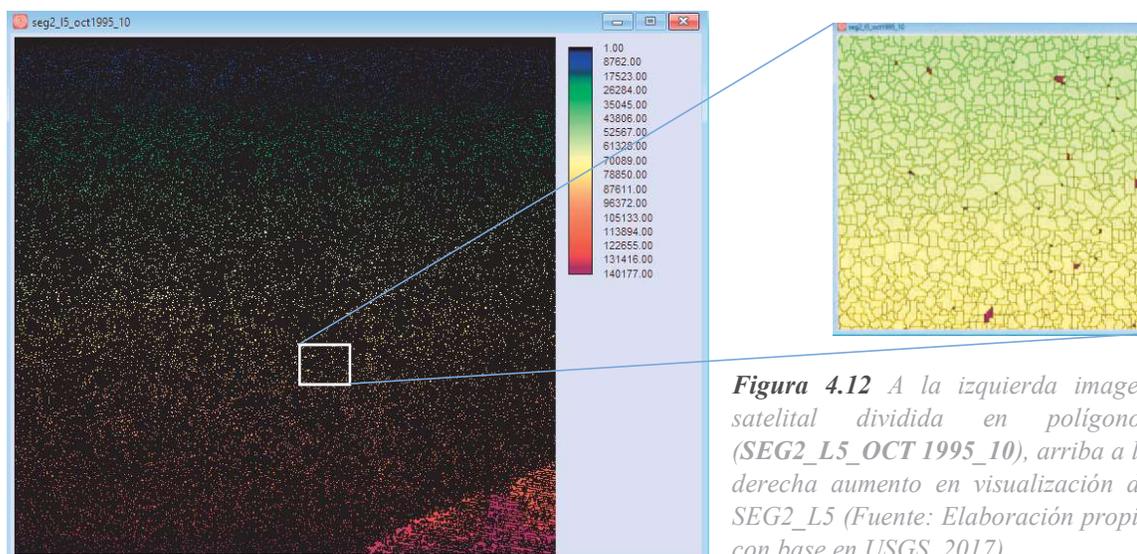
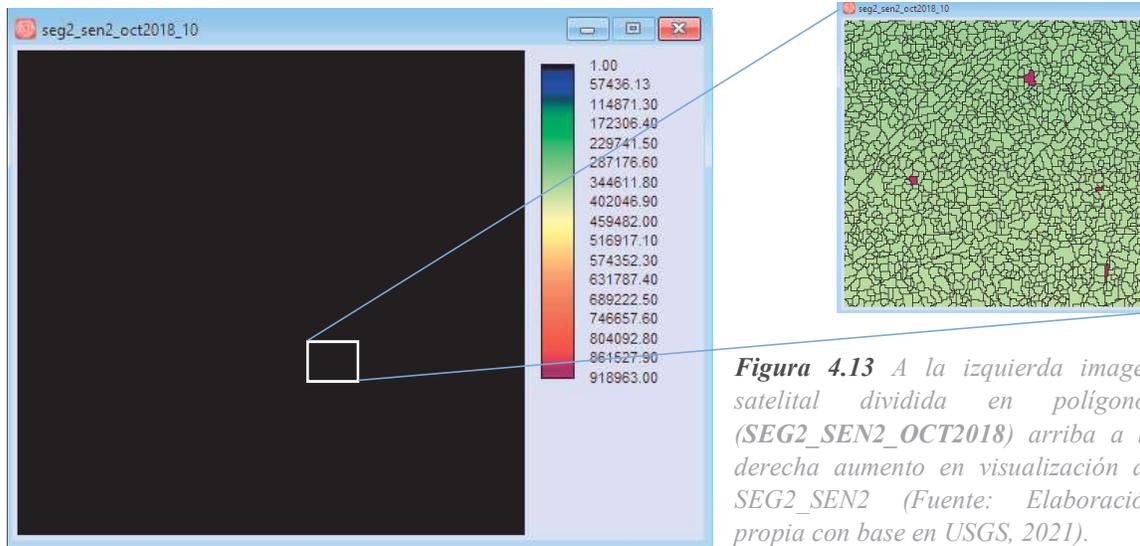


Figura 4.12 A la izquierda imagen satelital dividida en polígonos (SEG2_L5_OCT 1995_10), arriba a la derecha aumento en visualización de SEG2_L5 (Fuente: Elaboración propia con base en USGS, 2017).



La reclasificación de uso de suelo se sobrepone a la imagen resultante como se muestra en la Figura 4.14 (Composite_L5_OCT1995 + SEG2_L5_OCT1995) y la Figura 4.15 (Composite_S2_OCT2018 + SEG2_S2_OCT2018). Secuencialmente se implementó el uso de la herramienta “IDRISI Image Processing- Segmentation Classifiers- SEGTRAIN” en donde se agregaron nuevamente las imágenes correspondientes (Composite y Segmentation).

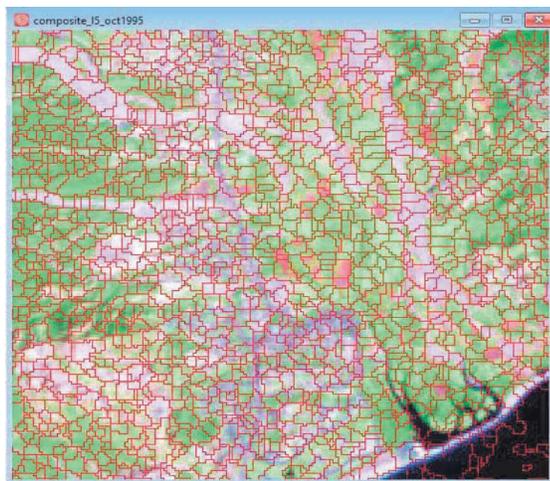


Figura 4.14 Composite_L5_OCT2018 + SEG2_L5_OCT1995 (Fuente: Elaboración propia con base en USGS, 2021).



Figura 4.15 *Composite_S2_OCT2018 + SEG2_S2_OCT2018 (Fuente: Elaboración propia con base en USGS, 2021).*

Para la reclasificación de uso de suelo se seleccionaron polígonos que tuvieran cierto parecido con la clasificación realizada por CONABIO y SEDATU (Figura 2.14), en el que se integra los caracteres de: Bosque encino, bosque encino-pino, agricultura de riego, matorral desértico rosetófilo, mezquital desértico, cauce hidrológico, pastizal cultivado, matorral sarco-crasicaule, zona urbana y no identificado.

Para ello se reclasificaron y agruparon los usos del suelo como se presenta en la Tabla 4.9. Para la selección de los polígonos de la reclasificación dentro de la herramienta “SEGTRAIN” se identificaron 50 polígonos por carácter de reclasificación en uso de suelo.

En el caso particular de reclasificar el uso de suelo de “cauce hidrológico” a “suelo desnudo” se consideró la evidente particularidad de que los cauces son intermitentes y dejan al descubierto materiales litológicos sedimentarios y afloramientos rocosos. Por otro lado, la clasificación de INEGI y CONABIO señalada como un uso de suelo “no identificado” que se reclasifico al tipo “pastizal”, debido a que, con apoyo de como Google Earth, en estas áreas se identificó este carácter.

Tabla 4.9 Clasificaciones de uso de suelo para el ASJC.

Uso de suelo	
Clasificación de uso de suelo anterior, correspondiente a INEGI y CONABIO	Reclasificación de uso de suelo, considerando categorías similares
Bosque encino	Bosque de encino
Bosque encino-pino	
Agricultura de riego	Agricultura
Matorral desértico rosetófilo	Matorral desértico
Matorral sarco-crasicaule	
Mezquital desértico	Mezquital
Cause hidrológico	Suelo desnudo
Zona urbana	Asentamiento humano
No identificable	Pastizal
	Cuerpo de agua

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a ello la imagen resultante con nombre Segtrain se ingresa a la herramienta “IDRISI Image Processing- Hard Classifiers- MAXLIKE”, con la que se obtuvo una imagen reclasificada de acuerdo con las zonas de entrenamiento de los polígonos identificados. Las imágenes resultantes se continuaron procesando dentro del software ArcGis para la edición de los mismos mapas y la obtención de áreas ocupacionales de los distintos usos de suelo y vegetación (Figuras 4.16 y 4.17).

Para la obtención del área representativa de los usos de suelo se requirió abrir la tabla de atributos de la capa resultante, agregando una columna con ayuda de la herramienta “Table options- Add field” especificándole el nombre de área, con la cual se obtuvieron los parámetros con la herramienta “Calculate geometry”. Estos datos son de utilidad para determinar los cambios en superficie y en porcentajes de los usos de suelo.

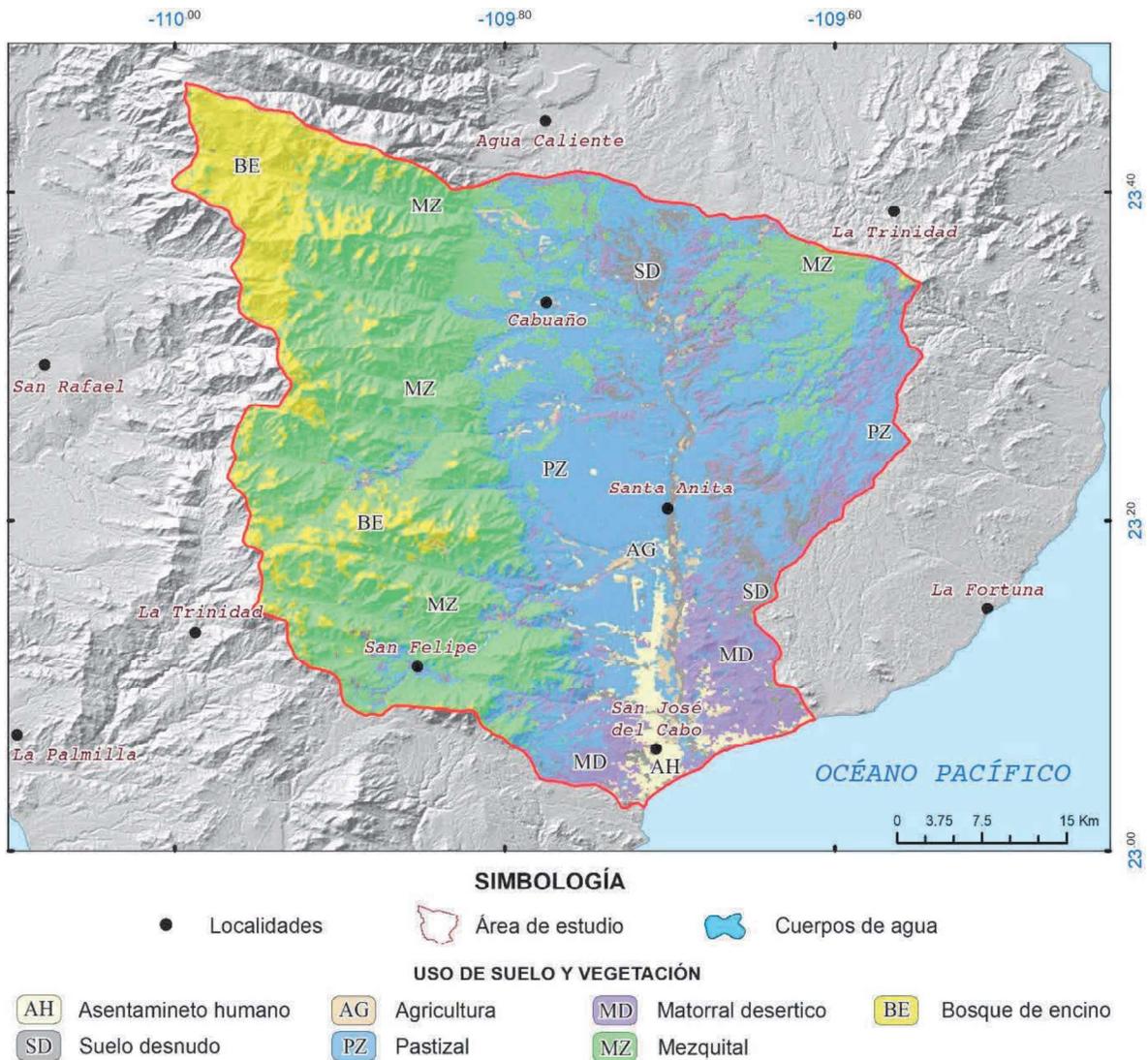


Figura 4.16 Reclasificación de uso de suelo y vegetación de imagen satelital Landsat5, octubre 1995
 (Fuente: Elaboración propia con base en USGS, 2020; INEGI, 2014 y SEDATU, 2013).

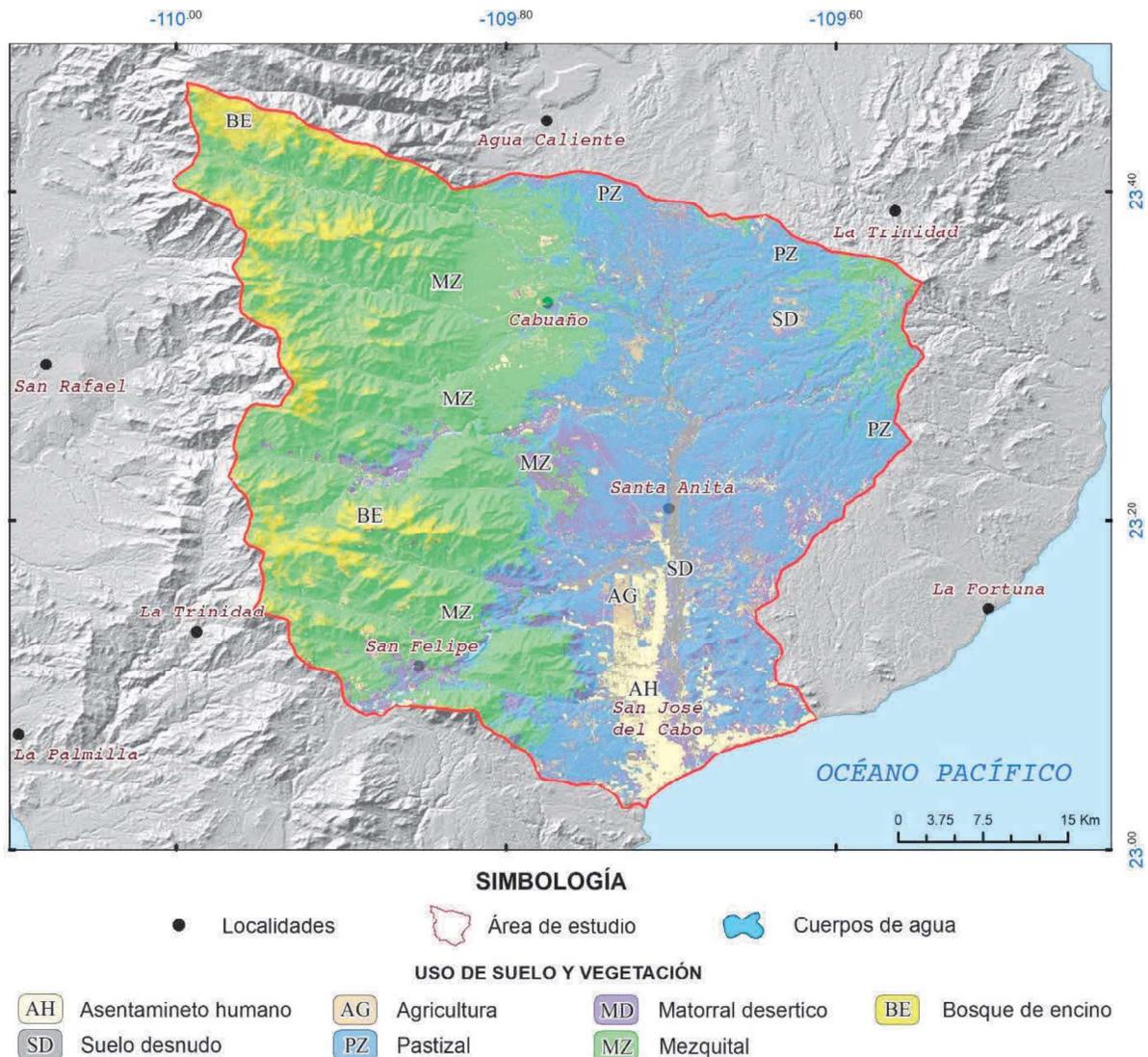


Figura 4.17 Reclasificación de uso de suelo y vegetación de imagen satelital Sentinel2, octubre 2018
(Fuente: Elaboración propia con base en USGS, 2020; INEGI, 2014 y SEDATU, 2013).

4.4. Estimación de la recarga potencial del acuífero San José del Cabo

4.4.1. Insumos y métodos para la aplicación del método de balance de humedad del suelo

Los insumos requeridos para el método son los correspondientes a las variables incluidas en la ecuación de balance (Ecuación 4.1), la cual se describe en Healy (2010), modificada con base a los requerimientos e insumos especificados determinando la ecuación 4.10:

$$R_p = P - ET_c - E_s \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Dónde:

- ***Rp*** es la recarga potencial,
- ***P*** es precipitación,
- ***ETc*** es evapotranspiración del cultivo,
- ***Es*** es el escurrimiento.

Dichos parámetros se estiman o se obtienen de manera individual y únicamente contemplando 4 años, mismos que fueron seleccionados para estimar la recarga tomando en consideración los argumentos que se presentan en el párrafo dos del subcapítulo 4.3 “Cambio de uso de suelo”, en donde se especifica la selección de los años 1993, 1997, 2017 y 2019.

Precipitación: Los datos requeridos de precipitación mensual para los años de 1993, 1997, 2017 y 2019 se obtuvieron a través del portal de Daymet, y consultados del acceso HTTPserver, los cuales se importaron al software TerrSet con ayuda de la herramienta “Import- GDAL Conversion Utility”, en un formato raster para las 12 capas de imágenes (una por mes) de cada año, con una resolución de 1 km.

Posteriormente se recortó el área de interés con respecto al polígono del área de estudio, a través del módulo “Earth Trends Modeler- ETM Sessions Parameters”, ingresando un Raster group de las imágenes para los doce meses por cada año. Como resultado se obtiene una imagen en forma cubica visual en el módulo “Explore Space/ Time Dynamics”, integrando las capas de información del año ingresado como se muestra en las Figuras 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21.

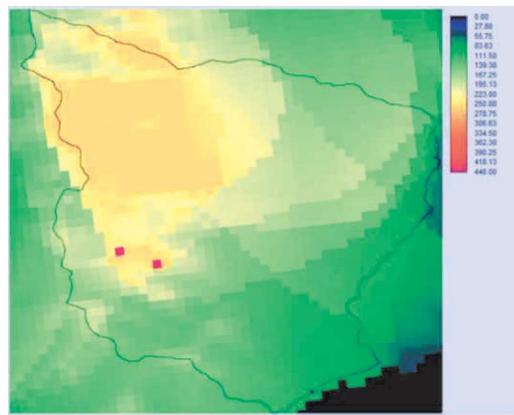


Figura 4.18 Mapa ejemplificativo de precipitación media mensual en el ASJC para septiembre del año de 1993 (Con base en Daymet).

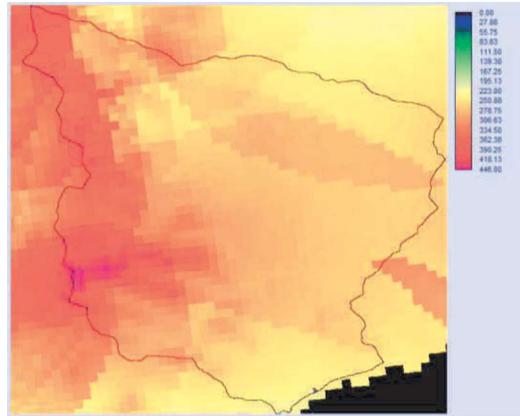


Figura 4.19 Mapa ejemplificativo de precipitación media mensual en el ASJC para septiembre del año de 1997 (Con base en Daymet).

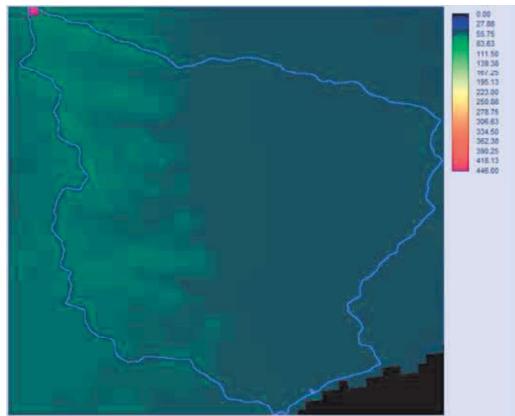


Figura 4.20 Mapa ejemplificativo de precipitación media mensual en el ASJC para septiembre del año de 2017 (Con base en Daymet).

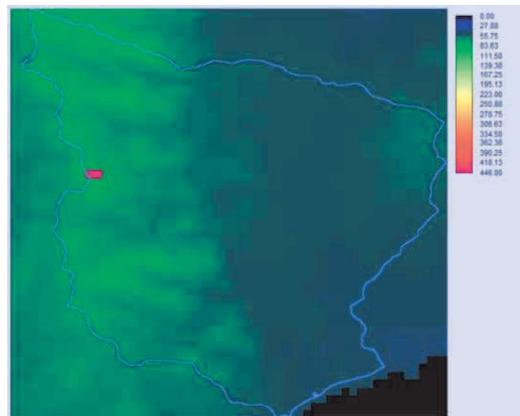


Figura 4.21 Mapa ejemplificativo de precipitación media mensual en el ASJC para septiembre del año de 2019 (Con base en Daymet).

Para obtener los datos numéricos de las capas de información se generó una tabla de Excel con datos obtenidos a través de la herramienta “Extract”, implementando la figura poligonal del acuífero.

Temperatura: Los datos de temperatura media mensual se obtuvieron del portal de Daymet, con resolución de 1 km. Se requirió de la obtención de imágenes de los 12 meses por los 4 años de los caracteres de temperatura máxima mensual (T_{máx}) y temperatura mínima mensual (T_{mín}).

Dichos datos dieron un total de 96 imágenes, mismas que se trabajaron a través de la herramienta “MacroModeler”, en donde ingresando el afiche “Add” se sumaron las imágenes de T_{máx} con las de T_{mín}, según respectivo mes y año. Posterior a ello, se agregó el afiche “Scalar” bajo la función “DIVIDE”, con el cual la imagen se dividió en 2, como se muestra en la Figura 4.22.

Los datos obtenidos se agruparon en grupo raster para cada año, trabajándolos dentro de la herramienta “Earth Trends Modeler” obteniéndose las Figuras 4.23, 4.24, 4.25 y 4.26, evidenciando los datos numéricos representativos del acuífero.

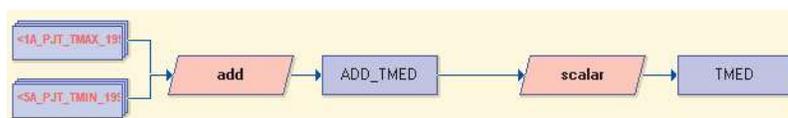


Figura 4.22 Macro Modeler con organización de afiches para obtención de imágenes de temperatura media mensual.

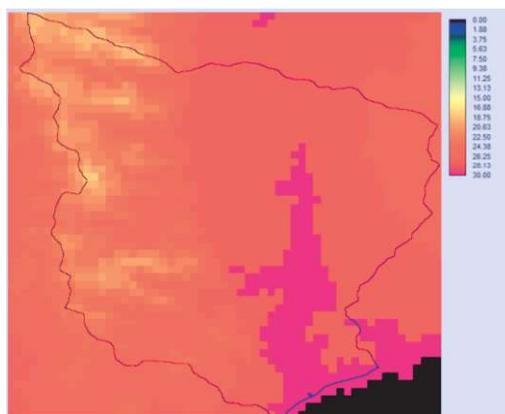


Figura 4.23 Mapa ejemplificativo de temperatura media mensual en el ASJC para septiembre del año de 1993 (Con base en Daymet).

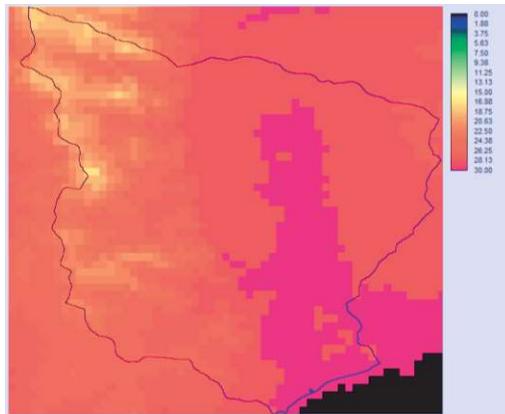


Figura 4.24 Mapa ejemplificativo de temperatura media mensual en el ASJC para septiembre del año de 1997 (Con base en Daymet).

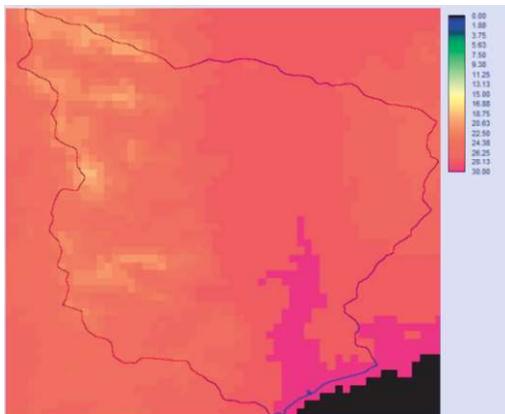


Figura 4.25 Mapa ejemplificativo de temperatura media mensual en el ASJC para septiembre del año de 2017 (Con base en Daymet).

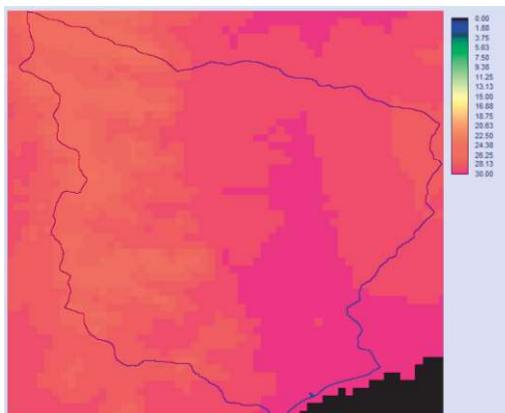


Figura 4.26 Mapa ejemplificativo de temperatura media mensual en el ASJC para septiembre del año de 2019 (Con base en Daymet).

Evapotranspiración del cultivo: En la obtención de los datos de evapotranspiración para su integración se consideró el uso del método desarrollado por Ángeles et al. (2002), siendo un método ampliamente usado en el cual interviene temperatura media mensual y porcentaje de

horas luz al mes con respecto al total anual. Dicho método se expresa a través de la ecuación 4.11:

$$ETc = (Kc)(Kti)(fi) \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Dónde:

- **ETc** es la evapotranspiración de cultivo (mm),
- **Kc** es el coeficiente de desarrollo (Adimensional),
- **Kti** es el coeficiente de corrección de temperatura (Adimensional),
- **fi** es el factor climático (Adimensional).

Para obtener el valor de **Kti** se requiere implementar la ecuación 4.5. Mientras que para el caso del valor **fi** se requiere de la ejecución de la ecuación 4.6.

La sustitución de datos para la resolución de las ecuaciones se realizó en forma inversa a la presentada anteriormente, así para el caso de la ecuación 4.6 se emplearon los datos de temperatura media mensual obtenidos de los 4 años, correspondientes al valor de **Ti**. Para conocer **Pi** se empleó la Tabla 4.10, la cual representa el valor correspondiente respecto al porcentaje de horas luz para la latitud 23°.

Tabla 4.10 Porcentaje de horas luz o insolación en el día para cada mes del año en relación al número total en un año.

Latitud	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
15°	7.94	7.10	8.44	8.46	8.99	8.82	9.05	8.83	8.27	8.24	7.73	7.87
16°	7.90	7.08	8.43	8.47	9.02	8.86	9.09	8.86	8.27	8.22	7.70	7.83
17°	7.86	7.06	8.43	8.49	9.06	8.90	9.13	8.88	8.27	8.20	7.66	7.79
18°	7.82	7.04	8.42	8.51	9.10	8.95	9.17	8.91	8.28	8.18	7.63	7.74
19°	7.78	7.02	8.42	8.52	9.13	8.99	9.21	8.93	8.28	8.17	7.59	7.70
20°	7.74	7.00	8.41	8.54	9.17	9.03	9.25	8.96	8.28	8.15	7.56	7.65
21°	7.70	6.98	8.41	8.56	9.20	9.08	9.30	8.98	8.29	8.13	7.52	7.60
22°	7.66	6.95	8.41	8.58	9.24	9.12	9.34	9.01	8.29	8.11	7.48	7.56
23°	7.62	6.93	8.40	8.60	9.28	9.17	9.38	9.03	8.29	8.09	7.45	7.51
24°	7.57	6.91	8.40	8.61	9.32	9.22	9.42	9.06	8.30	8.07	7.41	7.46
25°	7.53	6.88	8.39	8.63	9.36	9.27	9.47	9.09	8.30	8.05	7.37	7.41
26°	7.49	6.86	8.39	8.65	9.40	9.31	9.51	9.12	8.30	8.03	7.33	7.36
27°	7.44	6.84	8.38	8.67	9.44	9.36	9.56	9.14	8.31	8.01	7.29	7.31
28°	7.39	6.81	8.38	8.69	9.48	9.41	9.61	9.17	8.31	7.99	7.25	7.26
29°	7.35	6.79	8.37	8.71	9.52	9.47	9.66	9.20	8.32	7.97	7.21	7.20
30°	7.30	6.76	8.37	8.73	9.57	9.52	9.71	9.23	8.32	7.94	7.16	7.15
31°	7.25	6.74	8.36	8.75	9.61	9.57	9.76	9.26	8.32	7.92	7.12	7.09
32°	7.20	6.71	8.36	8.77	9.66	9.63	9.81	9.29	8.33	7.90	7.08	7.04

Fuente: Angeles et al., 2002.

Para la visualización de datos y aplicación de la ecuación 4.6 se ingresaron los datos de temperatura media mensual en el software TerrSet dentro de la herramienta “Image Calculator” indicando los datos en forma de la ecuación para aplicar (Figura 4.27), y así obtener imágenes resultantes del valor f_i para cada mes de los cuatro años. También se ingresaron los datos en el programa Excel para visualizar datos numéricos.

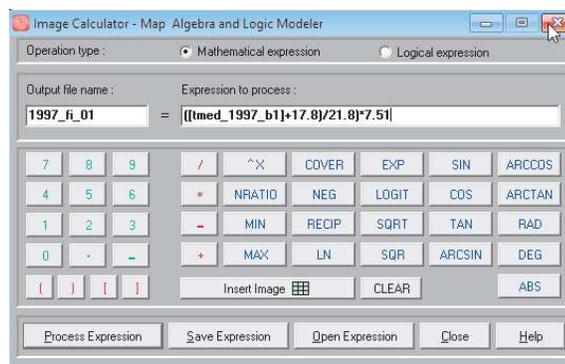


Figura 4.27 Herramienta Image Calculator (Terrset) con ecuación de imágenes para obtención de valor de f_i .

Posteriormente se obtuvieron los valores correspondientes a ***K_t*** con respecto a la ecuación 4.5, obteniendo las imágenes representativas de cada mes a través de la herramienta “Image Calculator”.

Para la obtención del valor ***K_c*** hay que considerar los siete usos de suelo presentes en el acuífero (suelo desnudo, asentamiento humano, agrícola pastizal, bosque de encino, matorral desértico y mezquital). Se utilizó como guía la Tabla 4.11 para el suelo con vegetación, esta tabla muestra las etapas de desarrollo del cultivo según la FAO (2021). En el caso de asentamientos humanos el valor de ***K_c*** se consideró igual a 0.

Para el uso de suelo agrícola se consideró tomar en cuenta la práctica agrícola de mayor producción la cual corresponde a tomate, y en el caso del uso de pastizal se sustituyó por suelo con cubierta de pasto. Para la ocupación de uso de suelo desnudo a este se le asignan valores iguales a 0 ya que no presenta vegetación. El uso de suelo de bosque de encino se consideró sustituirlo por valores de árboles de coníferas. En el caso del matorral desértico se asignó un valor igual al césped, y, por último, el uso de mezquital se asignó un valor igual al de árboles de cítricos sin cubierta vegetal.

Considerando la Tabla 4.12 se utilizó ***K_c*** correspondiente dependiendo del desarrollo de vegetación de acuerdo con el mes del año, obteniéndose los valores de ***K_c***.

Una vez obtenidos los valores de ***K_c*** estos se asignarán como un valor correspondiente por el tipo de uso de suelo correspondiente para cada mes del año de manera que este sea equivalente en forma de imágenes. Por lo tanto, se realizó la asignación de valores a 24 mapas de uso de suelo los 12 primeros correspondientes a el año 1995 y los 12 restantes para el año 2018, con el módulo de “Image Calculator” en TerrSet.

Tabla 4.11 Etapas de desarrollo del cultivo (***K_c***), según FAO.

Valores de <i>K_c</i>	Etapas de desarrollo	Descripción
kc1	Inicial	kc promedio desde la plantación a 10% de cobertura.
kc1-kc2	Rápido crecimiento	De 10% de cobertura al 75% al máximo consumo de agua, lo que llegue primero.
kc2	Periodo medio	kc promedio al final de la estación de máximo crecimiento hasta que el consumo de agua comienza a declinar
kc2-kc3	Periodo final	Desde que el kc comienza a declinar hasta la cosecha o cuando el consumo de agua llega a ser mínimo.

Fuente: con base en FAO (2021).

Tabla 4.12 Coeficientes de cultivo (*Kc*) recomendados por la FAO, adaptados al uso de suelo.

Uso de suelo	Uso de suelo proporcional	Cobertura en desarrollo	kc1	kc2	kc3
Suelo desnudo	Suelo desnudo	Continuo	0.0	0.0	0.0
Agricultura	Tomate	Continuo	0	1	0.7-0.9
Pastizal	Suelo con cubierta de pasto	Continuo	0.5	0.5	0.5
Bosque de encino	Árboles de coníferas	Continuo	1	1	1
Matorral desértico	Césped	Estación templada	0.8	0.85	0.85
		Estación fría	0.9	0.95	0.95
Mezquital	Cítricos sin cubierta vegetal	20% cobertura del árbol	0.45	0.5	0.55
		50% cobertura del árbol	0.6	0.65	0.65
		70% cobertura del árbol	0.65	0.7	0.7

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2021).

Posterior a ello, se aplica la ecuación 4.11 para estimar la evapotranspiración de cultivo teniendo como resultado las Figuras 4.28, 4.29, 4.30 y 4.31, que representan los grupos de imágenes de cada año.

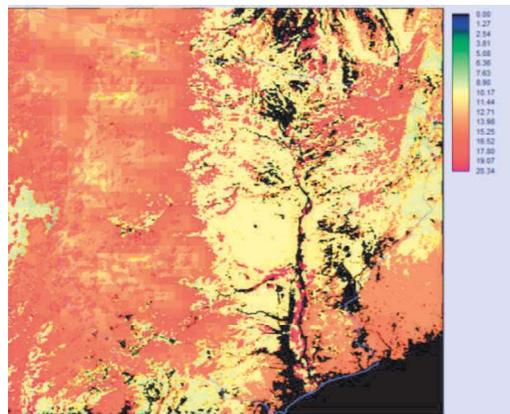


Figura 4.28 Mapa ejemplificativo de evapotranspiración mensual en el ASJC para septiembre del año 1993.

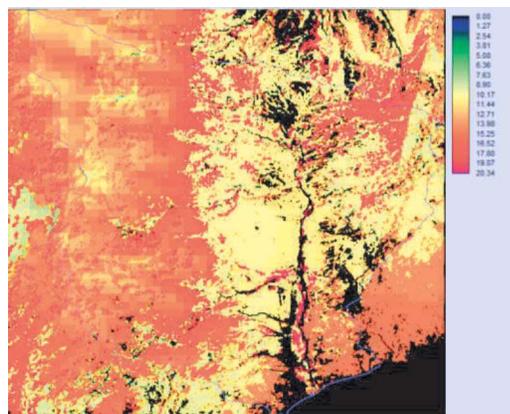


Figura 4.29 Mapa ejemplificativo de evapotranspiración mensual en el ASJC para septiembre del año 1997.

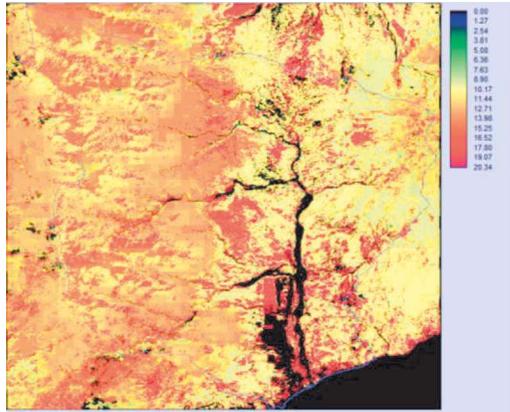


Figura 4.30 Mapa ejemplificativo de evapotranspiración mensual en el ASJC para septiembre del año 2017.

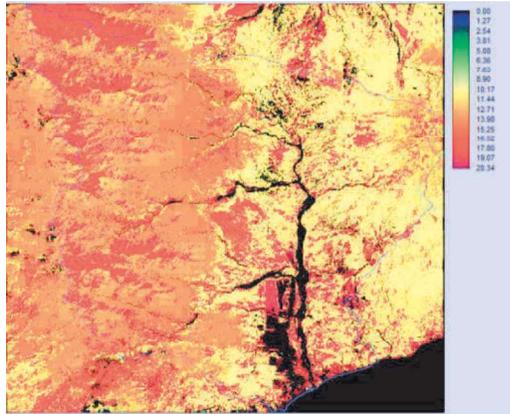


Figura 4.31 Mapa ejemplificativo de evapotranspiración mensual en el ASJC para septiembre del año 2019.

Escorrentía: Para la estimación de la escorrentía superficial se implementó el uso de la ecuación 4.12.

$$Q = P * Ce \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Dónde:

- Q es la altura de la lámina de escurrimiento mensual (mm),
- P es la precipitación mensual (mm), y
- Ce es el coeficiente de escurrimiento promedio (Adimensional).

Para la obtención de los datos correspondientes se consideró la precipitación de la tabla 5.11. En el caso del coeficiente de escurrimiento (Ce) se aplica el procedimiento de Benítez, et al. (1980) el cual dependerá de características específicas del mismo acuífero, como se muestran a continuación:

a) Tipo de textura de suelo

De acuerdo con el **tipo de suelo**, el suelo se clasificó dependiendo de su permeabilidad presentada en un área específica, dada por la mayor o menor capacidad de paso del agua. Para obtener dicho insumo se realizó la cartografía nueva mediante digitalización en el software ArcGis de los mapas previos de litología (Figura 2.5) y edafología (Figura 2.10), dándole la característica de que de acuerdo a Cn (2020) el cauce de ríos tiende a ser más permeable.

Se evaluó tanto la litología como la edafología ya que el presente este trabajo la litología hace referencia a la granulometría y grado de fracturamiento, dándole la particularidad mostrada en el trabajo de balance de CNA (2020), siendo los causes las zonas en donde mayor permeabilidad se tiene, considerándola también la zona de mejor potencial de recarga. Con tal propósito se construyó la Tabla 4.13.

Como base en los valores de permeabilidad asignados en la Tabla 4.13, se consiguió construir la Figura 4.32 el cual permite identificar un total de 16 polígonos integrados dentro del límite del acuífero, a los cuales se asignaron características en función de la permeabilidad que presentan: suelos permeables, suelos medianamente permeables y suelos casi impermeables.

Tabla 4.13 Clasificación textural y grado de permeabilidad en el área del ASJC.

Mapas	Tipo	Permeabilidad	Textura
Litología	Aluvión	Permeable	Gruesa
	Arenisca-Conglomerado	Permeable	Gruesa
	Brecha volcánica	Permeable	Media
	Areniscas	Permeable	Gruesa
	Lutita-Arenisca	Medianamente permeable	Media
	Granito	Medianamente permeable	Media
	Conglomerado	Medianamente permeable	Media
	Gneis	Casi impermeable	Fina
	Complejo metamórfico	Casi impermeable	Fina
	Granodiorita	Casi impermeable	Fina

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.13 Clasificación textural y grado de permeabilidad en el área del ASJC (Continuación).

Mapas	Tipo	Permeabilidad	Textura
Edafología	Arenosol	Permeable	Gruesa
	Fluvisol	Medianamente permeable	Media
	Calcisol	Permeable	Media
	Leptosol	Permeable	Gruesa
	Phaeozem	Permeable - Medianamente permeable	Gruesa-Media
	Regosol	Medianamente permeable	Media
	Solonchak	Medianamente permeable	Media

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.32 Mapa de permeabilidad de los suelos del ASJC (Elaboración propia).

Posteriormente se le asignó un valor a cada tipo textural, quedando de la manera siguiente: para los polígonos permeables se asignó un valor igual a 1, en el caso de los polígonos con

características medianamente permeables se dio un valor de 2, y para las zonas impermeables o casi impermeables se asignó el valor de 3.

Una vez clasificados se ingresó la capa de información en formato shape dentro del programa Qgis en donde a través del módulo “Ráster-Conversion-Rasterizar (Vectorial-Raster)”, se le asignaron valores de resolución de 1000 por 1000, obteniendo la Figura 4.33, misma que servirá de insumo dentro del programa TerrSet.

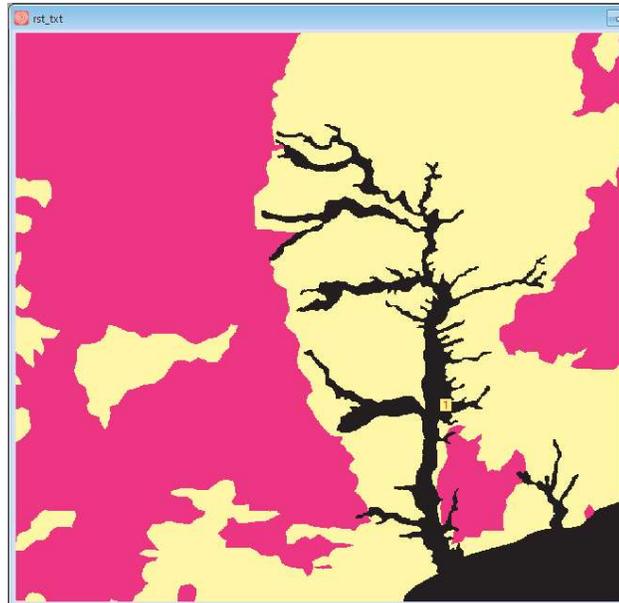


Figura 4.33 Mapa de texturas del ASJC en formato raster (Elaboración propia).

b) Cobertura del suelo

La caracterización de la cobertura del suelo se llevó a cabo bajo las consideraciones en la obtención de variables de los cuatro años identificados para la estimación de recarga (1993, 1997, 2017 y 2019), también se contempla el caso del uso de suelo, mismo que involucra dos imágenes reclasificadas, representativas de dos años. Por su parte el año 1995 corresponde a 1993 y 1997, y el año 2018 representa a 2017 y 2019.

Se considera como insumo principal a las imágenes resultantes de clasificación de uso de suelo y vegetación (Figuras 4.16 y 4.17) con la diferencia de que se ordenaran a modo de cumplir con la clasificación de Benítez et al. (1980). Por lo cual los resultados fueron los representados por las Figuras 4.34 y 4.35, conforme a la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Reclasificación de uso de suelo y vegetación según Benítez et al. (1980).

Cobertura según Benítez, et al. (1980)	Reclasificación de uso de suelo y vegetación
Sin vegetación	Suelo desnudo
	Asentamiento humano
Cultivos	Agricultura
Pastos y vegetación ligera	Pastizal
Hierba	Matorral desértico
	Mezquital
Bosque y vegetación densa	Bosque de encino

Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al. (1980).

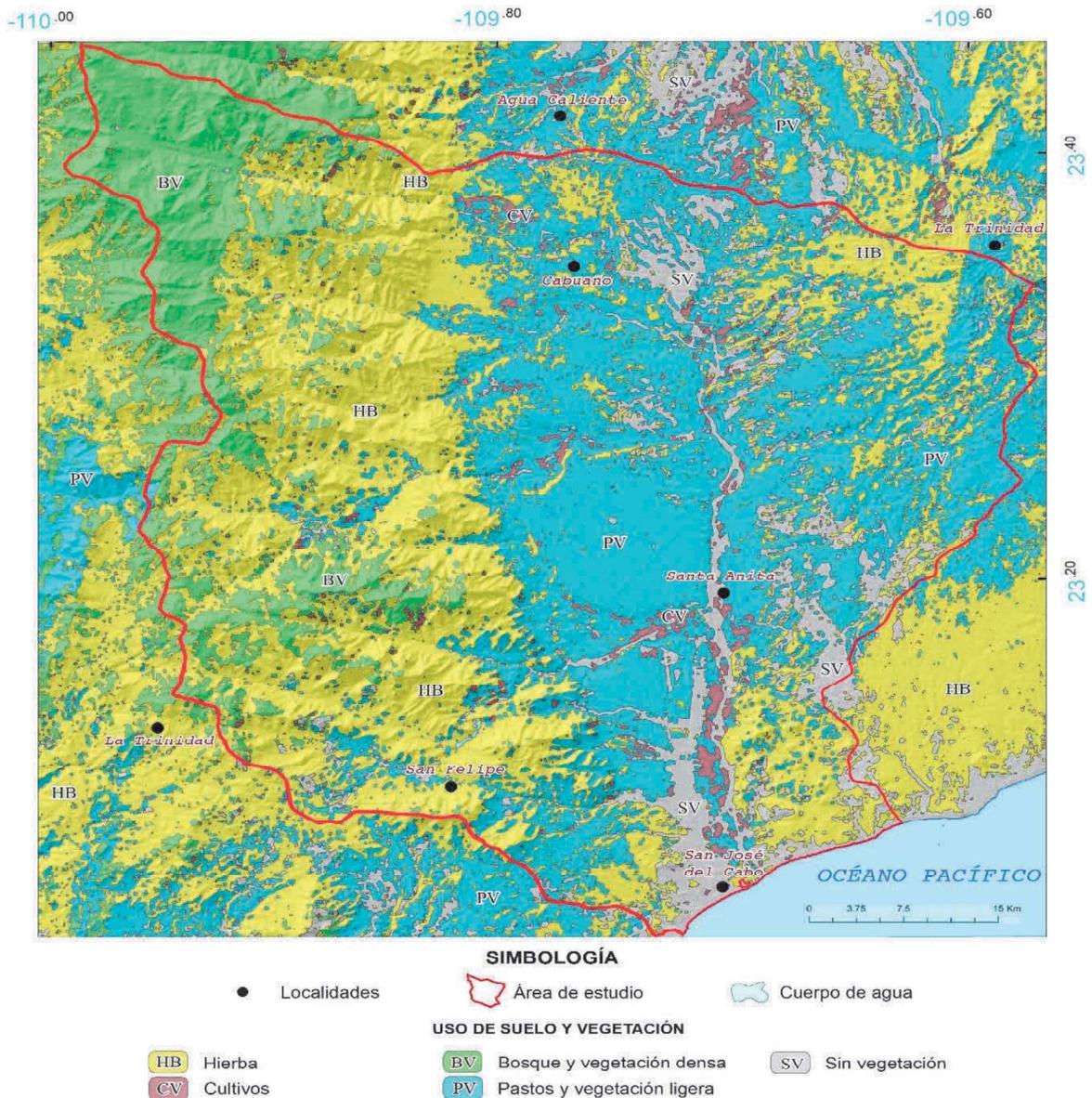


Figura 4.34 Reclasificación de uso de suelo y vegetación para determinación de *Ce* de 1995 (Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al., 1980).

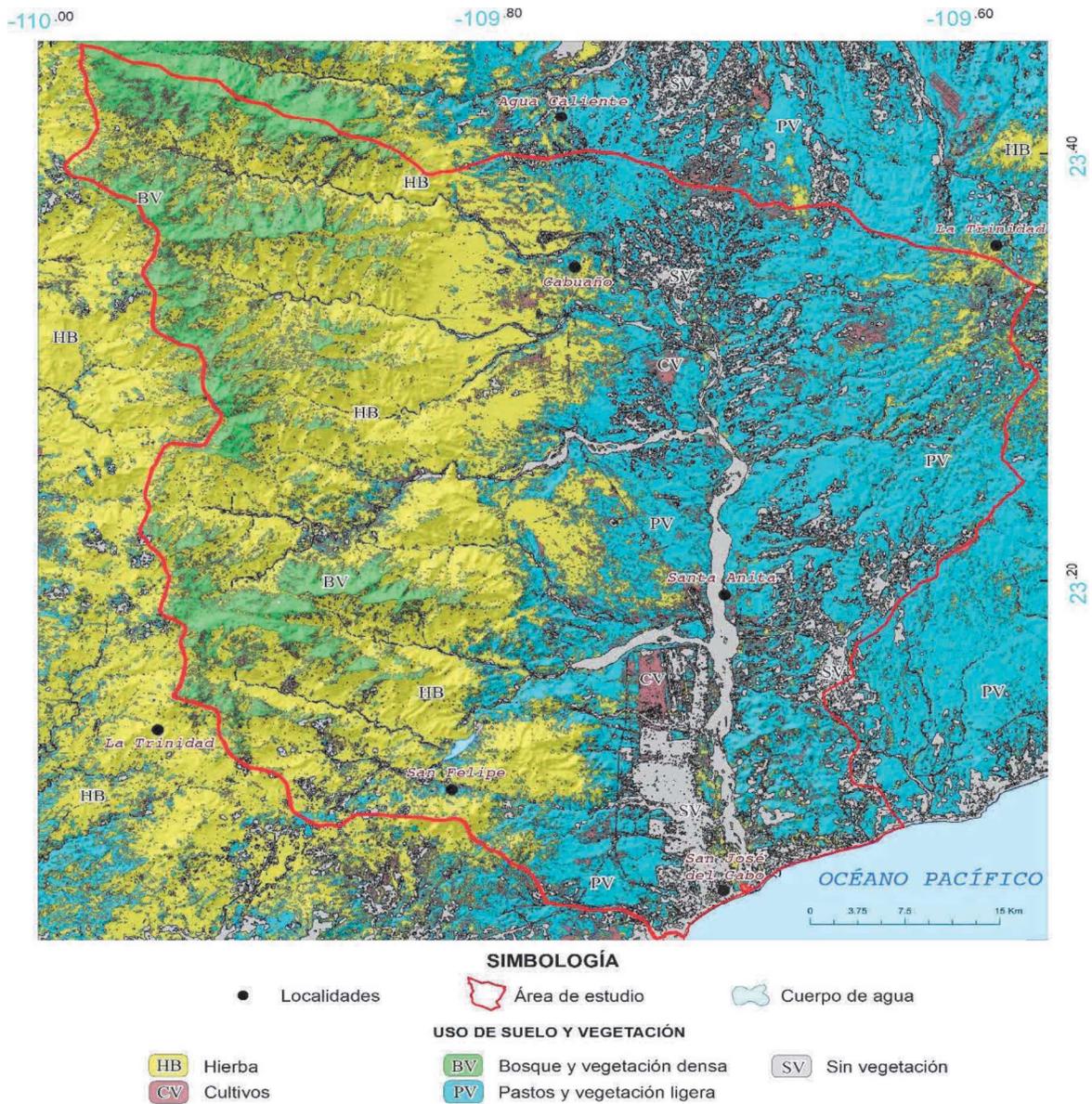


Figura 4.35 Reclasificación de uso de suelo y vegetación para determinación de Ce de 2018 (Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al., 1980).

Una vez obtenidas las imágenes de uso de suelo se realiza el proceso para rasterizar las imágenes, del mismo modo que para la imagen de texturas, que permitió obtener la Figura 4.36 y 4.37.

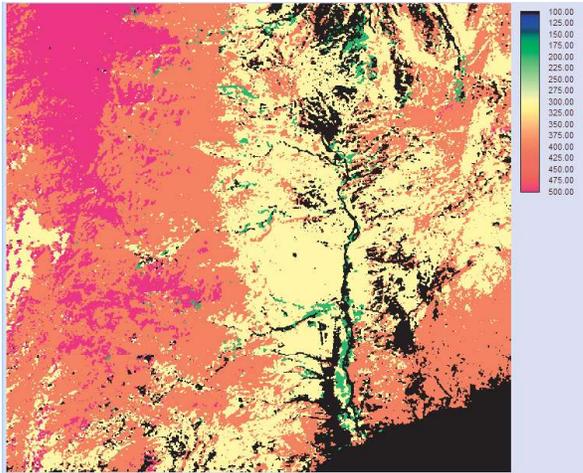


Figura 4.36 Reclasificación de uso de suelo y vegetación para determinación de Ce de 1995 en formato raster (Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al., 1980).

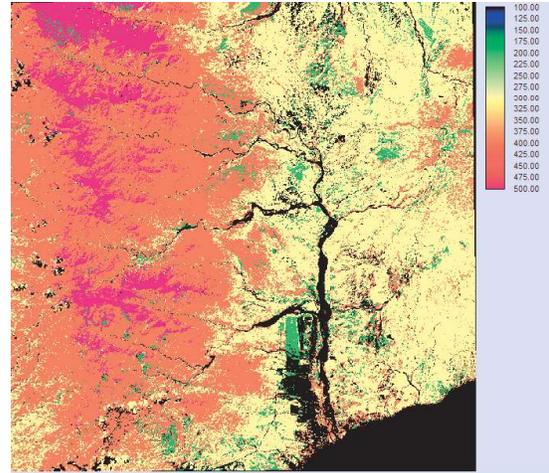


Figura 4.37 Reclasificación de uso de suelo y vegetación para determinación de Ce de 2018 en formato raster (Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al., 1980).

c) Pendiente

El mapa de pendiente ocupado como insumo para el cálculo del coeficiente de escurrimiento es el obtenido del modelo digital de elevación representativo del área de estudio. A partir del modelo digital de elevación (Figura 4.4), introducido en el software Terrset en la herramienta “Slope”, se obtuvo la capa que expresara en valores de porcentaje a la pendiente.

La Figura 4.38 fue el resultado del procesamiento de la Figura 4.4 se calculó en unidades de porcentaje, mismo que posteriormente se reclasifico asignando valores de 1 a 5 como se muestra en la Tabla 4.15 la cual se consideró en función del porcentaje de pendiente.

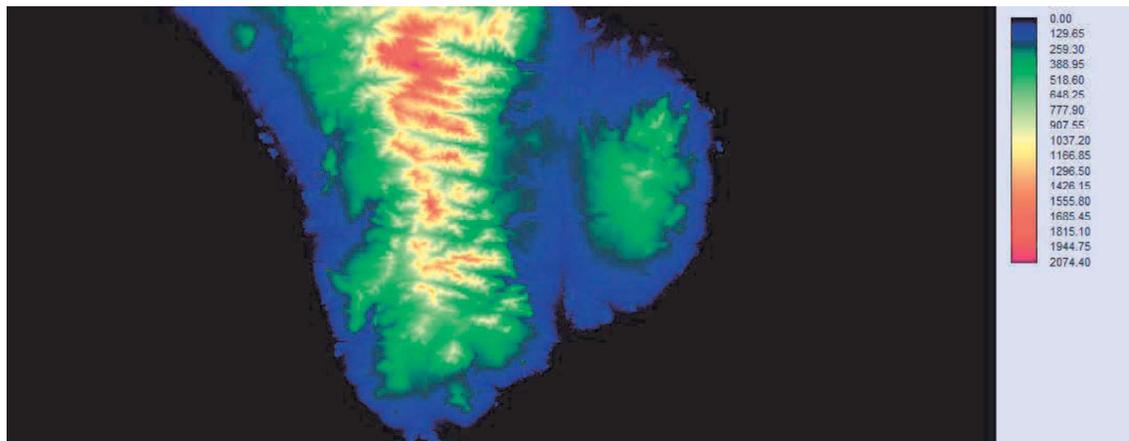


Figura 4.38 Modelo Digital de Elevación (Elaboración propia en base con Google Earth).

La tabla 4.16 muestra la manera en la cual se realizó la reclasificación, que aplicándolo dentro de la herramienta “Reclass” se obtuvo como resultado la Figura 4.39.

Tabla 4.15 Clasificaciones de pendientes dependiendo el porcentaje de inclinación.

Pendiente	Inclinación (%)	Valor
Despreciable	0-1	5
Suave	1-5	4
Media	5-20	3
Alta	20-50	2
Pronunciada	>50	1

Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al. (1980).

Tabla 4.16 Clasificaciones de pendientes dependiendo el porcentaje de inclinación.

Asumiendo un nuevo valor de	A todos los valores de	A poco menos que
1	50	99999
2	20	50
3	5	20
4	1	5
5	0	1

Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al. (1980).

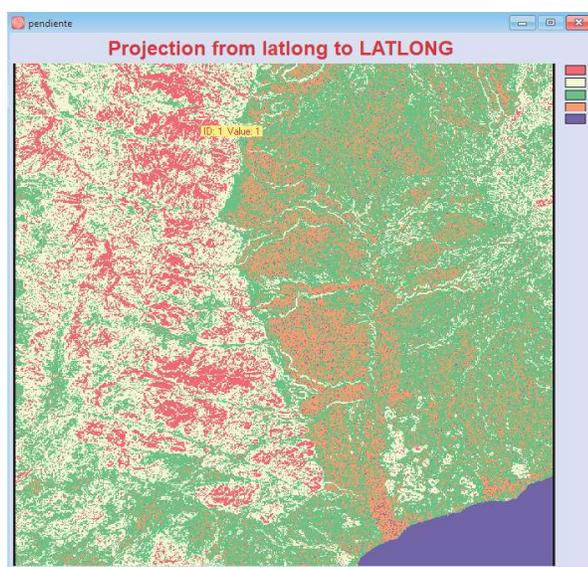


Figura 4.39 Mapa de pendientes del ASJC (Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al., 1980).

En TerrSet se ingresaron las tres distintas capas de información (Uso de suelo reclasificado, tipo de suelo y pendiente) en forma de suma por medio de la herramienta “Image Calculator”, como se muestra en la Figura 4.40, ya que, cada propiedad de cada mapa está referida a un valor representativo como se muestra en los valores numéricos de color rojo de la Tabla 4.17.

Una vez obtenidos los insumos, se usaron los valores en color rojo de la Tabla 4.17 para obtener un valor de coeficiente de escurrimiento (C_e). Finalmente, se obtuvieron las imágenes resultantes de C_e para el año 1995 y 2018 (Figura 4.41 y 4.42).

Dentro de la herramienta “Assing” se introdujo la imagen con el nombre de salida, y también se direccionó la tabla en formato Txt que contiene los valores de la Tabla 4.18, mismos que serán sustituidos con los valores reales.

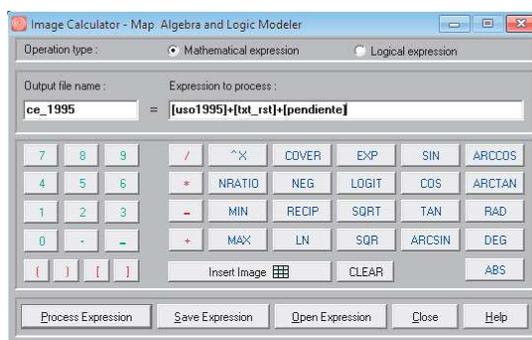


Figura 4.40 Herramienta Image Calculator (TerrSet) con ecuación de imágenes para obtención de coeficiente de escurrimiento.

Tabla 4.17 Valores de coeficiente de escurrimiento.

Cobertura	Tipo de suelo	Pendiente (%)				
		>50 1	20-50 2	5-20 3	1-5 4	0-1 5
Sin vegetación 100	Impermeable o casi impermeable 10	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Medianamente permeable 20	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable 30	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos 200	Impermeable o casi impermeable 10	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Medianamente permeable 20	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable 30	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos y vegetación ligera 300	Impermeable o casi impermeable 10	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Medianamente permeable 20	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable 30	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba 400	Impermeable o casi impermeable 10	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Medianamente permeable 20	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable 30	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosque y vegetación densa 500	Impermeable o casi impermeable 10	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Medianamente permeable 20	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable 30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al. (1980).

Tabla 4.18 Valores representativos de coeficiente de escurrimiento (C_e) con valor real.

Valor repr.	C_e								
111	0.8	211	0.7	311	0.65	411	0.6	511	0.55
112	0.75	212	0.65	312	0.6	412	0.55	512	0.5
113	0.7	213	0.6	313	0.55	413	0.5	513	0.45
114	0.65	214	0.55	314	0.5	414	0.45	514	0.4
115	0.6	215	0.5	315	0.45	415	0.4	515	0.35
121	0.7	221	0.6	321	0.55	421	0.5	521	0.45
122	0.65	222	0.55	322	0.5	422	0.45	522	0.4
123	0.6	223	0.5	323	0.45	423	0.4	523	0.35
124	0.55	224	0.45	324	0.4	424	0.35	524	0.3
125	0.5	225	0.4	325	0.35	425	0.3	525	0.25
131	0.5	231	0.4	331	0.35	431	0.3	531	0.25
132	0.45	232	0.35	332	0.3	432	0.25	532	0.2
133	0.4	233	0.3	333	0.25	433	0.2	533	0.15
134	0.35	234	0.25	334	0.2	434	0.15	534	0.1
135	0.3	235	0.2	335	0.15	435	0.01	535	0.05

Fuente: Elaboración propia con base en Benítez, et al. (1980).

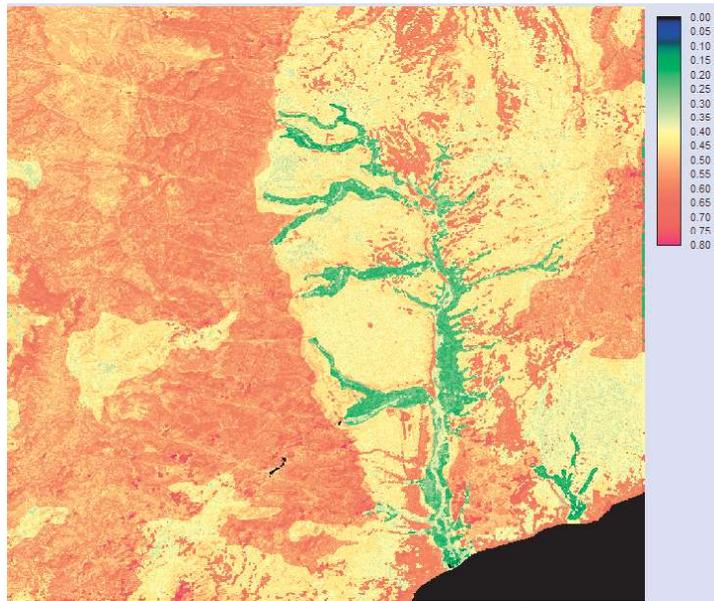


Figura 4.41
Coeficiente de escurrimiento de 1995.

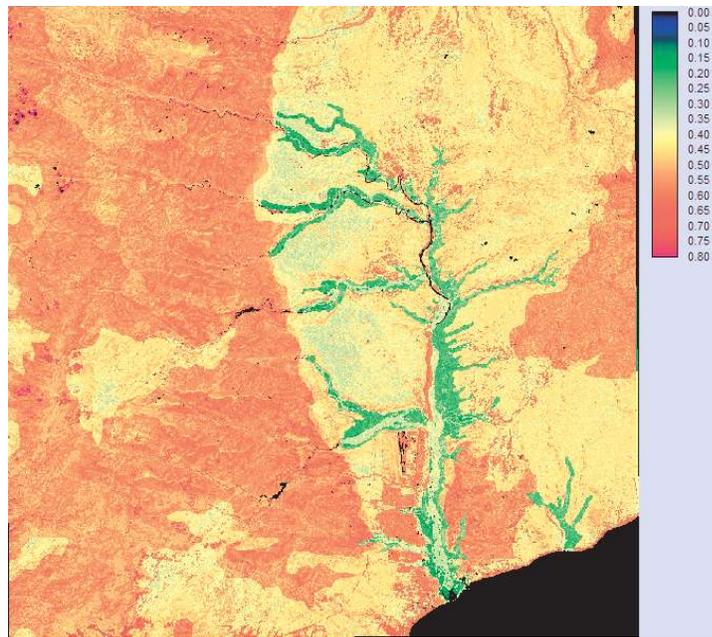


Figura 4.42
Coeficiente de escurrimiento de 2018.

Una vez obtenido el C_e , se usó la herramienta “Image Calculator”, en donde se multiplicará la imagen de C_e de 1995 con cada imagen de precipitación mensual de los años 1993 y 1997. De la misma forma se realizó para el C_e del año 2018 con los valores de precipitación mensual de 2017 y 2019. Dicho proceso dio como resultado 48 imágenes como se muestra en las Figuras 4.43, 4.44, 4.45 y 4.46, como ejemplo.

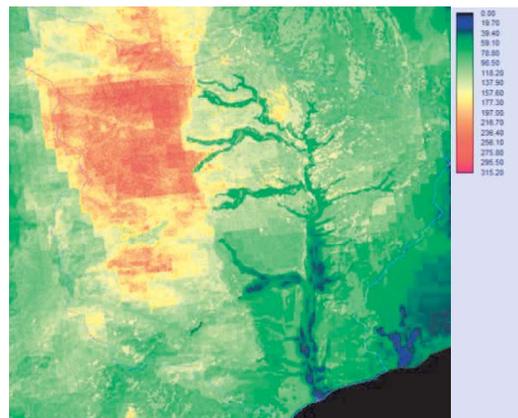


Figura 4.43 *Mapa ejemplificativo de escurrimiento mensual en el ASJC para septiembre del año de 1993.*

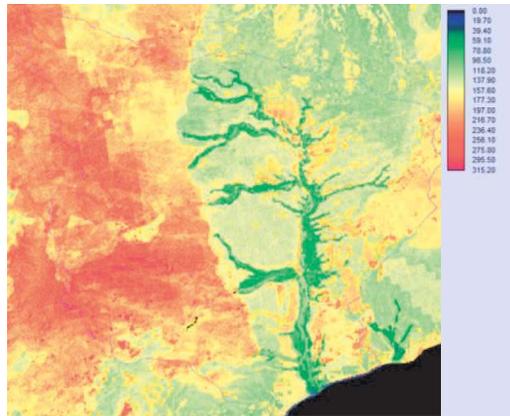


Figura 4.44 Mapa ejemplificativo de escurrimiento mensual en el ASJC para septiembre del año de 1997.

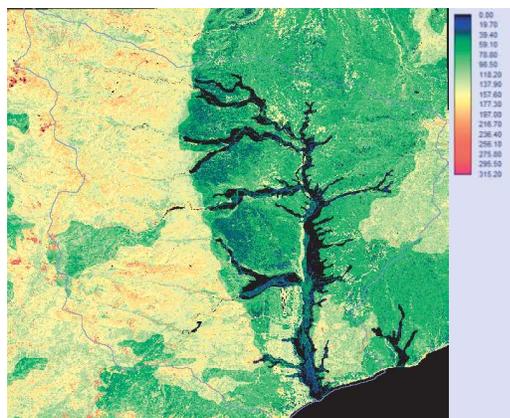


Figura 4.45 Mapa ejemplificativo de escurrimiento mensual en el ASJC para septiembre del año de 2017.

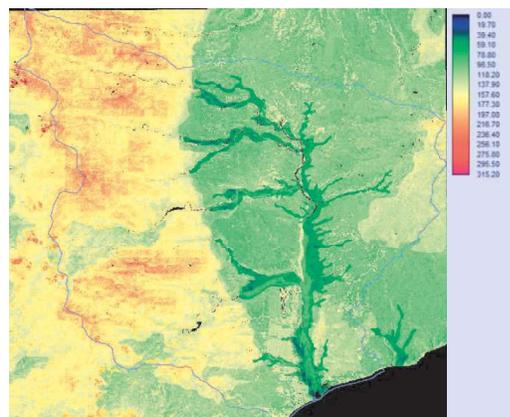


Figura 4.46 Mapa ejemplificativo de escurrimiento mensual en el ASJC para septiembre del año de 2019.

Cambio de almacenamiento en la zona del suelo:

Este se determina mediante un procedimiento de contabilidad basado en la capacidad del campo, la capacidad del punto de marchitez y la cantidad inicial de agua en almacenamiento (Ecuación 4.13).

$$\Delta S = \Delta S^{SW} + \Delta S^{UZ} + \Delta S^{GW} \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Dónde:

- ΔS^{SW} es el cambio de almacenamiento de agua superficial (mm),
- ΔS^{UZ} es el cambio de almacenamiento de agua de la zona no saturada (adimensional).
- ΔS^{GW} es el cambio de almacenamiento de agua de la zona saturada (adimensional).

Para el caso de esta variable, dado que la estimación de recarga se realiza a nivel mensual, el almacenamiento fue estimado bajo hipótesis de que no habrá cambios de inicio de mes al fin de mes, respondiendo a valores de 0 para cada mes.

4.4.2. Estimación de recarga potencial

Una vez obtenidos los insumos requeridos para la aplicación de la ecuación 4.10, se usó el programa TerrSet desde la herramienta “Image Calculator” ingresando las imágenes de precipitación, evapotranspiración del cultivo y escurrimiento a nivel mensual, exceptuando el cambio de almacenamiento, como se muestra en la Figura 4.47.

Bajo este proceso se generaron los 48 meses representativos del área, mismos que representan la generación de recarga y en los que no se genera. Los resultados de este proceso se muestran en el siguiente apartado (capítulo 5, subcapítulo 5.4), obtenidos como resultado y punto central del trabajo de investigación respecto al análisis de recarga potencial en el Acuífero San José del Cabo y respecto a la relación que pudiera existir con la variabilidad climática.

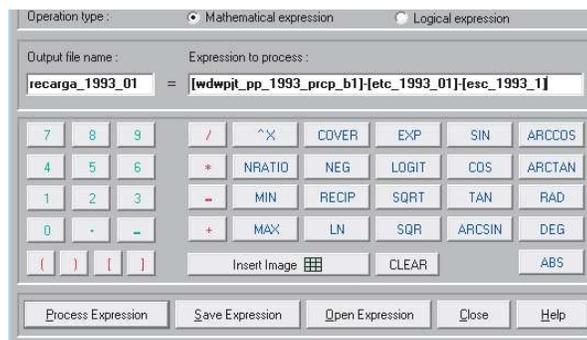


Figura 4.47 Herramienta Image Calculator (Terrset) con ecuación de imágenes para obtención de recarga mensual del ASJC.

También se consideró dividir el acuífero en dos zonas, la zona montañosa y la zona de valle haciendo posible que sea más sencillo identificar en que sitio se genera una mayor precipitación, evapotranspiración, escurrimiento y recarga. Por ello se muestra la Figura 4.48

en donde se identifica la forma en cual se dividió el acuífero, partiendo como base de la división de zonas contemplando la topografía. El área del valle es la que presenta altitudes de entre los 0 a 320 msnm, y la zona de montaña de 320 a 1900 msnm. Se obtuvo una superficie de 642.96 km² para la zona montañosa, mientras que para la zona del valle fue de 641.04 km².

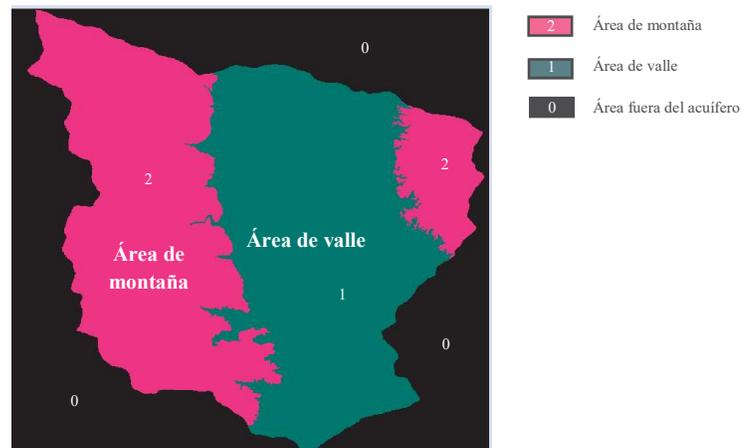


Figura 4.48 División de áreas geográficas para explicar la variabilidad espacial de la recarga para los años de 1993, 1997, 2017 y 2019.

CAPÍTULO 5

Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de los diferentes apartados mostrados en el capítulo anterior, haciendo énfasis en los resultados de la estimación de recarga para el Acuífero de San José del Cabo en Baja California Sur.

5.1. Selección del método de estimación de recarga

a) *Modelo conceptual*

El modelo conceptual describió las características del acuífero como se muestra en la Figura 5.1, las cuales están relacionadas con el proceso de recarga del acuífero.

Inicialmente se establece un breve contexto del modelo conceptual hidrogeológico, relacionando elementos que determinan el funcionamiento de este de acuerdo a sus características.

El acuífero es del tipo libre y está constituido, en su unidad superior, por sedimentos aluviales y fluviales depositados en los arroyos, así como conglomerados y areniscas. La unidad inferior está conformada por las rocas ígneas y metamórficas que presentan fracturamiento y alteración. En conjunto los materiales presentan buena permeabilidad (CNA, 2020).

La recarga que recibe el acuífero procede de la infiltración directa de la lluvia, así como por la infiltración de agua superficial que escurre a través de los arroyos, aunque el valor de la precipitación pluvial media anual no es muy alto, la presencia de eventos ciclónicos como huracanes, tormentas y depresiones tropicales, así como las lluvias de temporada, tienen un efecto muy importante sobre la recarga subterránea del acuífero, siendo evidente en muchos casos la rápida recuperación de los niveles del agua subterránea (CNA, 2020).

Con base en la piezometría para el año 2011, CNA (2020) señala el efecto de la topografía, con los valores más bajos hacia la planicie costera y los valores más altos en la posición oeste del acuífero, y de forma que la dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur hasta descargar en el Océano Pacífico.

En este mismo informe se señala como entradas al acuífero a la recarga natural por infiltración de la lluvia que se precipita en los sedimentos arenosos y conglomeráticos, a lo largo de los escurrimientos superficiales y la que proviene de zonas montañosas a través de la recarga por flujo horizontal subterráneo. Otras entradas son el retorno de riego y fugas del sistema de agua residual y de la red de abastecimiento de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Las descargas corresponden a las hacia el mar, a través de manantiales, por evapotranspiración directas en las de niveles piezométricos someros y por bombeo.

Hay que señalar que esta información proporcionada por CONAGUA (2020) corresponde al análisis hecho a partir de los datos recopilados en 2011 y 2012, año que fueron especialmente secos con precipitaciones en torno a los 100 mm. Es de suponer que, si este mismo estudio se hubiera hecho en años más húmedos o bien en años con eventos ciclónicos, la dinámica del acuífero sería muy diferente y los volúmenes que integran el balance también.

Conociendo el comportamiento del acuífero se identificó que sus características hacen posible una fácil interpretación del proceso de recarga que está dada por la ubicación geográfica, ya que, se encuentra en la zona costera, además de que el medio se rige por las características climáticas de la región.

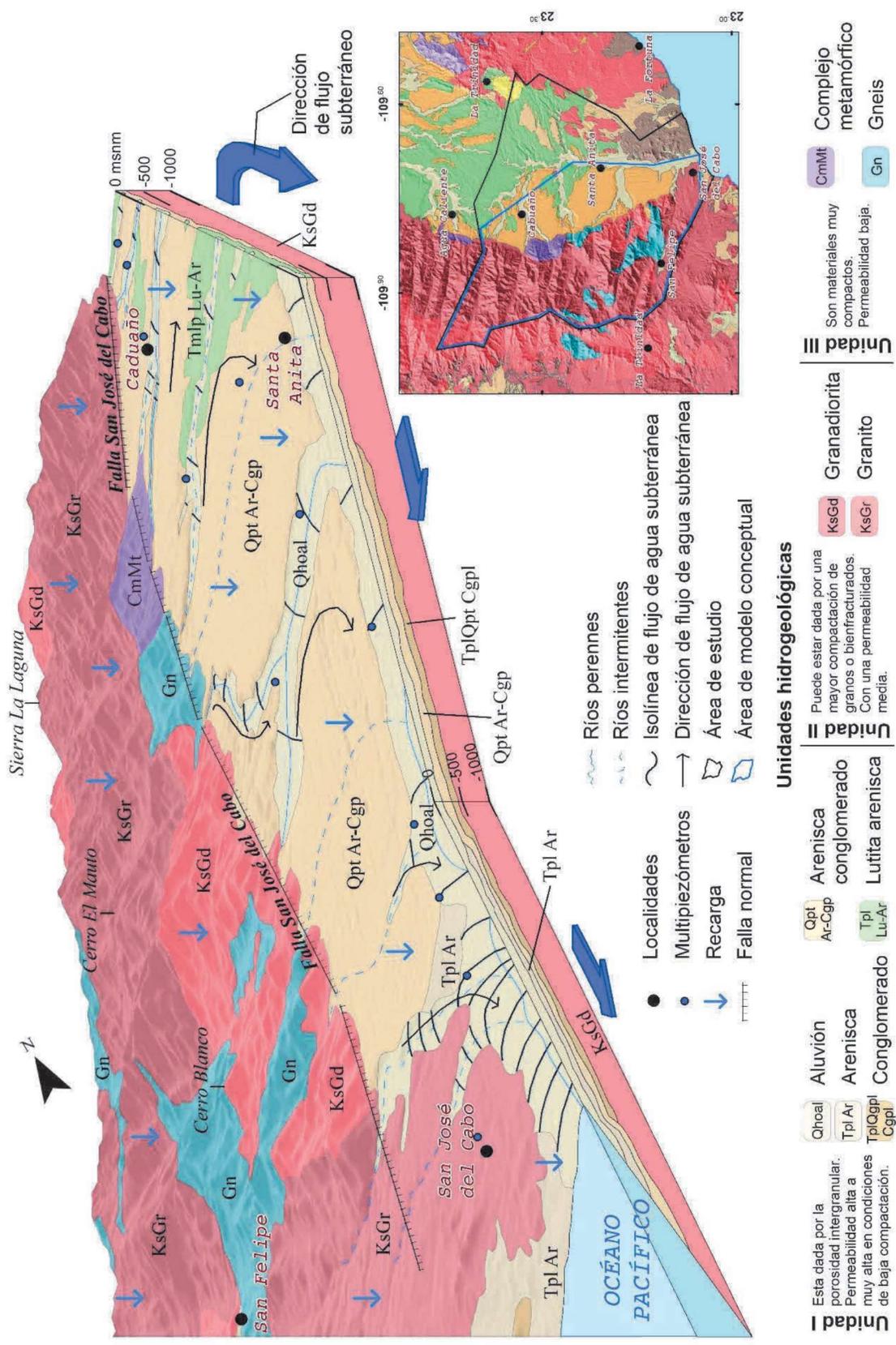


Figura 5.1 Modelo conceptual hidrogeológico del ASJC. (Elaboración propia con base en INEGI, 2014; SGN, 2008).

b) Identificación del método

La selección del método de estimación de recarga para aplicar en el Acuífero San José del Cabo, se basó en la discriminación escalonada de métodos o grupos de métodos, llegando a la conclusión de implementar únicamente el método de estimación de recarga por balance de humedad del suelo (Recarga potencial).

La resolución en la selección del método se basó en una serie de criterios específicos a considerar, debido a ello se plantearon como puntos de importancia los siguientes:

- Las características del proceso de recarga de agua de lluvia en el ASJC, conocidas con ayuda del modelo conceptual hidrogeológico.
- La espacialidad y temporalidad del estudio, delimitado por un total de 30 años.
- El análisis espacial y temporal de la variabilidad climática.
- La determinación de cambio de uso de suelo y vegetación dentro del área de estudio.
- Los métodos ya conocidos para aplicar en la estimación de recarga.
- Los insumos accesibles para la aplicación del método de estimación de recarga.

Existían varios métodos de estimación de recarga que resultaban ser apropiados para su aplicación en el acuífero, aunque se descartaron al considerar otros criterios en relación con la investigación.

- Tiempo de realización de la investigación limitado al plan de estudio.
- Los métodos descartados resultaban más complejos lo que requeriría de mayor tiempo de investigación.
- Otra desventaja era la obtención de insumos, los cuales resultaban más difícil de obtener.

Con base en todo ello, el método seleccionado fue el del balance de humedad del suelo.

5.2. Variabilidad climática

El estudio de la variabilidad climática permitió entender el comportamiento de las diferentes condiciones que rigen la región (precipitación y temperatura), haciendo más sencillo establecer patrones de comportamiento útiles respecto al entendimiento de la recarga.

Variabilidad de la precipitación

La Figura 5.2, muestra el comportamiento de la precipitación durante los 30 años en el área delimitada por el polígono del ASJC. Las precipitaciones anuales oscilan entre los 77.68 mm (2011) y 731.03 mm (1993).

El análisis de precipitación para el periodo de 1990-2019 mostró una marcada variabilidad, ya que presentó dos comportamientos, una primera línea de tendencia que discurre entre 1990 y 2006 en donde el comportamiento es descendente y constante, con precipitaciones que varían de los 143.1 mm a los 731.03 mm. En el caso de la segunda línea de tendencia trazada, desde el año 2007 al 2019, se muestra un comportamiento descendente mayormente, con precipitaciones que no superan los 507.24 mm y mínimas de 77.68 mm.

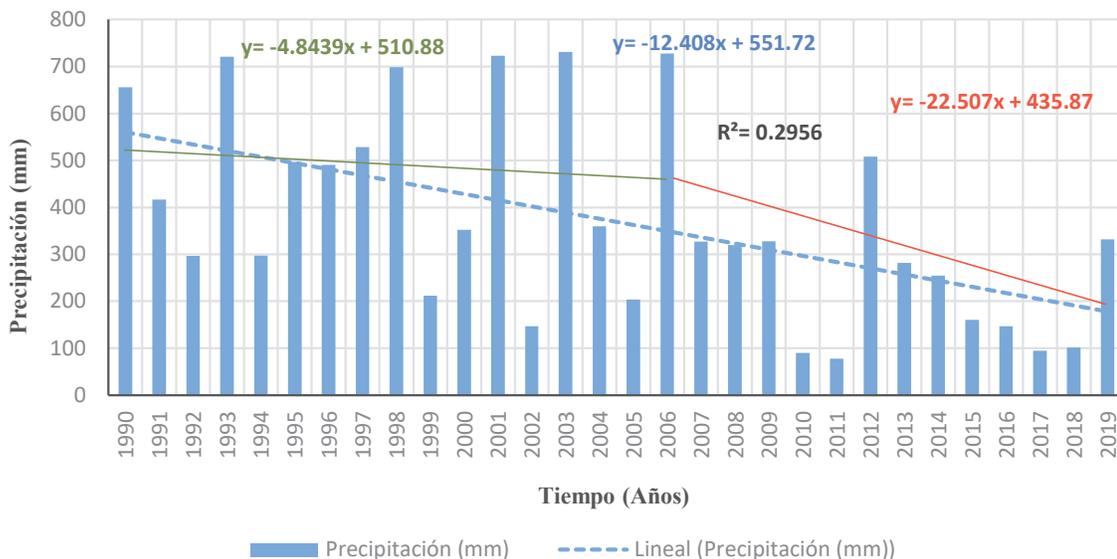


Figura 5.2 Comportamiento de la precipitación anual en el ASJC para el periodo de 1990-2019 (Elaboración propia con base en Daymet).

La tendencia de la precipitación media anual indica una variabilidad descendente significativa (pendiente de la recta = -12.40). También se determinó el valor de R^2 dentro de los valores del gráfico indicando a este como $R^2 = 0.2956$ indicando poca variabilidad en los datos de precipitación.

Para los resultados también se implementó el resultado obtenido de la aplicación del test Mann-Kendall (Tabla 5.1), señalando que se presenta una tendencia significativa decreciente, de acuerdo a las tablas 4.6 y 4.8.

Variabilidad de la temperatura máxima

La temperatura presenta datos máximos anuales, de 30.17°C en el año de 2014, y de 35.66°C en el año 2008, evidenciando un comportamiento regular, a excepción de los años 2014 y 2015 mostrando una baja significativa en las temperaturas (Figura 5.3).

Durante los primeros 23 años el comportamiento es ascendente y conserva temperaturas entre 29.91°C y 31.48°C. Para año 2013 la temperatura desciende hasta los 21.56 °C y elevándose abruptamente para el año 2014 con 35.66 volviendo a una tendencia normal ascendente para los años restantes.

Es a partir del año 2015 y hasta el 2019 en donde la temperatura responde a un comportamiento más lineal integrando temperaturas que varían entre una mínima de 30.3°C a 30.95°C como máxima.

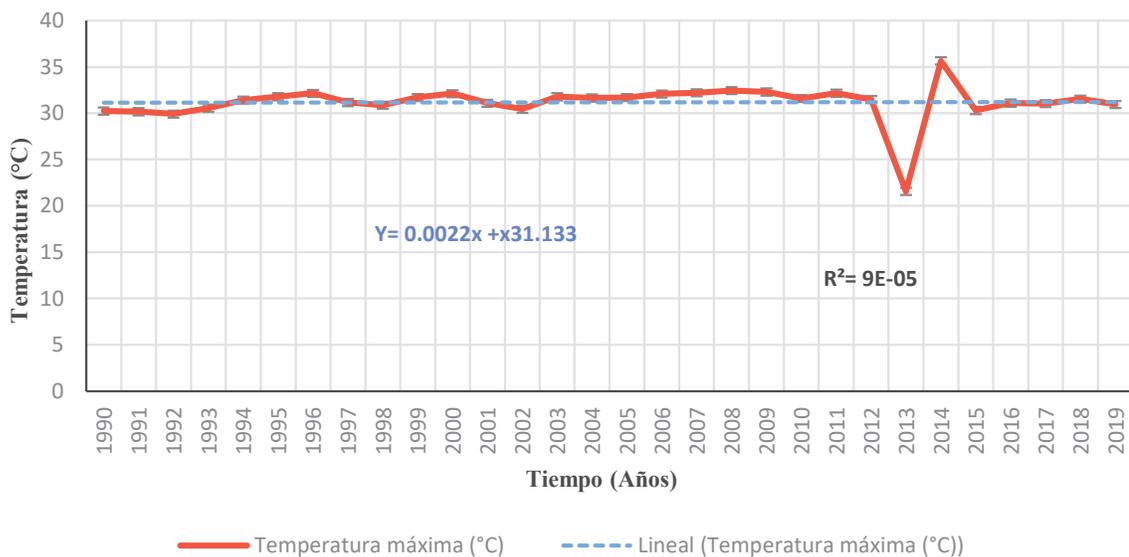


Figura 5.3 Comportamiento de la temperatura máxima anual en el ASJC para el periodo de 1990-2019 (Elaboración propia con base en Daymet).

El test Mann-Kendall (Tabla 5.1) para la temperatura máxima indica una tendencia no significativa creciente, obteniendo una media en la temperatura máxima de 31.16°C y desviación estándar de 2.093°C. Para el valor obtenido de $R^2 = 0.00009$, demostrando que no existe una gran variabilidad en el comportamiento.

Variabilidad de la temperatura mínima

La Figura 5.4 representa el comportamiento de los registros de los 30 años para temperatura mínima, en la cual los extremos de temperatura son 13.19°C (1996) y 17.94°C (2014).

El comportamiento de la temperatura mínima muestra una marcada variabilidad presentando dos comportamientos en la línea temporal, el primer tramo del año 1990 al 2012 donde el comportamiento es ascendente constante, con temperaturas que oscilan entre los 13.19°C en el año 1996 a los 15.09°C en el 2003. Para el segundo tramo, las temperaturas suben entre el año 2012-2013 y hasta 2019, con temperaturas que varían de 14.53°C en 2017 a los 17.94°C en el año 2014.

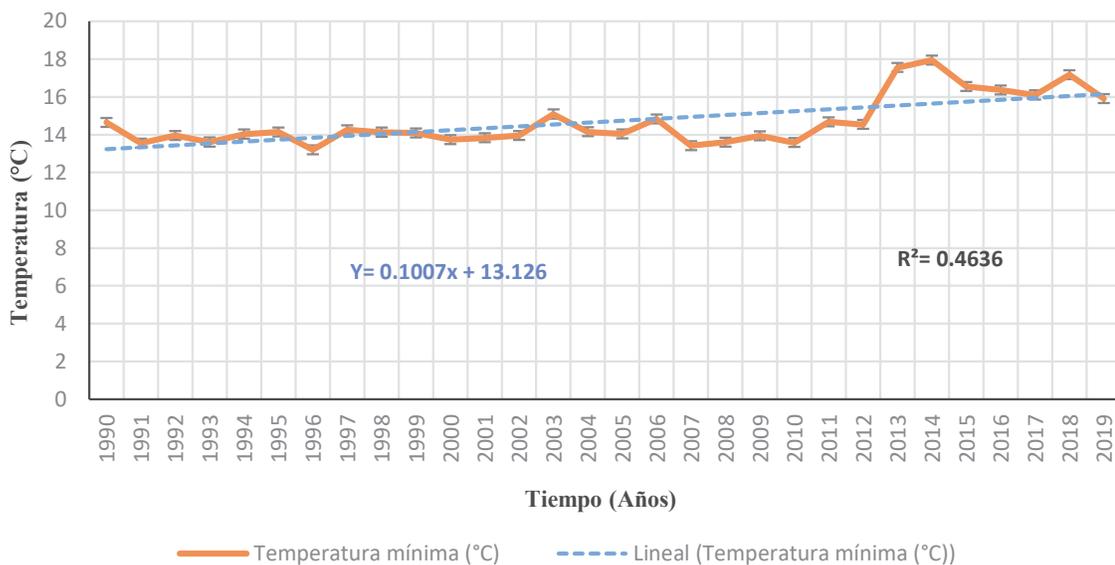


Figura 5.4 Comportamiento de la temperatura mínima anual en el ASJC para el periodo de 1990-2019 (Elaboración propia con base en Daymet).

Los resultados obtenidos para el test Mann-Kendall (Tabla 5.1) presentan una tendencia significativa creciente, en donde la media para temperatura mínima fue de 14.68°C y desviación estándar de 1.33°C. en el caso de la variabilidad de temperatura mínima $R^2 = 0.4636$, indicando mayor variabilidad que el caso de la temperatura máxima.

Tabla 5.1 Resultados de la aplicación del test Mann-Kendall.

Test			
Variantes	Mann-Kendall		
	Precipitación	Temp. Máx.	Temp. Mín.
Desviación estándar	56.051	56.051	56.051
Estadística Z	-2.962	0.107	2.855
Resultado	Los datos muestran una tendencia estadísticamente significativa ($\alpha < 0.01$).	Los datos no muestran una tendencia estadísticamente significativa ($\alpha = 0.10$)	Los datos no muestran una tendencia estadísticamente significativa ($\alpha < 0.01$)
Tendencia	Decreciente	Creciente	Creciente

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, como se planteó en el capítulo anterior se realizó el procesamiento de los datos para determinar la existencia de anomalías en la línea del tiempo respecto a los valores de cada carácter. Se identificaron los valores medios respectivos de los 30 años para cada variable, así como los valores que anuales que tuvieron disminución o bien aumento (Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Resultados de la revisión de anomalías.

Año	Anomalías		
	Precipitación (Valor medio igual a 369.38)	Temp. Máx. (Valor medio igual a 31.16)	Temp. Mín. (Valor medio igual a 14.68)
1990	287.88	-0.92	-0.03
1991	50.79	-1.00	-1.16
1992	-72.88	-1.25	-0.73
1993	357.13	-0.63	-1.07
1994	-73.41	0.24	-0.65
1995	126.64	0.61	-0.54
1996	118.87	0.97	-1.48
1997	156.21	0.03	-0.44
1998	328.86	-0.29	-0.57
1999	-158.35	0.52	-0.64
2000	-17.34	0.95	-0.96
2001	352.49	-0.07	-0.84
2002	-223.63	-0.70	-0.73
2003	359.53	0.60	0.39
2004	-10.76	0.46	-0.53
2005	-166.80	0.50	-0.64
2006	360.89	0.90	0.12

Fuente: elaboración propia (Con base en Daymet).

Tabla 5.2 Resultados de la revisión de anomalías (Continuación).

Año	Anomalías		
	Precipitación (Valor medio igual a 369.38)	Temp. Máx. (Valor medio igual a 31.16)	Temp. Mín. (Valor medio igual a 14.68)
2007	-42.45	1.02	-1.25
2008	-51.10	1.26	-1.07
2009	-42.97	1.09	-0.73
2010	-279.33	0.39	-1.09
2011	-289.86	0.97	0.00
2012	139.07	0.30	-0.15
2013	-87.39	-9.56	2.85
2014	-115.02	4.51	3.26
2015	-207.97	-0.87	1.87
2016	-221.51	-0.05	1.68
2017	-274.25	-0.13	1.42
2018	-266.55	0.37	2.48
2019	-36.73	-0.21	1.22

Fuente: elaboración propia (Con base en Daymet).

También se elaboraron las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 evidenciando el comportamiento de los datos numéricos de la tabla 5.2.

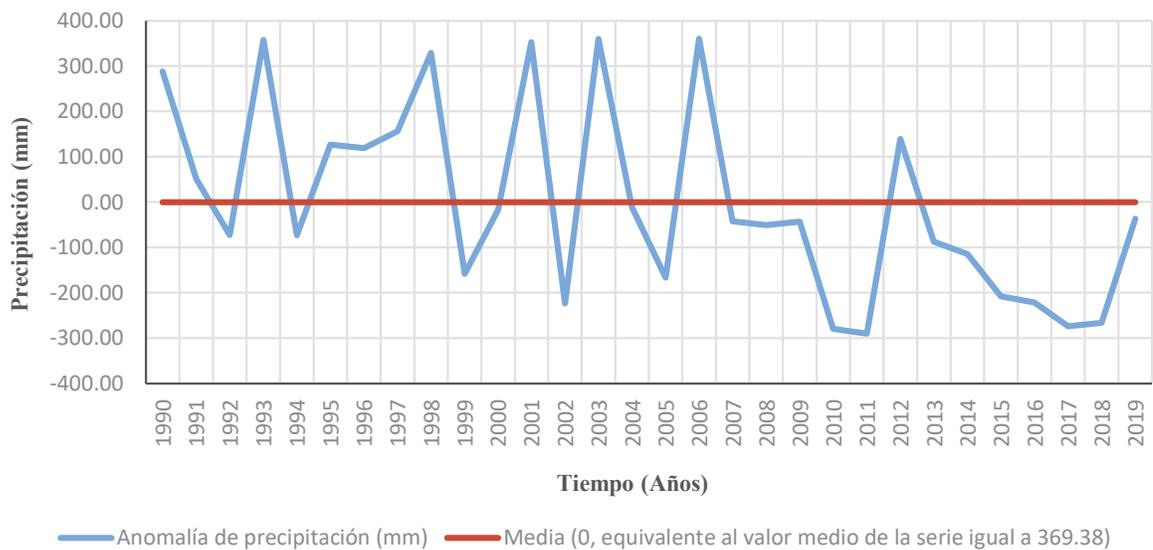


Figura 5.5 Gráfica de representación de anomalías de precipitación anual de 1990 a 2019 en el ASJC (Elaboración propia con base en Daymet).

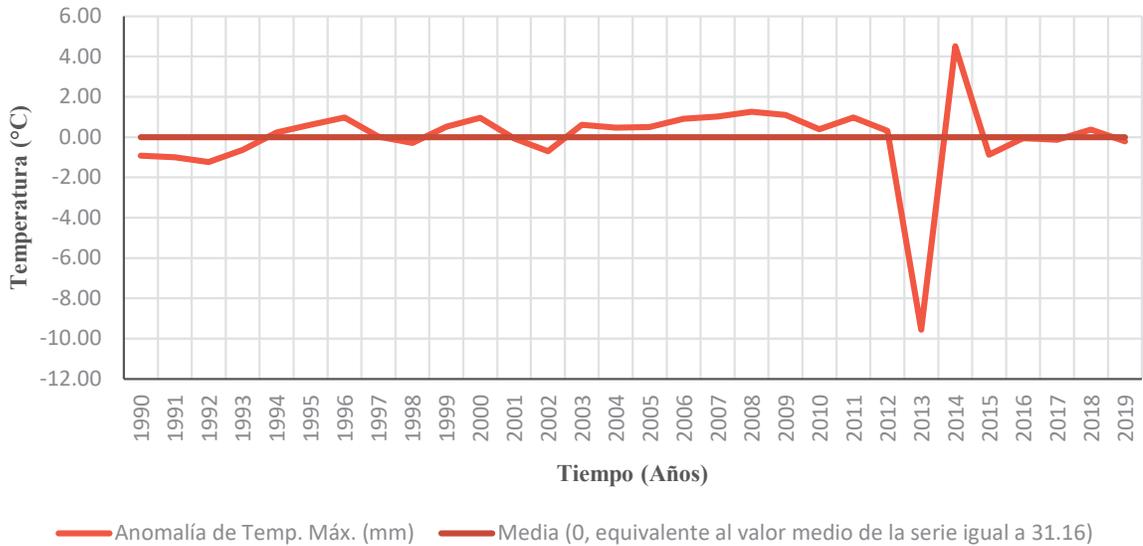


Figura 5.6 Grafica de representación de anomalías de temperatura máxima anual de 1990 a 2019 en el ASJC para (Elaboración propia con base en Daymet).

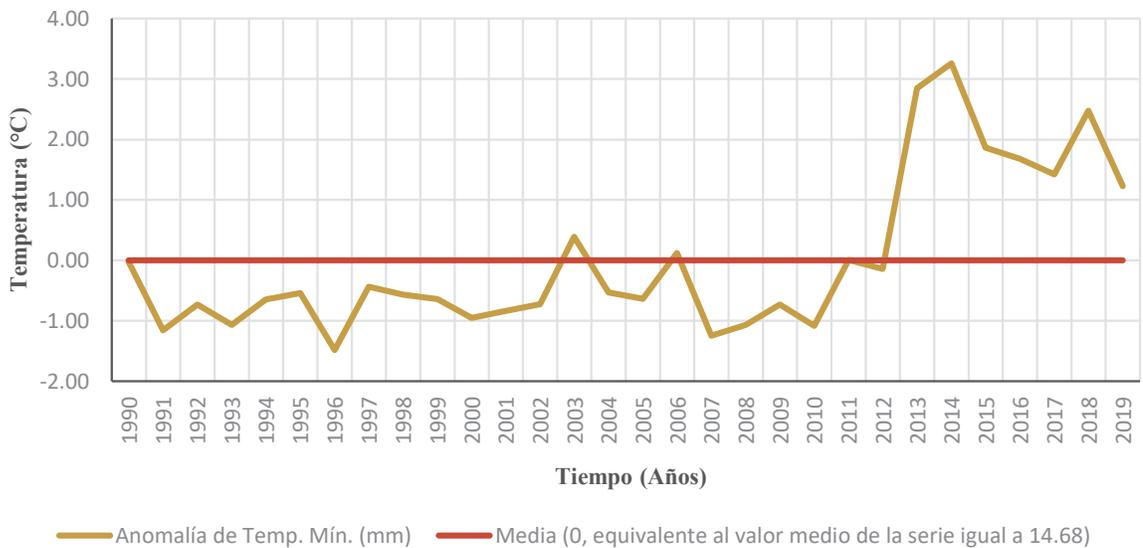


Figura 5.7 Grafica de representación de anomalías de temperatura mínima anual de 1990 a 2019 en el ASJC para (Elaboración propia con base en Daymet).

Mediante la revisión de los datos obtenidos de anomalías (Tabla 5.2) presentes en las variables y de la revisión de las figuras construidas (5.5, 5.6 y 5.7), se puede determinar que existen intercambios en cuanto a ganancias o pérdida de valores respectivos a la media de la línea de tiempo.

Por ello para la precipitación anual indica una media de 369.38 mm, por lo cual el año 2011 fue el que menor precipitación tuvo con -289.86 mm por debajo de la media, mientras que el

año 2006 con 360.89 mm sobre la media. Para la temperatura máxima la media obtenida fue de 31.16 °C, en donde el año 2013 disminuyó 9.56 °C por debajo de la media, y el año que la sobre paso fue 2014 con 4.51 °C. Finalmente la temperatura mínima presenta su disminución de mayor importancia en 1996 con 1.48 °C, pero también cuenta con un valor que excede en un nivel mayor la media, el año 2014 fue el que sobre paso la media de 14.68 con 3.36 °C.

Registros de eventos ciclónicos.

Los registros de eventos ciclónicos disponibles se plasmaron en la Tabla 4.5, con un total de 53 eventos, de los cuales 33 fueron huracanes, 16 tormentas tropicales y 4 depresiones tropicales. Así mismo, se contempló diferenciarlos por la categoría que tenían al momento en el que se acercaron más al acuífero, lo que permitió diferenciar 17 huracanes (con categorías entre 1 y 5), 27 tormentas tropicales, 8 depresiones tropicales y 1 registro de perturbación.

Con el propósito de corroborar lo establecido anteriormente se elaboró la Figura 5.8 que muestra el número de eventos por año de aquellos que influyen en la precipitación del acuífero. De acuerdo con la Figura 5.8 la ocurrencia de eventos ciclónicos por año y que tuvieron influencia respecto a las precipitaciones en el ASJC, marcan una línea de tendencia en aumento (NEC= 0.0102).

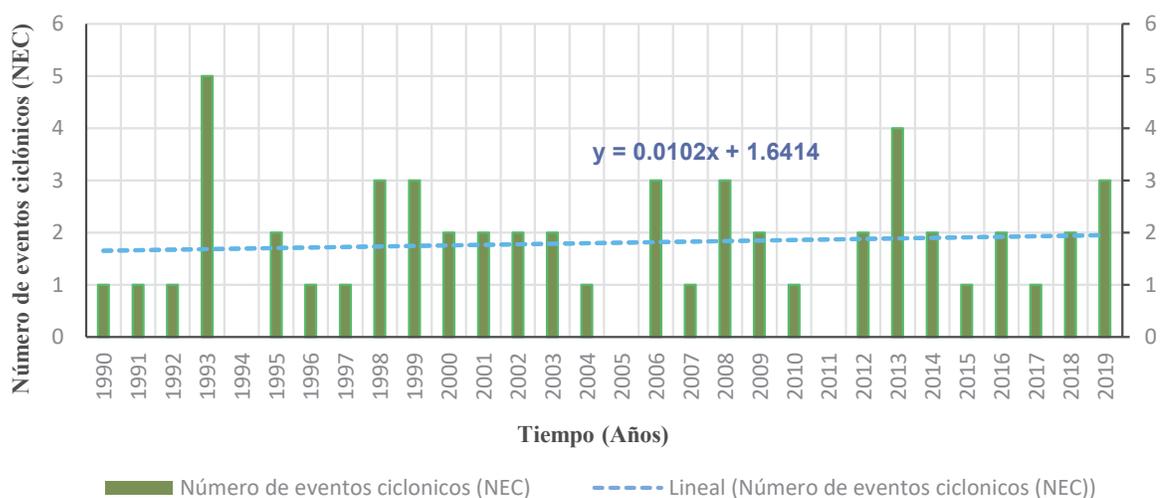


Figura 5.8 Frecuencia de eventos ciclónicos con influencia en el ASJC (Elaboración propia con base en SMN, 2021).

Precipitación vs ocurrencia de eventos ciclónicos

Para encontrar la posible relación entre la precipitación con los eventos ciclónicos, se integraron ambos datos como se presentan en la Figura 5.9. Se evidencia el año 1993, el cual posee la precipitación más elevada en la línea temporal con 731.01 mm, y también es el año en el cual la ocurrencia de eventos ciclónicos fue mayor, integrando 5 eventos, contando 2 depresiones tropicales, 2 tormentas tropicales y un huracán en categoría 2 (considerando el nivel alcanzado en el momento en el cual el evento ciclónico se acercó más con el área de estudio).

Debido a que en el caso de estudio las ocurrencias de eventos meteorológicos extremos solo se implementan como referencia, y de que se podrían correlacionar con las precipitaciones más abundantes en los meses de registro de ambas variables (precipitación y eventos ciclónicos). Por lo tanto, la relación que se encuentra dentro de la figura 5.9 demostrando un comportamiento distinto en cada año, contemplado para la selección de los años de estimación de recarga potencial.

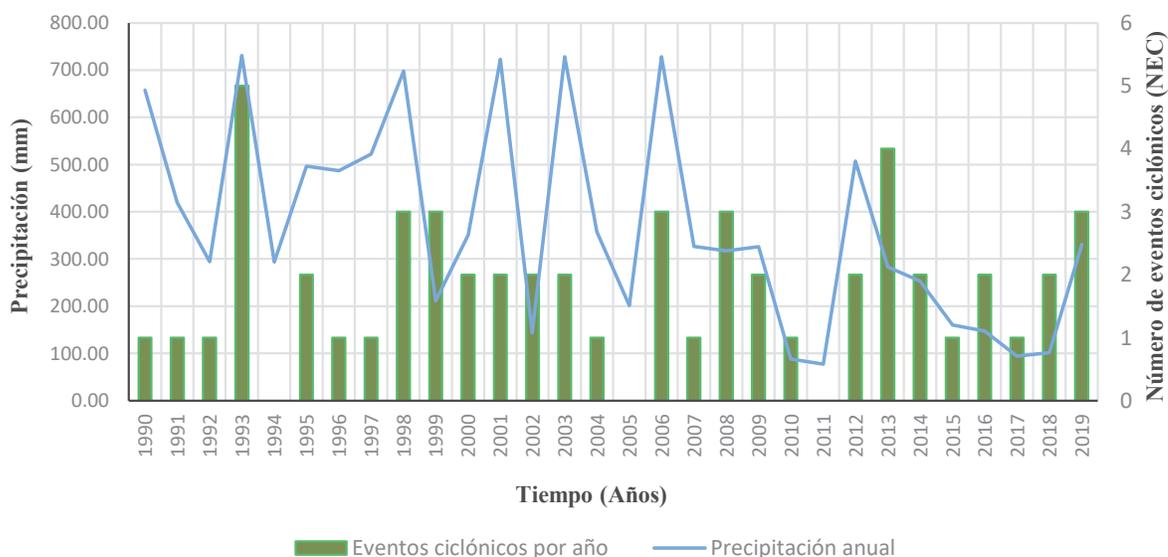


Figura 5.9 Comportamiento de eventos ciclónicos vs precipitación anual en el ASJC, periodo 1990-2019 (Fuente: Elaboración propia con base en Daymet, 2021; SMN, 2021).

5.3. Cambios de uso de suelo

El estudio del cambio del uso de suelo y vegetación para el área que define el acuífero tuvo como fin caracterizar los cambios físicos en relación con el tiempo definido.

Los resultados de la reclasificación de las imágenes satelitales evidencian un cambio, mismo que se analiza como parte de resultados de la reclasificación de uso de suelo. En la Tabla 5.3 se muestran los porcentajes de ocupación por año 1995 y 2018, así como el área ocupada. De manera gráfica se presenta la Figura 5.10 en donde se comparan ambos.

Para el análisis en el cambio de uso de suelo se establece la diferencia entre áreas en el primer año de referencia (1995) menos el área del segundo año (2018), mostrando si una clase o tipo de uso de suelo incrementó o disminuyó. Dichos resultados se muestran en la Tabla 5.4.

La evaluación del cambio de uso de suelo contempla dos grupos: antropico que integra los usos de asentamiento humanos, agricultura, así como suelo desnudo; y el grupo ocupacional natural, en el que se agrupa el bosque de encino, mezquital, matorral desértico, pastizal y cuerpos de agua. El comportamiento indica que, aunque se presentaron aumentos importantes en el grupo de usos antrópicos, los cambios de mayor importancia se dieron en el grupo de los usos naturales.

Tabla 5.3 Superficies ocupacionales de usos de suelo y vegetación del ASJC, 1995 y 2018.

Uso de suelo y vegetación	1995		2018	
	Área (Km ²)	%	Área (Km ²)	%
Cuerpos de agua	0.44	0.03	2.26	0.17
Asentamiento humano	33.83	2.63	42.40	3.30
Suelo desnudo	85.60	6.66	50.30	3.91
Agricultura	24.25	1.88	51.61	4.02
Pastizal	462.26	35.99	449.80	35.02
Bosque de encino	148.32	11.55	115.11	8.96
Matorral desértico	91.69	7.14	96.04	7.32
Mezquital	437.65	34.08	478.51	37.26
Área Total	1284	100	1284	100

Fuente: elaboración propia.

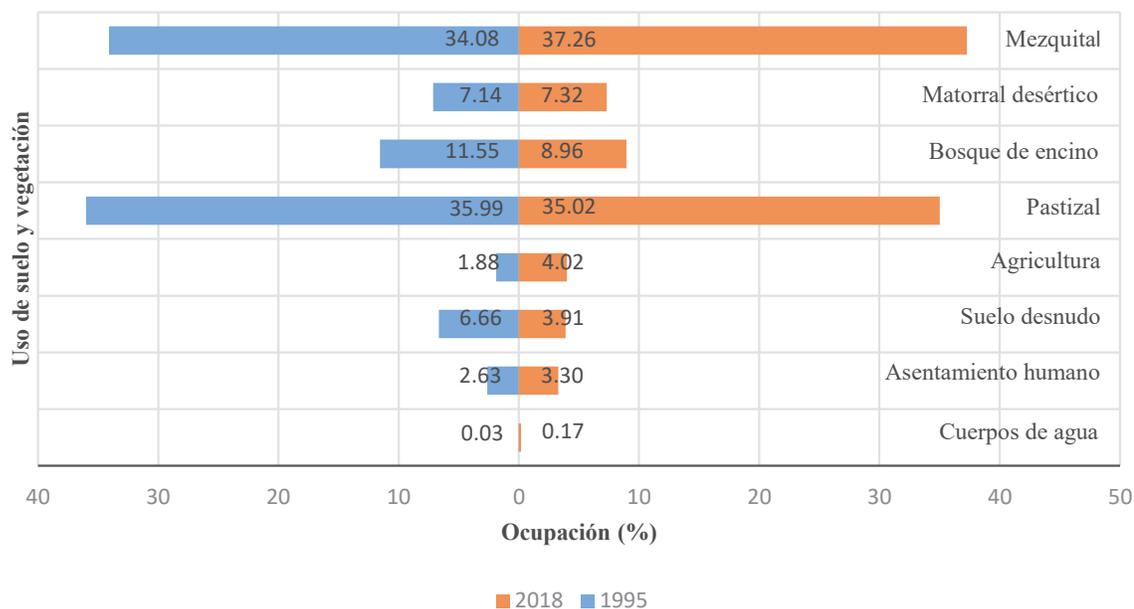


Figura 5.10 Porcentaje de distribución de uso de suelo y vegetación para octubre de 1995 y octubre de 2018 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 5.4 Aumento o disminución de los usos de suelo y vegetación del ASJC del año 1995 al 2018.

Uso de suelo y vegetación	Diferencia de área (Km ²)	%	Situación
Cuerpos de agua	1.81	0.14	Aumento
Asentamiento humano	8.56	0.66	Aumento
Suelo desnudo	35.29	-2.74	Disminuyo
Agricultura	27.36	2.13	Aumento
Pastizal	12.45	-0.97	Disminuyo
Bosque de encino	33.21	-2.58	Disminuyo
Matorral desértico	2.35	0.18	Aumento
Mezquital	40.85	3.18	Aumento
Área total representativa	1284		

Fuente: elaboración propia.

5.4. Estimación de la recarga del acuífero San José del Cabo

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de los métodos descritos en el capítulo 4, así como los resultados de la estimación de la recarga mismo.

- **Precipitación**

Los datos de precipitación mensual de los cuatro años obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales, se detallan en la Tabla 5.5, y de la misma forma se muestra su comportamiento en la Figura 5.11.

Tabla 5.5 Datos de precipitación mensual de los años 1993, 1997, 2017 y 2019.

Precipitación (mm)	1993	1997	217	219
ENE	32.17	71.28	0	2.77
FEB	0	8.3	7.28	0
MAR	0	0	0	0
ABR	0	3.39	0	0
MAY	0	0	0	0
JUN	0	5.02	0	0
JUL	5.18	67.88	7.28	13.31
AGO	158.98	45.68	25.81	22.63
SEP	183.66	293.38	54.08	59.68
OCT	12.15	0	0	78.61
NOV	329.05	34.22	0	148.38
DIC	0	0	0	0
Total:	721.19	529.15	94.45	325.38

Fuente: Elaboración propia con base en Daymet (2021).

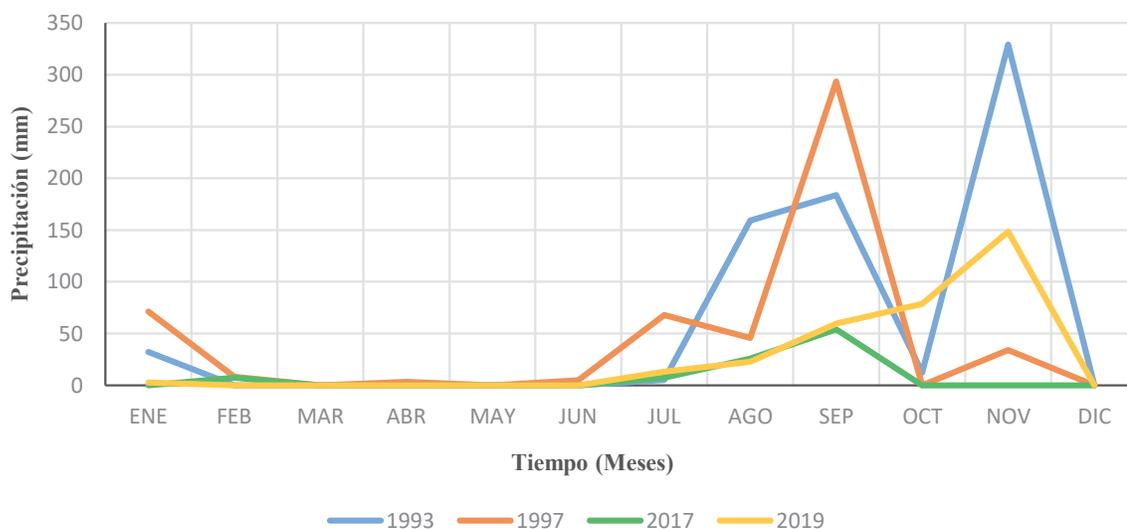


Figura 5.11 Comportamiento de precipitación media mensual en el ASJC para los años 1993, 1997, 2017 y 2019 (Elaboración propia con base en Daymet, 2020).

- **Evapotranspiración del cultivo**

La variable de evapotranspiración a su vez involucra ciertos caracteres que ayudan a su estimación, como se ha explicado en el capítulo anterior.

Temperatura: Los datos de temperatura media mensual representan valores que son indispensables para la obtención de las variables K_{ti} y f_i , mismas que se involucran en la resolución de la ecuación de evapotranspiración. Los datos fueron obtenidos a través del

procesamiento de dos imágenes de temperatura una máxima y una mínima las cuales sumadas y divididas a su vez dieron como resultado los datos individuales para 48 imágenes correspondientes a los datos a nivel mensual de los 4 años, dichos datos se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Datos de temperatura media mensual de los años 1993, 1997, 2017 y 2019.

Temperatura (°C)	1993	1997	2017	2019
ENE	17.20	15.50	17.11	19.11
FEB	17.39	16.81	18.57	18.92
MAR	19.41	20.72	21.23	20.15
ABR	21.34	20.57	23.05	22.51
MAY	22.83	26.06	22.57	21.77
JUN	25.58	27.62	24.52	25.12
JUL	26.30	28.74	28.38	28.16
AGO	27.08	27.12	29.87	28.93
SEP	25.42	26.36	26.19	28.36
OCT	24.45	24.30	26.64	25.56
NOV	20.04	21.33	23.61	23.06
DIC	17.91	17.00	20.89	21.03

Fuente: Elaboración propia con base en Daymet, 2021.

Kc: El coeficiente de cultivo se obtuvo de la especificación de valores representativos de acuerdo con el uso de suelo y vegetación, adecuado al desarrollo de vegetación que se presenta en cada temporada del año. Dichos valores designados por clase de uso de suelo en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Coeficientes de cultivo (**Kc**) recomendados por la FAO, adaptados al uso de suelo y a la estación del año.

Estación	Mes	Uso de suelo	<i>kc</i>	Estación	Mes	Uso de suelo	<i>kc</i>
		Suelo desnudo	0			Suelo desnudo	0
		Asentamiento humano	0			Asentamiento humano	0
		Agrícola	0			Agrícola	0
Invierno	ENE	Pastizal	0.5	Invierno	FEB	Pastizal	0.5
		Bosque de encino	1			Bosque de encino	1
		Matorral Desértico	0.95			Matorral Desértico	0.95
		Mezquital	0.45			Mezquital	0.45

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2021).

Tabla 5.7 Coeficientes de cultivo (*Kc*) recomendados por la FAO, adaptados al uso de suelo y a la estación del año (Continuación).

Estación	Mes	Uso de suelo	<i>Kc</i>	Estación	Mes	Uso de suelo	<i>Kc</i>
Invierno	MAR	Suelo desnudo	0	Verano	AGO	Suelo desnudo	0
		Asentamiento humano	0			Asentamiento humano	0
		Agrícola	0			Agrícola	0.9
		Pastizal	0.5			Pastizal	0.5
		Bosque de encino	1			Bosque de encino	1
		Matorral Desértico	0.95			Matorral Desértico	0.85
		Mezquital	0.45			Mezquital	0.7
Primavera	ABR	Suelo desnudo	0	Otoño	NOV	Suelo desnudo	0
		Asentamiento humano	0			Asentamiento humano	0
		Agrícola	1.15 ²			Agrícola	0.9
		Pastizal	0.5			Pastizal	0.5
		Bosque de encino	1			Bosque de encino	1
		Matorral Desértico	0.8			Matorral Desértico	0.85
		Mezquital	0.65			Mezquital	0.7
Verano	MAY	Suelo desnudo	0	Primavera	MAY	Suelo desnudo	0
		Asentamiento humano	0			Asentamiento humano	0
		Agrícola	1			Agrícola	0
		Pastizal	0.5			Pastizal	0.5
		Bosque de encino	1			Bosque de encino	1
		Matorral Desértico	0.8			Matorral Desértico	0.95
		Mezquital	0.65			Mezquital	0.5
Otoño	JUN	Suelo desnudo	0	Verano	JUL	Suelo desnudo	0
		Asentamiento humano	0			Asentamiento humano	0
		Agrícola	1			Agrícola	0
		Pastizal	0.5			Pastizal	0.5
		Bosque de encino	1			Bosque de encino	1
		Matorral Desértico	0.85			Matorral Desértico	0.9
		Mezquital	0.65			Mezquital	0.7
Verano	JUL	Suelo desnudo	0	Otoño	NOV	Suelo desnudo	0
		Asentamiento humano	0			Asentamiento humano	0
		Agrícola	0.9			Agrícola	0
		Pastizal	0.5			Pastizal	0.5
		Bosque de encino	1			Bosque de encino	1
		Matorral Desértico	0.85			Matorral Desértico	0.9
		Mezquital	0.7			Mezquital	0.5

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2021).

Kti: Los resultados de la estimación del coeficiente de corrección de temperatura se detalla en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Valores de coeficiente de correlación de temperatura (***Kti***) de los años 1993, 1997, 2017 y 2019.

<i>Kti=(0.031144Ti+0.2396)</i>	1993	1997	2017	2019
ENE	0.77	0.72	0.77	0.83
FEB	0.78	0.76	0.81	0.82
MAR	0.84	0.88	0.90	0.86
ABR	0.90	0.88	0.95	0.94
MAY	0.95	1.05	0.94	0.91
JUN	1.03	1.10	1.00	1.02
JUL	1.06	1.13	1.12	1.11
AGO	1.08	1.08	1.17	1.14
SEP	1.03	1.06	1.05	1.12
OCT	1.00	0.99	1.07	1.03
NOV	0.86	0.90	0.97	0.95
DIC	0.79	0.77	0.89	0.89

Fuente: Elaboración propia.

Fi: Los valores del factor climático se exponen en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Valores de factor climático (***fi***) de los años 1993, 1997, 2017 y 2019.

<i>fi=((Ti+17.8)/21.8)(Pi)</i>	1993	1997	2017	2019
ENE	12.23	11.64	12.2	12.9
FEB	11.18	11.00	11.56	11.67
MAR	14.33	14.84	15.04	14.62
ABR	15.44	15.13	16.11	15.90
MAY	17.29	18.67	17.18	16.84
JUN	18.25	19.10	17.80	18.05
JUL	18.97	20.02	19.87	19.77
AGO	18.59	18.6	19.74	19.35
SEP	16.43	16.79	16.72	17.55
OCT	15.68	15.62	16.49	16.09
NOV	12.93	13.37	14.15	13.96
DIC	12.3	11.98	13.32	13.37

Fuente: Elaboración propia con base en Ángeles et al., 2002.

Finalmente, con la aplicación de la ecuación 4.7 y con base en los datos mostrados anteriormente se obtuvieron los datos de evapotranspiración de cultivo de la Tabla 5.10 y

representados gráficamente en la Figura 5.12. Dichos valores de evapotranspiración para algunos meses se igualaron a 0 ya que en algunos meses no existe precipitación representativa, mientras que otros se igualaron con un valor razonable respecto a los valores de precipitación y escurrimiento, remarcados de color amarillo y acompañados de un asterisco.

Tabla 5.10 Valores de evapotranspiración del cultivo (*E_{Tc}*), para los años de 1993, 1997, 2017 y 2019.

Evapotranspiración	1993	1997	2017	2019
ENE	5.95	5.4	0	1.44*
FEB	0	4.37*	3.79*	0
MAR	0	0	0	0
ABR	0	1.79*	0	0
MAY	0	0	0	0
JUN	0	2.37*	0	0
JUL	2.76*	14.62	3.64*	6.86*
AGO	12.87	12.82	13.49*	11.75*
SEP	10.81	11.31	10.85	12.20
OCT	6.31*	0	0	8.48
NOV	7.09	7.72	0	6.81
DIC	0	0	0	0
Total:	45.79	60.4	31.77	47.54

Fuente: Elaboración propia.

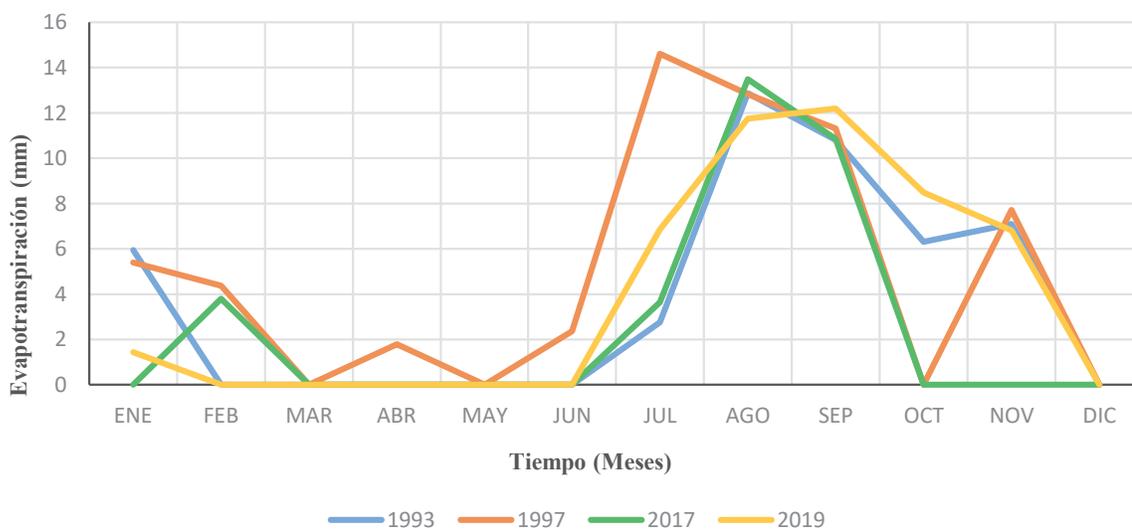


Figura 5.12 Comportamiento de evapotranspiración mensual en el ASJC para los años 1993, 1997, 2017 y 2019 (Elaboración propia).

Escorrentía

Su estimación utiliza los datos de precipitación mensual de los años 1993, 1997, 2017 y 2019 mostrados en la Tabla 5.5 y los valores del coeficiente de escorrentía (C_e), mismos que se obtuvieron de la relación de pendiente, uso de suelo y textura de suelo, como se mostraron en la Tabla 4.17.

Mediante la resolución de la ecuación 4.8 se obtuvo el escorrentía generado por áreas dentro del acuífero. Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 5.11 y son representados gráficamente en la Figura 5.13, para visualizar su comportamiento.

Tabla 5.11 Valores de escorrentía (ES), para los años 1993,1997, 2017 y 2019.

Escorrentía (mm)	1993	1997	2017	2019
ENE	15.46	34.62	0	1.33
FEB	0	3.93	3.49	0
MAR	0	0	0	0
ABR	0	1.6	0	0
MAY	0	0	0	0
JUN	0	2.65	0	0
JUL	2.42	33.7	3.64	6.45
AGO	77.05	22.86	12.32	10.88
SEP	89.42	142.58	26.12	29.06
OCT	5.84	0	0	38.25
NOV	154.46	17.17	0	71.81
DIC	0	0	0	0
Total:	344.65	259.11	45.57	157.78

Fuente: Elaboración propia.

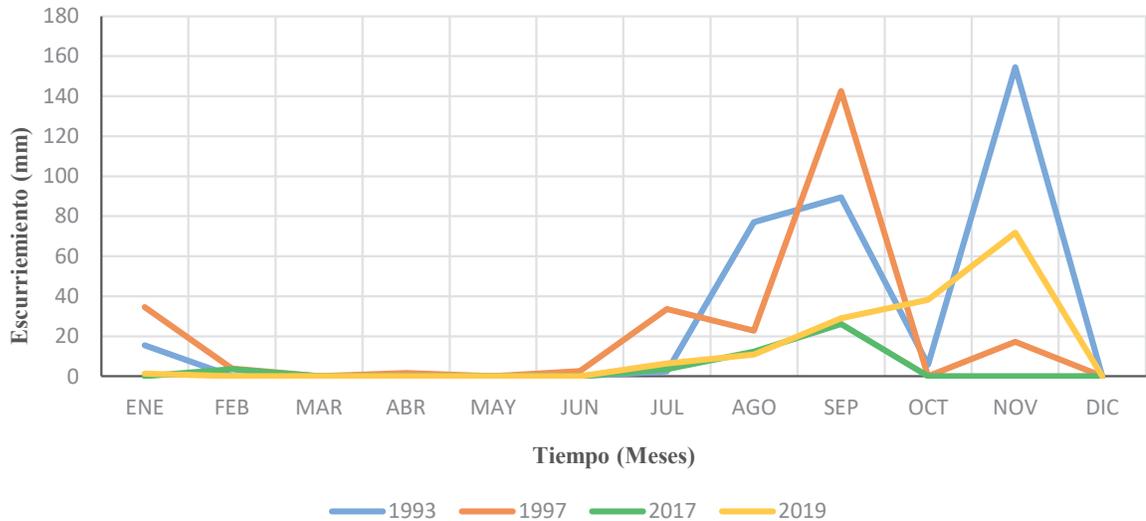


Figura 5.13 Comportamiento del escurrimiento mensual en el ASJC para los años 1993, 1997, 2017 y 2019 (Elaboración propia).

- **Estimación de recarga**

Se determinaron los valores de recarga potencial en el acuífero para los 48 meses de los cuatro años seleccionados aplicando el método de balance de humedad del suelo, considerando el análisis histórico de la variabilidad climática representada por valores de temperatura y precipitación y los eventos meteorológicos extremos.

Los diferentes valores de recarga por mes y por año se muestran en la Tabla 5.12 a la 5.15, además de los valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración del cultivo. En color amarillo acompañados de un asterisco, se señalan los datos ajustados de acuerdo al valor de precipitación obtenido, ya que tanto la evapotranspiración y escurrimiento dependen de ella.

Respecto al comportamiento de la recarga de los años estudiados, estos presentan un comportamiento desigual ya que se rigüe por la ocurrencia de eventos ciclónicos extremos. Aunque también se encuentra aunado a la disminución de precipitación mensual y el cambio del uso de suelo. Se identifica también la marcada temporada de lluvias de la región delimitándose del mes de junio o julio a diciembre.

Tabla 5.12 Balance de humedad del suelo correspondiente al año 1993.

Mes	Precipitación (mm)	ETc (mm)	Escurrimiento (mm)	Recarga potencial (mm)
ENE	32.17	5.95	15.46	10.76
FEB	0	0	0	0
MAR	0	0	0	0
ABR	0	0	0	0
MAY	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0
JUL	5.18	2.76*	2.42	0
AGO	158.98	12.87	77.05	69.06
SEP	183.66	10.81	89.42	83.43
OCT	12.15	6.31*	5.84	0
NOV	329.05	7.09	154.46	167.50
DIC	0	0	0	0
Total:	721.19	45.79	344.65	330.75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.13 Balance de humedad del suelo correspondiente al año 1997.

Mes	Precipitación (mm)	ETc (mm)	Escurrimiento (mm)	Recarga potencial (mm)
ENE	71.28	5.40	34.62	31.26
FEB	8.3	4.37*	3.93	0
MAR	0	0	0	0
ABR	3.39	1.79*	1.60	0
MAY	0	0	0	0
JUN	5.02	2.37*	2.65	0
JUL	67.88	14.62	33.70	19.56
AGO	45.68	12.82	22.86	10.00
SEP	293.38	11.31	142.58	139.49
OCT	0	0	0	0
NOV	34.22	7.72	17.17	9.33
DIC	0	0	0	0
Total:	529.15	60.40	259.11	209.64

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.14 Balance de humedad del suelo correspondiente al año 2017.

Mes	Precipitación (mm)	ETc (mm)	Escurrimiento (mm)	Recarga potencial (mm)
ENE	0	0	0	0
FEB	7.28	3.79*	3.49	0
MAR	0	0	0	0
ABR	0	0	0	0
MAY	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0
JUL	7.28	3.64*	3.64	0
AGO	25.81	13.49*	12.32	0
SEP	54.08	10.85	26.12	17.11
OCT	0	0	0	0
NOV	0	0	0	0
DIC	0	0	0	0
Total:	94.45	31.77	45.57	17.11

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.15 Balance de humedad del suelo correspondiente al año 2019.

Mes	Precipitación (mm)	ETc (mm)	Escurrimiento (mm)	Recarga potencial (mm)
ENE	2.77	1.44*	1.33	0
FEB	0	0	0	0
MAR	0	0	0	0
ABR	0	0	0	0
MAY	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0
JUL	13.31	6.86*	6.45	0
AGO	22.63	11.75*	10.88	0
SEP	59.68	12.20	29.06	18.42
OCT	78.61	8.48	38.25	31.88
NOV	148.38	6.81	71.81	69.76
DIC	0	0	0	0
Total:	325.38	47.54	157.78	120.06

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detallan los cuatro mapas que representan la recarga anual total (Figura 5.14 a 5.17) para los cuatro años correspondientes (1993, 1997, 2017, 2019).

También se elaboraron los mapas de recarga a nivel mensual, pero en ellos fue apreciable un escalonamiento entre valores, debido a las características de las imágenes satelitales de temperatura y precipitación obtenidas de Daymet, las cuales tenían un tamaño de pixel más

grande, en comparación con los demás insumos requeridos que se presentan a un nivel de detalle mayor, por tanto, un tamaño de pixel menor. Como se mostró en el capítulo anterior estos datos se obtienen a través de la interpolación de datos existentes.

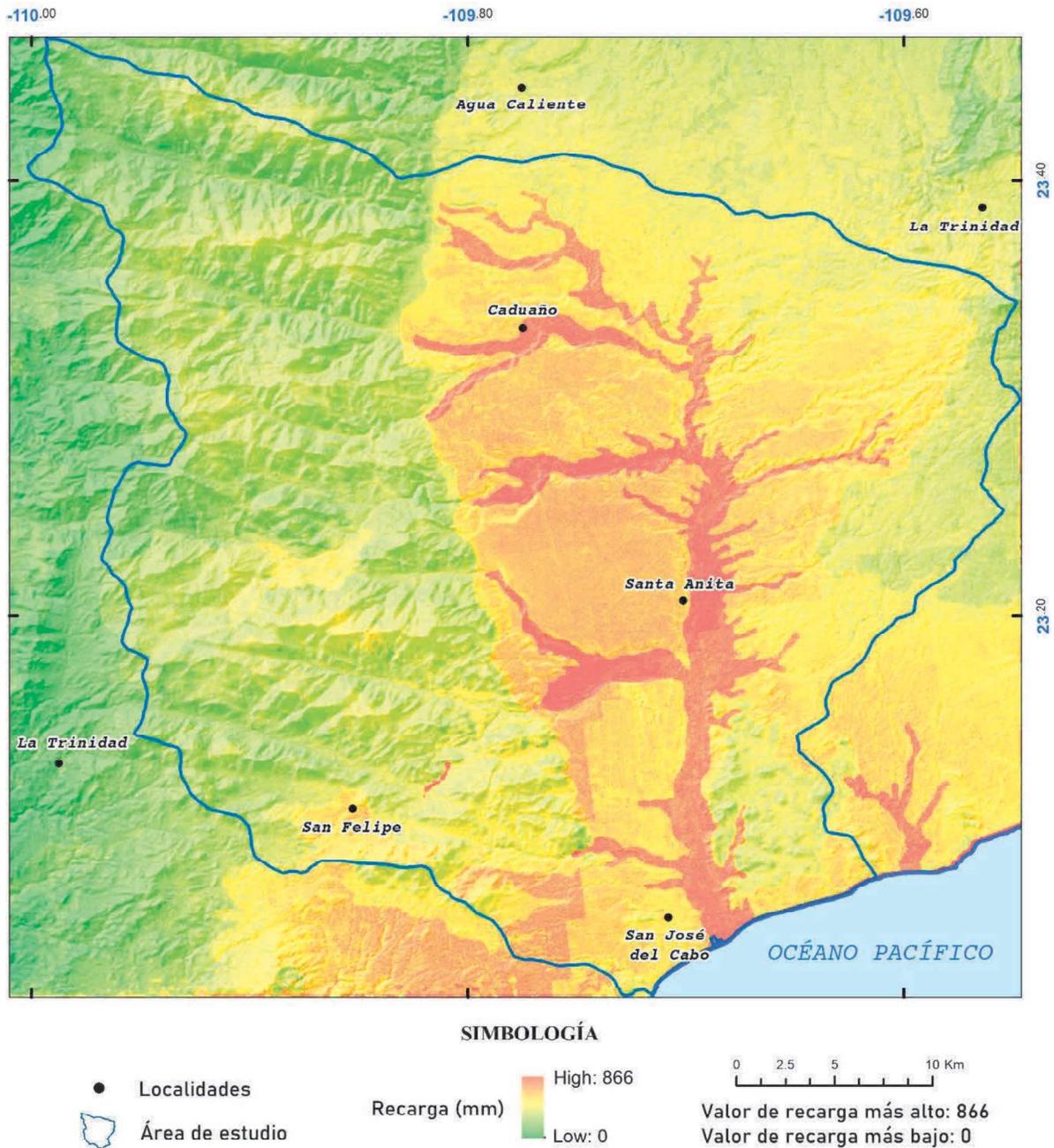
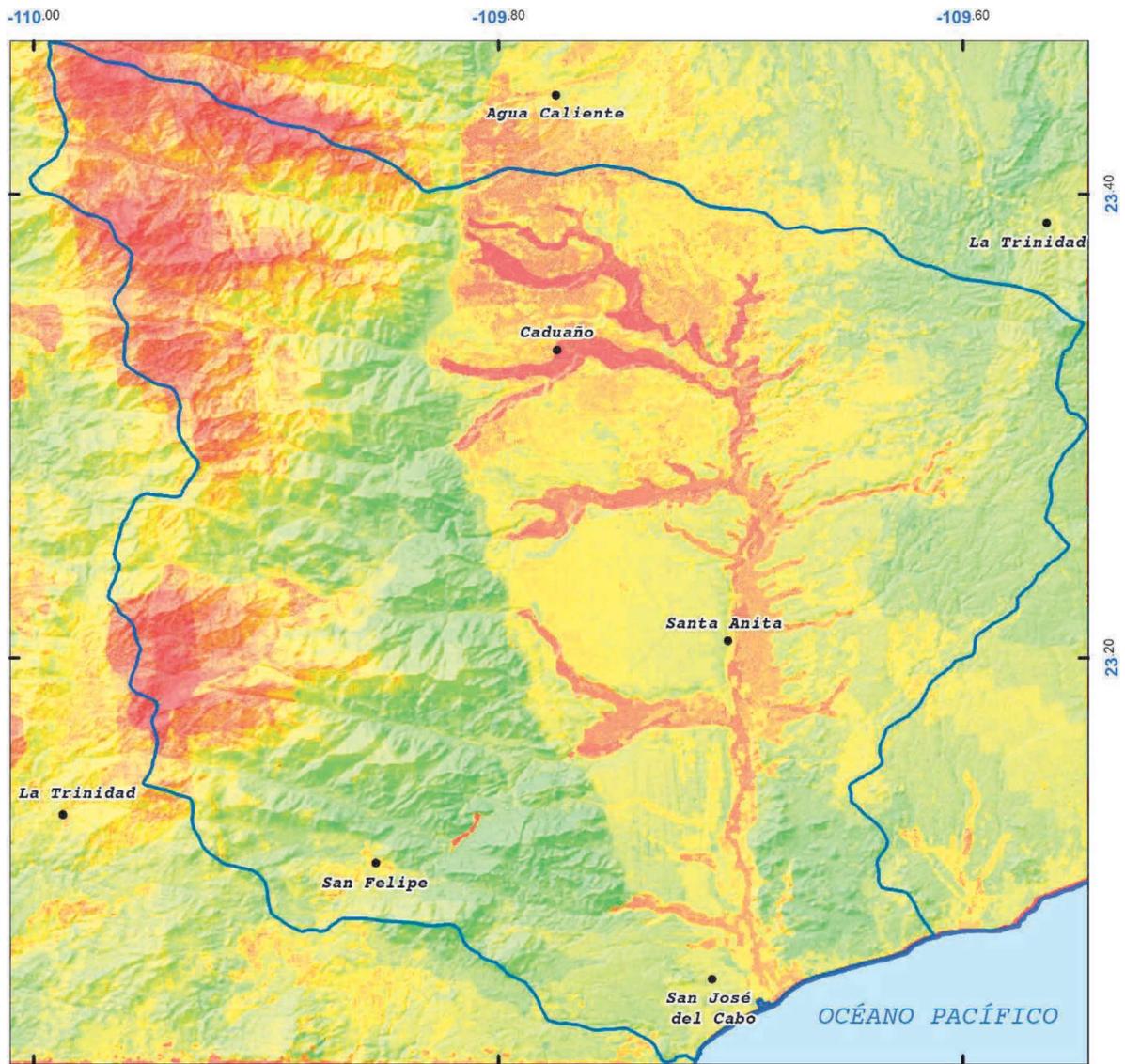


Figura 5.14 Mapa de recarga anual acumulada del ASJC para el año de 1993.



SIMBOLOGÍA

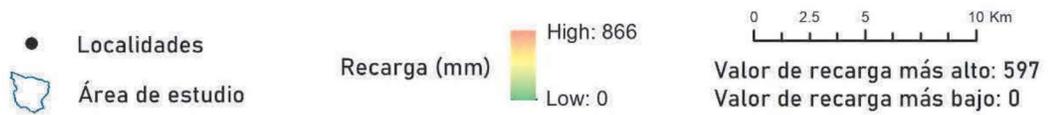
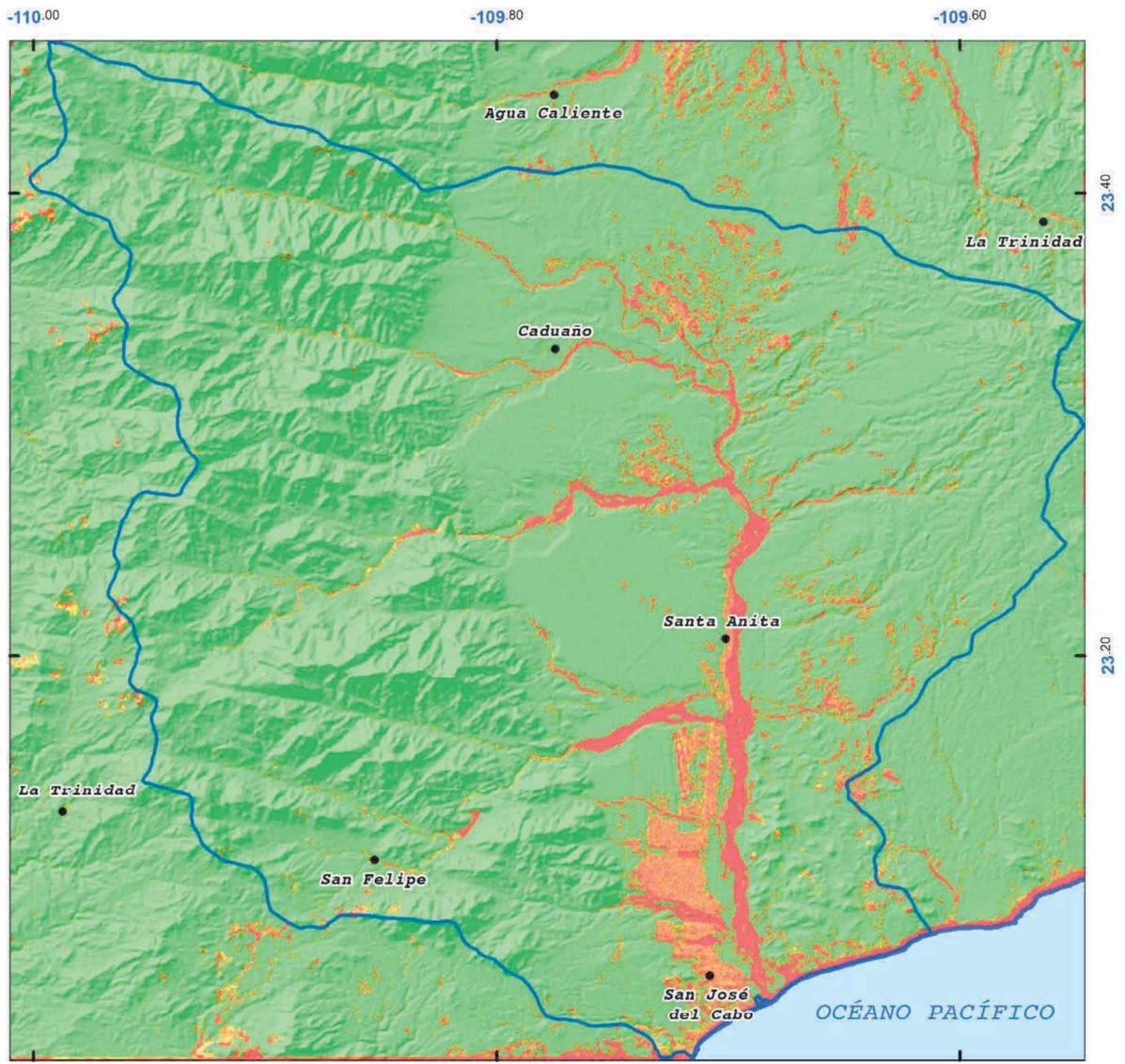


Figura 5.15 Mapa de recarga anual acumulada del ASJC para el año de 1997.



SIMBOLOGÍA

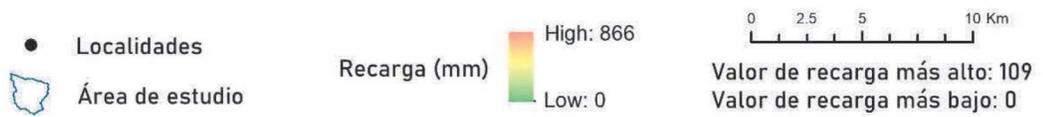
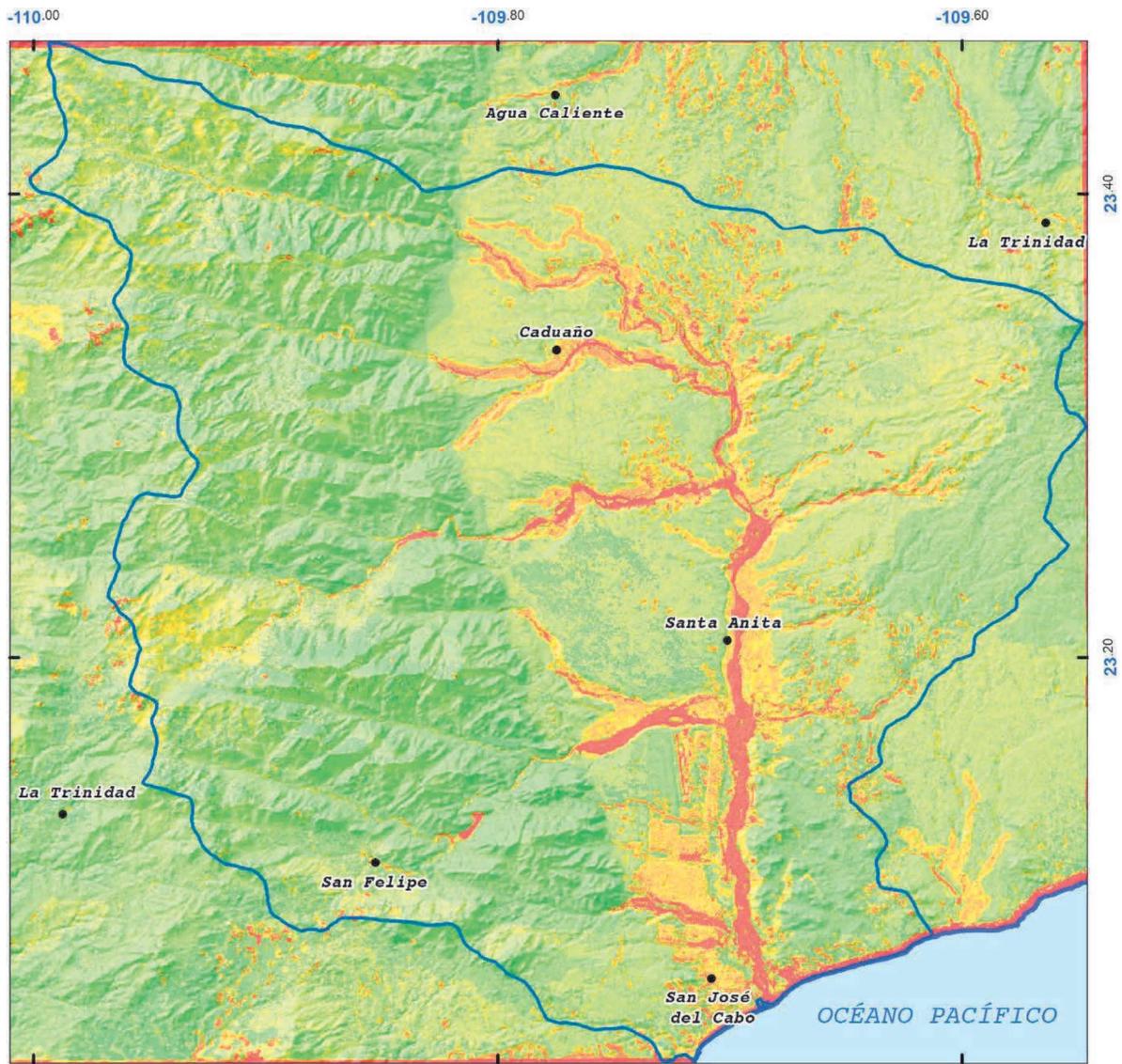


Figura 5.16 Mapa de recarga anual acumulada del ASJC para el año de 2017.



SIMBOLOGÍA

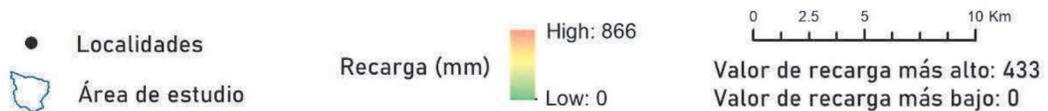


Figura 5.17 Mapa de recarga anual acumulada del ASJC para el año de 2019.

Los valores obtenidos de recarga se convirtieron a unidades de **hm³**, mismos que se exponen en la Tabla 5.16 y se representaron gráficamente en la Figura 5.18.

Con base en la Tabla 5.16 se puede evidenciar que para el año de 1993 la recarga acontece en 4 meses, en donde el mes de noviembre presentó la recarga más significativa con 215.07 hm³, mientras que el mes con menor recarga fue el mes de enero con 13.81 hm³.

El año 1997 hay un total de 5 meses en los cuales se generó recarga, siendo este año el de mayor cantidad de meses de aporte, aunque con volúmenes menores en comparación con los otros. El mes de noviembre fue el de menor aporte con 11.97 hm³ y el mes con valor más alto fue septiembre con 179.10 hm³.

Para el año 2017, se obtiene un menor valor de recarga presentando únicamente un mes con recarga, el mes de septiembre con 21.96 hm³.

Finalmente, en el año de 2019 se presentaron 3 meses con recarga. El mes de menor valor fue septiembre con 23.65 hm³ y el de mayor fue noviembre con 89.57 hm³.

Tabla 5.16 Recarga potencial a nivel mensual para los años de 1993, 1997, 2017 y 2019.

Mes	1993	1997	2017	2019
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³
ENE	13.81	40.13	0	0
FEB	0	0	0	0
MAR	0	0	0	0
ABR	0	0	0	0
MAY	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0
JUL	0	25.115	0	0
AGO	88.67	12.84	0	0
SEP	107.12	179.10	21.96	23.65
OCT	0	0	0	40.93
NOV	215.07	11.97	0	89.57
DIC	0	0	0	0
Total:	424.68	269.17	21.969	154.15
Lluvia	926.01	679.43	121.27	417.79
Porcentaje de recarga con respecto a la lluvia	45.86%	39.62%	18.12%	36.90%

Fuente: Elaboración propia.

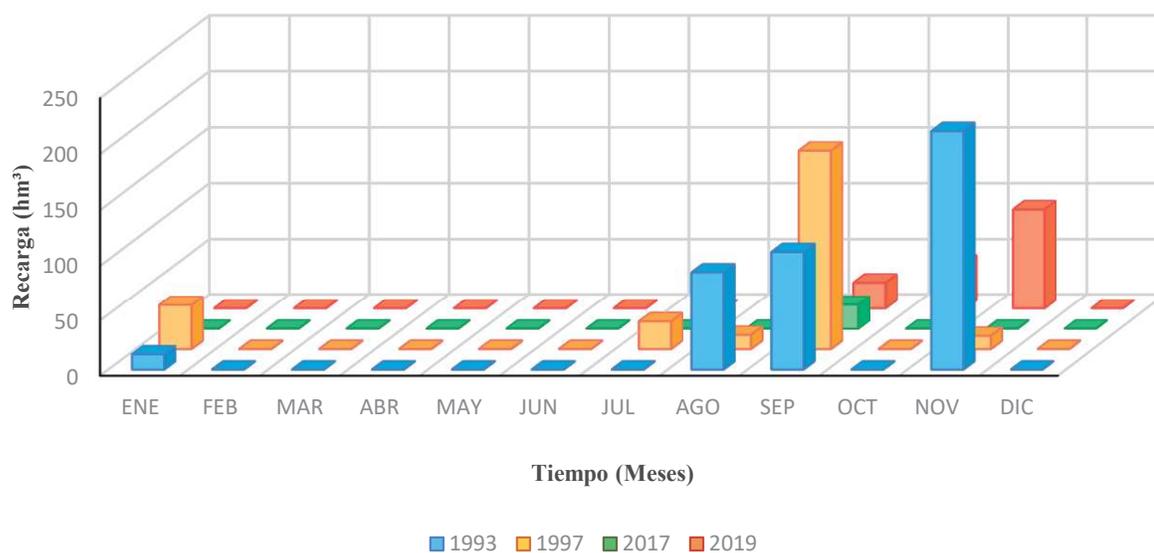


Figura 5.18 Representación de recarga media mensual en hm^3 para los años de 1993, 1997, 2017 y 2019
(Fuente: Elaboración propia).

En esta anterior tabla (5.16) se puede apreciar que, si se calcula el porcentaje de volumen de recarga potencial con respecto al volumen de lluvia, este porcentaje varía entre el 18 y el 45%, valores que se pueden considerar elevados con base en lo reportado por Scanlon et al. (2006) para diversas regiones áridas y semiáridas del mundo como recarga real. En este caso los valores estimados en la investigación son valores de recarga potencial, por lo cual no toda esta recarga llegaría a alcanzar el acuífero.

Se buscó efectuar una comparación de estos resultados con los obtenidos previamente en este acuífero. En el estudio de CNA (2020) el balance de aguas subterránea se planteo para el periodo 2010-2011, en una superficie de 100 km^2 en las que están dispersos los aprovechamientos. Para este balance se consideró que la recarga vertical se produce en las regiones áridas y semiáridas por dos principales mecanismos, uno es a través de la infiltración a lo largo de los causes de los escurrimientos superficiales y el otro está representado por la recarga de frente de montaña. Una vez se calcularon las componentes de la ecuación de balance, se evaluó la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, obteniéndose un valor de 0.3 hm^3 , que representaría la recarga que recibe el acuífero (recarga real). Hay que tener muy presente que en estos años para los cuales se estimó el balance la precipitación fue de 90 mm

para el año 2010 y de 77 mm para el año 2011, solo comparable con el valor de precipitación del año 2017 que fue de 94 mm.

De forma similar, CNA (2020^b) efectuó el balance para el acuífero Cabo San Lucas. Este balance de aguas subterráneas se evaluó para el año 2010, en un área de 38.99 km². De acuerdo con el modelo conceptual del acuífero que se planteó en este estudio, la recarga total que recibe el acuífero ocurre por dos procesos: por infiltración de agua de lluvia en el valle, y por infiltración de los escurrimientos a lo largo de los arroyos principales, en conjunto solo la recarga vertical (R_v). Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se procedió a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, que fue de 1.0 hm³/año, siendo esta recarga una recarga real.

En comparación con otros acuíferos vecinos, en el caso del límite norte con el acuífero Santiago, en el informe de CNA (2020^c) se señala que las infiltraciones de los escurrimientos superficiales constituyen la principal fuente de recarga horizontal del acuífero, y siendo del orden de 16 hm³/año; por el contrario, la infiltración directa de la precipitación pluvial y/o recarga vertical es del orden de los 8 hm³/año. Se considera que a principio de los años “70” el cambio de almacenamiento no era significativo por su casi nula extracción y, por lo tanto, para el periodo 1970-1975 la recarga real podría ser estimada en un promedio de 19 hm³/año y para el periodo de 1975-1980 de 30 hm³/año.

Considerando la identificación de una zona de valle y otra zona de montaña, se construyeron las Tablas 5.17 a 5.20 para mostrar los datos de comportamiento de recarga por zonas. Estas tablas muestran los valores de recarga en las zonas de montaña, en la zona del valle, la suma de áreas y, finalmente, el dato de recarga obtenido del procesamiento de la imagen. Hay variaciones en los datos con respecto a las Tablas 5.12 a 5.15 debido a la pérdida de decimales y a que descartaron datos con valores muy bajos que podrían no representar el comportamiento de la recarga.

Estos valores de recarga se estimaron empleando la imagen representativa para la recarga de cada mes, y delimitándola con el archivo en formato raster del polígono del acuífero. Con el módulo “Extract” en TerrSet se obtuvo un valor único representativo mensual para la recarga.

De acuerdo con los datos mostrados en estas Tablas 5.17 a 5.20 se puede apreciar que se produce una mayor recarga en la zona del valle en 1993, 2017 y 2019, y solo en el caso del año de 1997 hay una mayor recarga en la zona montañosa (220.77 mm en montaña vs 209.13 mm en valle).

Tabla 5.17 Recarga potencial mensual de 1993 conforme a la división de zona montañosa (Mont) y de valle (Vall).

Mes	1993 Variables (mm)							
	PP		Etc		Esguerrimiento		Recarga	
	Mont	Vall	Mont	Vall	Mont	Vall	Mont	Vall
ENE	32.80	31.52	7.36	4.40	17.11	13.60	8.63	13.51
FEB	0	0	0	0	0	0	0	0
MAR	0	0	0	0	0	0	0	0
ABR	0	0	0	0	0	0	0	0
MAY	0	0	0	0	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0	0	0	0	0
JUL	4.40	6.12	15.11	10.34	2.29	2.61	0.02	0.51
AGO	160.95	158.63	15.07	10.40	85.29	68.76	60.55	79.48
SEP	207.93	159.49	12.59	8.81	110.22	67.99	85.14	82.70
OCT	10.69	14.61	12.43	7.31	5.89	6.23	0.19	3.05
NOV	293.32	374.25	8.80	5.22	155.20	162.52	129.32	206.55
DIC	0	0	0	0	0	0	0	0
Total:	710.09	744.62	71.36	46.47	376.01	321.71	283.85	385.80

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.18 Recarga potencial mensual de 1997 conforme a la división de zona montañosa (Mont) y de valle (Vall).

1997	Variables (mm)								
	Mes	PP		Etc		Escurrimiento		Recarga	
		Mont	Vall	Mont	Vall	Mont	Vall	Mont	Vall
ENE	8	66.92	6.92	3.72	39.79	29.14	29.00	34.06	
FEB	7.00	10.16	6.99	3.68	3.78	4.34	1.12	3.43	
MAR	0	0	0	0	0	0	0	0	
ABR	3.25	3.51	10.09	6.48	1.71	1.47	0.01	0.22	
MAY	0	0	0	0	0	0	0	0	
JUN	9.86	0	16.03	0	5.19	0	0.66	0	
JUL	89.58	45.47	17.49	11.44	47.86	19.06	25.34	16.60	
AGO	64.13	23.40	14.84	10.57	33.73	9.98	16.95	5.88	
SEP	314.41	267.61	13.09	9.34	165.79	115.61	135.55	142.66	
OCT	0	0	0	0	0	0	0	0	
NOV	46.06	20.72	9.68	5.56	24.37	9.01	12.14	6.28	
DIC	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total:	609.99	437.78	95.13	50.79	322.22	188.61	220.77	209.13	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.19 Recarga potencial mensual de 2017 conforme a la división de zona montañosa (Mont) y de valle (Vall).

2017	Variables (mm)								
	Mes	PP		Etc		Escurrimiento		Recarga	
		Mont	Vall	Mont	Vall	Mont	Vall	Mont	Vall
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	
FEB	7.24	7.34	4.86	4.43	3.84	3.11	0.16	1.03	
MAR	0	0	0	0	0	0	0	0	
ABR	0	0	0	0	0	0	0	0	
MAY	0	0	0	0	0	0	0	0	
JUN	0	0	0	0	0	0	0	0	
JUL	9.62	4.72	15.09	12.36	5.10	2.03	0.05	0.34	
AGO	24.66	27.22	15.67	12.73	13.05	11.53	0.60	4.37	
SEP	56.01	51.88	11.67	9.96	29.73	21.96	14.64	19.93	
OCT	0	0	0	0	0	0	0	0	
NOV	0	0	0	0	0	0	0	0	
DIC	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total:	97.53	91.16	47.30	39.48	51.72	38.63	15.45	25.67	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.20 Recarga potencial mensual de 2019 conforme a la división de zona montañosa (Mont) y de valle (Vall).

2019	Variables (mm)							
	PP		Etc		Esguerrimiento		Recarga	
	Mont	Vall	Mont	Vall	Mont	Vall	Mont	Vall
ENE	3.08	2.46	5.71	4.92	1.62	1.03	0.07	0.24
FEB	0	0	0	0	0	0	0	0
MAR	0	0	0	0	0	0	0	0
ABR	0	0	0	0	0	0	0	0
MAY	0	0	0	0	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0	0	0	0	0
JUL	14.24	12.28	14.97	12.17	7.56	5.21	0.08	1.09
AGO	23.28	21.90	15.21	12.02	12.35	9.22	0.26	2.74
SEP	65.81	52.80	13.58	10.70	34.97	22.34	17.27	19.76
OCT	85.76	70.53	9.11	7.84	45.57	29.88	31.08	32.85
NOV	155.29	140.41	7.35	6.25	82.39	59.56	65.54	74.58
DIC	0	0	0	0	0	0	0	0
Total:	347.46	300.39	65.94	53.91	184.46	127.23	114.30	131.27

Fuente: Elaboración propia.

La recarga tiene un mayor aporte en esta zona del valle debido a sus propias características como son las litológicas, edafológicas, uso de suelo, vegetación y pendientes.

5.5. Análisis del comportamiento de la recarga con respecto a la variabilidad climática

Ya que este trabajo se enfoca en la obtención de recarga media mensual del Acuífero San José del Cabo, y en el análisis de variabilidad climática se construyeron las Figuras 5.19 a 5.22, las cuales ejemplifican el comportamiento de la precipitación, evapotranspiración, esguerrimiento y recarga en valores medios mensuales, en unidades de milímetros, del área del acuífero.

En los cuatro años se aprecia que el comportamiento de la precipitación y esguerrimiento están totalmente relacionados. La variable evapotranspiración tiene un comportamiento similar en todos los casos. Bajo el método implementado se asume que la evapotranspiración se

presenta en todos los meses, sin embargo, estos se igualan a 0 para los meses en los cuales la precipitación es nula.

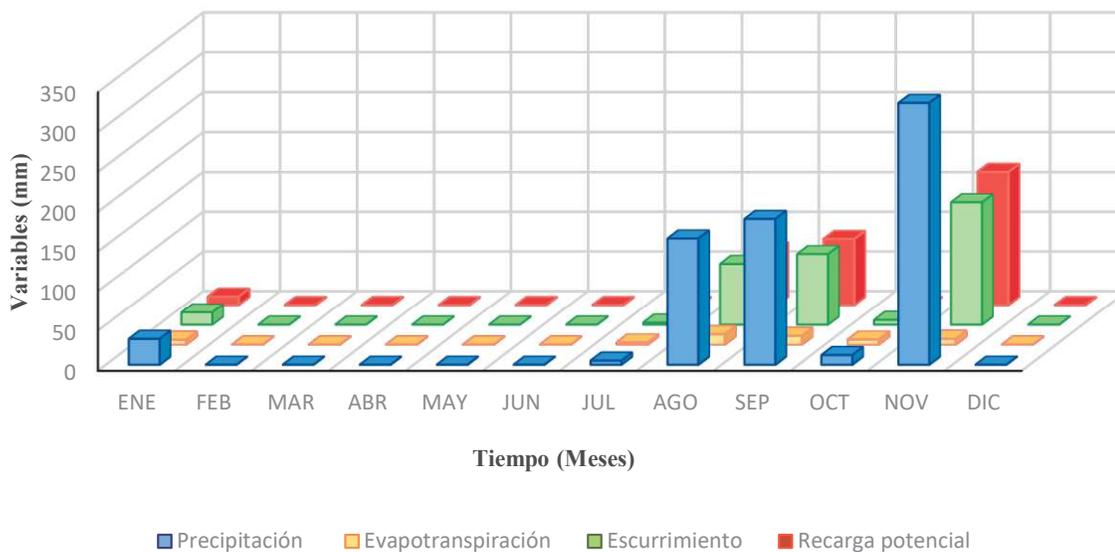


Figura 5.19 Comportamiento de variables para el año 1993 en valores medios mensuales (Fuente: Elaboración propia).

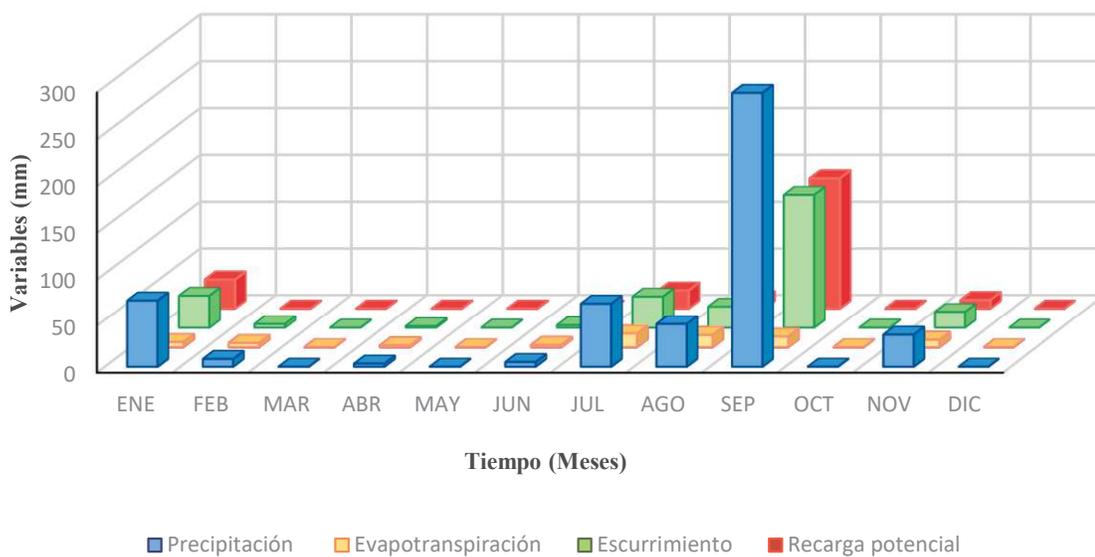


Figura 5.20 Comportamiento de variables para el año 1997 en valores medios mensuales (Fuente: Elaboración propia).

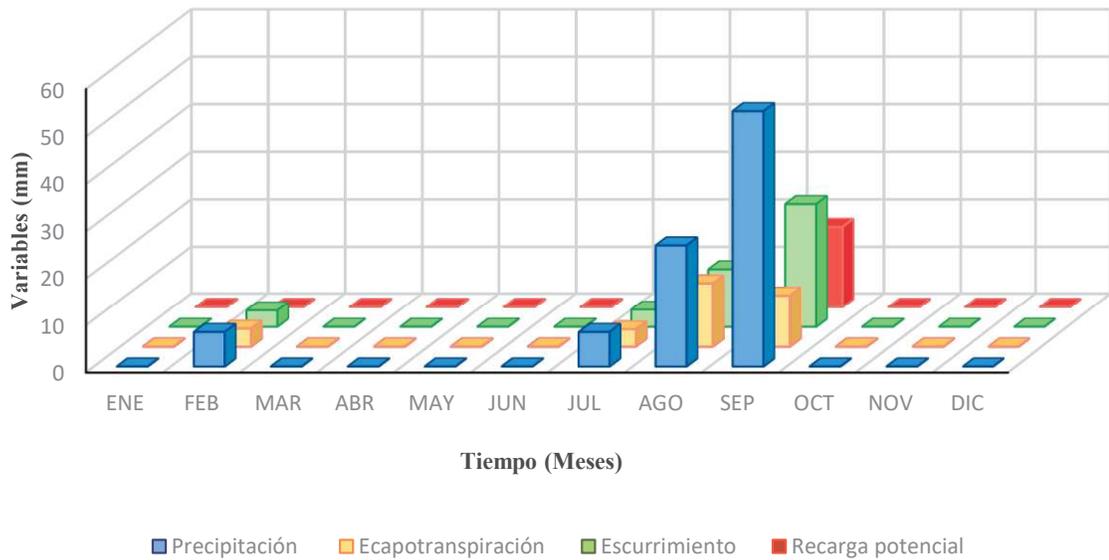


Figura 5.21 Comportamiento de variables para el año 2017 en valores medios mensuales (Fuente: Elaboración propia).

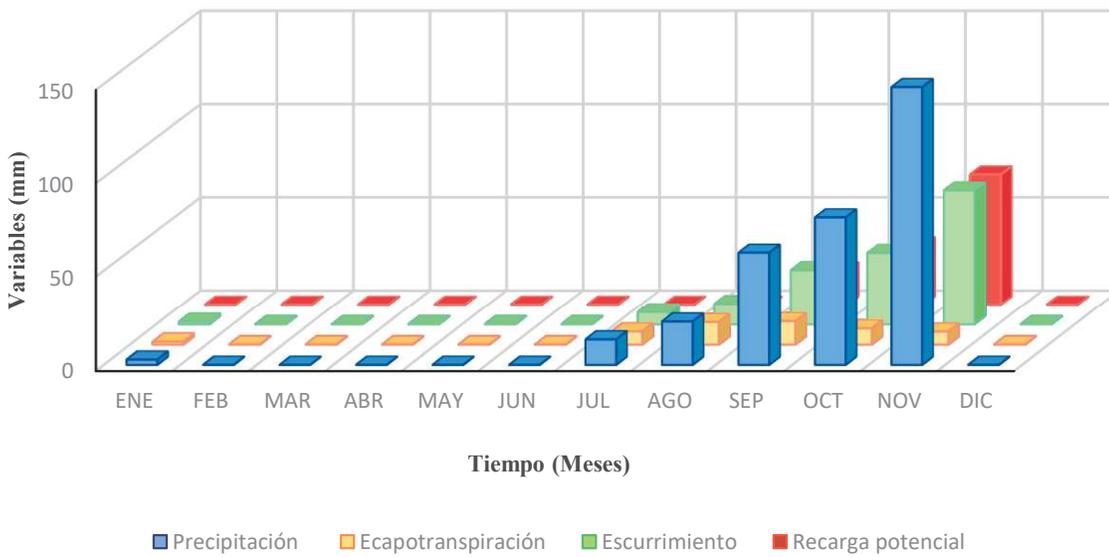


Figura 5.22 Comportamiento de variables para el año 2019 en valores medios mensuales (Fuente: Elaboración propia).

Para el año de 1993, la recarga mensual representa valores para 4 meses del año, y el mes de septiembre se ve influenciado por la ocurrencia de 3 eventos meteorológicos extremos de los que se tiene registro, correspondientes al huracán Hilary, el huracán Lidia de categoría 2 y la depresión tropical DT14E. por otro lado, en el mes de julio se detectó una precipitación de 5 mm, y no hubo recarga, aunque existieron 2 eventos meteorológicos, la depresión tropical DT3E y el huracán Calvin que alcanzó la categoría en tormenta tropical a su paso por la región del acuífero.

En el año de 1997 el mes de septiembre presentó la precipitación a nivel mensual más alta de los 4 años en análisis, con 293mm, aporte justificado ante el paso del huracán Nora el cual tuvo categoría 1, lo cual supuso una recarga potencial de 179 mm.

Para el año 2017 se registraron los niveles más bajos de precipitación, aunque en el mes de septiembre se pudo estimar una recarga de 17 mm, influenciado por la ocurrencia de la tormenta tropical Lidia.

Finalmente, para el año 2019 la recarga se concentra en 3 meses, septiembre, octubre y noviembre, periodo durante el cual se registró la ocurrencia de 3 eventos meteorológicos extremos, dos correspondiente al mes de septiembre, definidos como primero y segundo impacto del huracán Lorena el cual alcanzó categoría 1 a su paso en el acuífero. El tercer evento se registró en el mes de octubre con la tormenta tropical Narda que provocó un aporte de 78 mm de precipitación mensual.

A modo de ejemplificar lo anteriormente mencionado se plasmó en la Figura 5.23 una comparación de los eventos meteorológicos extremos registrados por años, en comparación con la recarga que se generó dentro del acuífero para los 4 años seleccionados en el análisis.

La comparación entre años resulta útil al momento de evidenciar cambios en el comportamiento de variables como precipitación principalmente, temperatura que influye en la evapotranspiración y el escurrimiento que se genera en el acuífero debido a un cambio de uso de suelo, que se encuentra en constante cambio debido al desarrollo urbano y al cambio de factores climáticos.

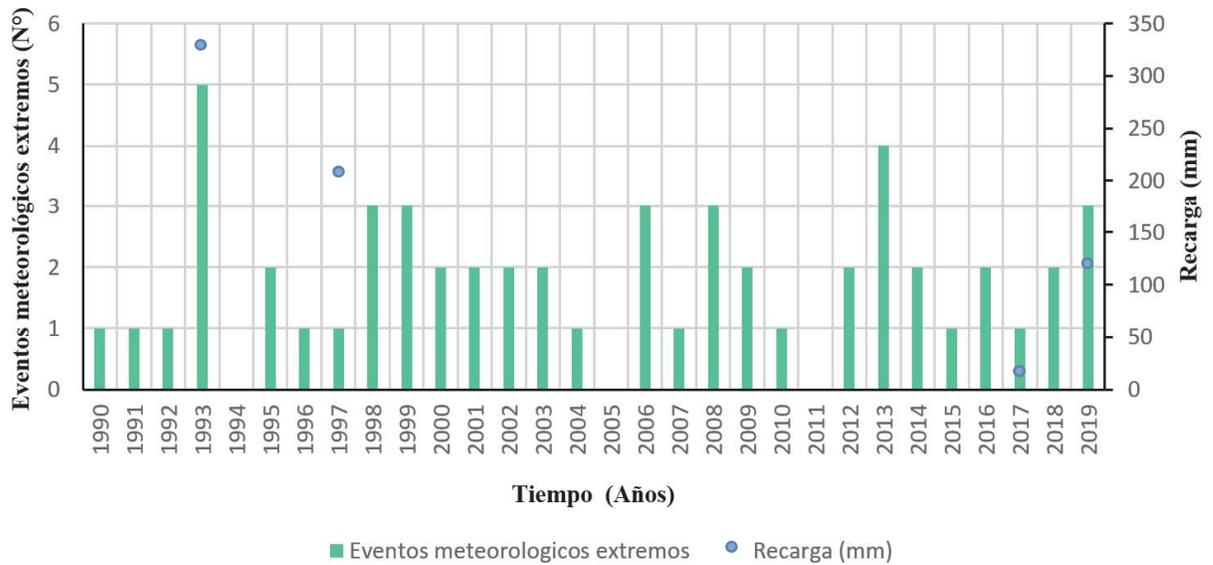


Figura 5.23 Eventos meteorológico extremos registrados por año vs recarga genera por el impacto de eventos meteorológicos (Fuente: Elaboración propia).

La variabilidad climática en el área de estudio influye de manera directa en la recarga de agua subterránea. Se diferencia al año 2017 como un año en que las condiciones no fueron las más favorables para que se generara recarga estando muy por debajo en comparación con los otros 3 años. Se diferencia también el año 1997 en el cual solo se registró un evento ciclónico, pero en cambio tuvo lugar un gran aporte de recarga con respecto a otros años.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El objetivo de la presente investigación fue realizar la estimación de la recarga potencial de agua subterránea considerando la variabilidad climática como un factor alterador del sistema en el acuífero San José del Cabo. El trabajo se enfocó en mostrar el comportamiento de la recarga potencial de un acuífero con clima árido-semiárido, relacionando este proceso de recarga con la ocurrencia de eventos de precipitación vinculados a fenómenos meteorológicos extremos.

El enfoque establecido para la obtención de la recarga potencial de agua subterránea implicó el análisis de características físicas de la zona de estudio, así como de los procesos de recarga, lo cual permitió seleccionar el método más apropiado, siendo este el método de balance de humedad del suelo.

Debido al objetivo del trabajo de investigación se buscó demostrar el comportamiento de la variabilidad climática que se manifiesta a través de variables naturales como la precipitación y temperatura, prestando una especial atención a la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, como huracanes, tormentas tropicales y depresiones tropicales, identificándose aquellos que tenían efecto sobre el acuífero para la temporalidad de treinta años (1990 a 2019), y seleccionando determinados años con valores de precipitación diferentes y que contaran con un alto o bajo número de ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. Por tanto, se seleccionaron los años de 1993, 1997, 2017 y 2019.

Los análisis de variabilidad climática para los 30 años establecidos (1990-2019) con base en los datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, y empleando el Test de Mann-Kendall demostró una disminución en la lluvia sobre el área de estudio, y para el caso de la temperatura tanto máxima como mínima demostró un aumento, aunque no se identificó como significativo.

Adicionalmente, se efectuó un análisis de cambio de uso de suelo y vegetación con base en el procesamiento de imágenes satelitales y el método de clasificación supervisada. Para la temporalidad de 23 años (1995 y 2017), se seleccionaron como un representativo de 2 años en concreto, ya que al existir poca distancia temporal entre pares de años (1993-1997 y 2017-2019), los cambios ocupacionales podrían ser comparables.

Con este análisis de cambio de uso de suelo, se apreció que el uso agrícola es aquel que mayores cambios presentó pasando de una superficie ocupada del 1.88% con respecto al total del área del acuífero a un 4.09%, caso contrario al suelo desnudo que cubría un 6.66% del área y disminuyó a 4.03%, y en menor proporción los demás usos de suelo.

Con todos los insumos necesarios se procedió a la estimación de la recarga potencial a nivel mensual ya que las temporadas (meses) y volumen de precipitación son muy desiguales meses y años. Una vez obtenidos los resultados se pudo comprobar la importancia de los eventos meteorológicos extremos en el comportamiento de la recarga del acuífero ya que en estos periodos la recarga fue mayor.

En el año 1993 la precipitación registrada fue de 871.88 hm³/año con 5 eventos ciclónicos y se estimó una recarga de 381.39 hm³/año, en 1997 la precipitación fue de 511.10 hm³/año con registro de un evento ciclónico y 267.05 hm³/año de recarga, para el 2017 se presentaron 93.42 hm³/año de precipitación que supuso 21.30 hm³/año de recarga y, finalmente, el año 2019 con un volumen de precipitación de 320.72 hm³/año con 3 eventos ciclónicos, y un volumen de 149.91 hm³/año de recarga.

El estudio del comportamiento de la recarga potencial es crucial a la hora de gestionar la explotación del acuífero, ya que es la única fuente de abastecimiento en la región, además de ser una de las regiones que presenta mayor escasez de agua del país.

Recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos de la investigación y todo lo que esta implicó, se sugieren las siguientes recomendaciones las cuales deberían ser consideradas para esta zona de estudio, así como para otras zonas de similares características.

- Contemplar como paso inicial de cualquier estudio de recarga de acuíferos la definición del modelo conceptual.
- Se propone la aplicación de la metodología de esta investigación en otros acuíferos con el objetivo de evaluar el comportamiento de la recarga a nivel mensual y los efectos de los eventos ciclónicos en la recarga de un acuífero.
- Mejorar el sistema de consulta de datos históricos sobre eventos ciclónicos, así como la obtención de los mismos.
- Formalizar una base de datos de información de niveles piezométricos del acuífero, ya que estos serían de utilidad para analizar la evolución de estos y comprobar el efecto de la recarga real.
- Promover la investigación de temas similares con el propósito de desarrollar métodos aplicables de mayor certeza en la estimación de recarga disminuyendo la incertidumbre.
- Profundizar en temas de variabilidad climática para estudios futuros, pudiendo permitir análisis que den respuesta a dificultades presentes por la administración de agua subterránea.
- Desarrollar y formalizar un sistema de consulta de investigaciones anteriores por parte de dependencias gubernamentales, instituciones públicas y privadas, con el propósito de considerar información.
- Trabajar en manera conjunta con dependencias gubernamentales e instituciones académicas para la obtención de información y estudios apropiados que faciliten la gestión de recursos hídricos.
- Al ser un acuífero que se encuentra en un ambiente árido-semiárido deberá contemplarse introducir técnicas de recarga artificial que hagan posible la conservación de las condiciones del acuífero.

REFERENCIAS

- Alcalá, J. y Custodio, E. (2012).** *Evaluación de la recarga a los acuíferos mediante balance de masa de cloruro atmosférico y su incertidumbre en el territorio continental Español. 7° Asamblea Hispano-Portuguesa de geodesia y geofísica.* Donostia.
- Alanís, G. (2011).** *Los fenómenos meteorológicos extremos.* Efecto de las bajas temperaturas en la vegetación arbórea del área metropolitana de Monterrey. Ciencia UANL. Vol.14:2. 115-120 p. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México.
- Ángeles, V., Fernández, V., Bá, K. and Díaz, C. (2002).** Elementos básicos de riesgo presurizado para productores; Microirrigación.
- Balek, J. (1988).** *Groundwater recharge concept. Estimation of Natural Groundwater Recharge.* Boston: Ed. Reidel. NATO ASI Series.
- Breña, F. y Jacobo, M. (2006).** *Fundamentos de la hidrología superficial.* Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México.
- Breña, I. (2016).** *Estimación de la recarga en cuencas tropicales húmedas.* Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. Tesis de Maestría.
- Camarena, J. (2015).** *Cartografía escala 1:10,000, características megascópicas y microscópicas de las rocas que afloran en el arroyo El Mezquite, Baja California Sur, México y su relación con la geología regional.* Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, Baja California Sur, México. Tesis de Licenciatura.
- Campos, A. (1998).** *Procesos del ciclo hidrológico.* San Luis Potosí, México: Ed. Universitaria Potosina.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (1998).** *Portal de Geoinformación 2020: Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB).* En sitio: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2018).** *Uso de selo y vegetación, escala 1:250000 serie I.* En sitio: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016).** *Normas Oficiales Mexicanas (NOM).* En sitio: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-nom-83264>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2018).** *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San José del Cabo (0319), Estado de Baja California Sur.*

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2020).** *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San José del Cabo (0319), Estado de Baja California Sur.*
- Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2015).** *Proyecciones de la población de México y de las entidades federativas 2016-2050.* Baja California Sur. Gobierno de México.
- Cruz, A., Ramírez, J., Vázquez, R., Nava, E., Troyo, E. y Fraga, H. (2013).** *Estimación de la recarga y balance hidrológico del acuífero La Paz, Baja California Sur, México.* Scielo. Vol. 29:1. 87-100 p. Universidad y Ciencia.
- Custodio, E. y Llamas, M. (1983).** *Hidrología subterránea.* Omega: España.
- Custodio, E., Llamas, M. y Sauquillo, A. (2000).** *Retos de la hidrología subterránea-Ingeniería del Agua.* Vol. 7(1).
- Daily Surface Weather and Climatological Summaries (Daymet) (2021).** *Daymet: Monthly Climate Summaries on a 1-km Grid for North America, Version 3 (Superseded by Version 4):* Daymet THREDDS Data Server.
- Del Pilar, M., Hernández, M., Trovatto, M. y González, N. (2013).** *Estimación de la recarga en zonas áridas según distintos métodos. Área medanosa el Sur de la Península Valdés: Agua subterránea recurso estratégico,* Tomo 1. Ed. Edulp. 15-22 p. La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Díaz, C., Esteller, M. y López-Vera, F. (2005).** *Recursos Hídricos: Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica.* Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración de Agua, Centro Interamericano de Recursos de Agua: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Estado de México. Toluca, México.
- DOF (2015).** *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales:* Diario Oficial de la Federación.
- DOF (2018).** *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente:* Diario Oficial de la Federación. Cámara de Diputados.
- DOF (2020).** *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos:* Diario Oficial de la Federación. Cámara de Diputados.
- Earth Explorer USGS.** *Imágenes SRTM 1 Arc Second Global.* En sitio: <https://earthexplorer.usgs.gov>. Obtenida 23/09/2014
- Forchheimer, P. (1930).** *Hydraulik,* 3rd edn. Berlin: B. G. Teubner.
- Fletcher, J. y Munguía, L. (2000).** *Active continental rifting in southern Baja California, México; implications for plate motion partitioning and the transition to seafloor spreading in the Gulf of California: Tectonics,*

Vol. 19:6, 1107-1123 p. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental (FEA), CEMDA y Presencia Ciudadana Mexicana. (2006). *Agua en México: lo que todos y todas debemos de saber.* Ciudad de México.

García, E. (1998). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.* Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.

Google Earth Pro (2020). Imagen Landsat/Copernicus.

Greenpeace (2014). México ante el cambio climático. México.

Gregorio, J. (2017). *Secciones Geológicas en RecMin; Mine Engineering Superintendent at CVG Ferrominera Orinoco C.A.: Venezuela.*

Hantush, M. (1956). *Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers.* Trans Am Geophys Union vol 37, no 6.

Healy, R. (2010). *Estimating Groundwater Recharge.* EU. Ed. Cambridge University Press.

Healy, R. y Ronan, A. (1996). *Documentation of computer program VS2DH for simulation of energy transport in variably saturated porous media—modification of the US Geological Survey's computer program VS2DT.* US Geol Surv Water-Resour Invest Report.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (1997). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie I (continuo nacional) en escala 1:50000: Catálogo de metadatos geográficos.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. En sitio. En sitio: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (1998). *Carta Topográfica 1:50000 San José del Cabo F12-B44.* México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2001). *Localidades de la República Mexicana, 1995 en escala 1:50000: Catálogo de metadatos geográficos.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. En sitio. En sitio: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2002). *Carta Topográfica 1:50000 Cabo Pulmo F12-B35.* México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010). *Red hidrográfica, subcuencas hidrográficas de México en escala 1:50000: Catálogo de metadatos geográficos.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. En sitio: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2014).** *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional) en escala 1:50000*: Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. En sitio: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2018).** *Aspectos geográficos. Baja California Sur.* México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2019).** *División política municipal, 1:250000 en escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional) en escala 1:50,000*: Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. En sitio: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2020).** *Censo de población y vivienda 2020.* En sitio: inegi.org.mx
- Jaramillo, D. (2002).** *Movimiento de agua en el suelo*: Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia.
- Lerner, D., Issar, A. y Simmers, I. (1990).** *Groundwater recharge: A guide to understanding the natural recharge.* 345p.
- Llasat, M. (2008).** *Meteorología e hidrología*: Modulo 3, Los recursos hídricos. EOI Escuela de negocios.
- Marín, G. (2017).** *Recursos hídricos: Ingeniería sin fronteras.*
- Martínez, G. y Díaz, J. (2011).** *Morfometría en la cuenca hidrológica de San José del Cabo, Baja California Sur, México.* Revista Geológica de América Central. Vol. 1:44. 83-100 p. Departamento Académico de Geología y Marina. UABCS.
- Martínez-Gutiérrez, G. y Sethi, P. (1997).** *Miocene-Pleistocene sediments within the San José del Cabo Basin, Baja California Sur, México.* Geological Society of America. Vol. 218, 141-166 p.
- Maxey, G. y Eakin, T. (1949).** *Groundwater in White River Valley, White Pine, Nye, and Lincoln Counties, Nevada.* Nevada State. Engineer Water Resources Bulletin 8.
- Meinzer, O. (1923).** *The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles.* US Geol Surv Water-Supply Pap 489, 321 p.
- Montealegre, J. y Pabon, J. (2000).** *La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia.* Meteorología Colombiana. Vol. 1:2. . 7-21 p. Bogotá, Colombia

- National Academy of Sciences; The Royal Society (2014).** *Climate Change: Evidence and Causes: Set of 5 Booklets*. En sitio: http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=18730
- Oh, J., Kim, H. y Seo, B. (2006).** *Análisis de tendencia lineal y movimiento medio para datos hidrológicos y climáticos*: Obras de agua. 355-362 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2006).** *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*: Estudio FAO Riesgo y Drenaje. No. 56. Roma.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2008).** *Base referencial mundial del recurso suelo: Un marco conceptual para la clasificación, correlación y comunicación internacional*. Roma.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (2020).** *Informe Mundial de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*. Francia.
- Organización de los Estados de América (OAS) (2001).** *Variabilidad climática*. En sitio: <http://www.oas.org/sanjuan/spanish/documentos/dialogo/dialogo/01-characterization/05-Climate.html>
- Ostendorf, D., Rees, P., Kelley, S. and Lutenecker, A. (2004).** *Steady, annual, and monthly recharge implied by deep unconfined aquifer flow*. *J. Hydrology.*, Vol. 290, 259–274 p.
- Pabon, D. (1998).** *Colombia en el ambiente global*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. El Medio Ambiente en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia. 18-37 p.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). (2012).** *Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático: resumen para responsables de políticas*.
- Pérez-Venzor, J. (2013).** *Estudio Geológico-Geoquímico del borde oriental del bloque Los Cabos Baja California Sur, México*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Tesis de doctorado. En sitio: <http://132.248.9.195/ptd2013/febrero/0688412/Index.html>.
- Poehls, D. y Smith, G. (2009).** *Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology*. Ed. Elsevier.
- Puertas, O., Carvajal, Y. y Quintero, M. (2011).** *Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca Alta-Media del Río Cauca, Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín: Colombia. Dyna, vol. 78, núm. 169, pp. 112-120.
- Rodríguez, R., Benito, A. y Portela, A. (2004).** *Meteorología y climatología: Semana de ciencia y tecnología 2004*. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.

- Ríos, D., Ceppi, C., Melendez, K. y Molero, J. (2013).** *Cambio climático, Fenómenos meteorológicos extremos y análisis de riego.* Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas Física Natural. Vol. 106:1-2. 147-156 p.
- Rivas, R. (2017).** *Análisis estadístico de hidrógrafos para estimar la recarga de agua subterránea donde se ubica el proyecto piloto de recarga en Chihuahua, Chihuahua, México.* Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Sánchez, J. (2017).** Hidrología superficial y subterránea. Ed. Createspace Independent Pub.
- Sánchez, J. (2019).** Estimación espacio-temporal de la recarga de agua subterránea mediante métodos de balance hídrico en el Acuífero del Valle de Toluca. CIRA. UAEMéx.
- Scanlon, B., Healy, R. y Cook, P. (2002).** *Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge.* Hydrogeology Journal, No.10. 18-39 p.
- Scanlon, B., Mukherjee, A., Gates, J., Reedy, R. y Sinha, A. (2010).** *Recarga de agua subterránea en sistemas de dunas naturales y ecosistemas agrícolas en la región del desierto de Thar, Rajasthan, India.* Hydrogeology Journal, Vol. 18:4. 959–972 p.
- Schosinsky, G. (2006).** *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.* Revista Geológica de América Central. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 13-30 p.
- Schulz, C. y García, R. (2015).** *Balance Hídrico y Recarga de Acuíferos.* Universidad Nacional de la Pampa. Argentina.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) (2013).** *Atlas de riesgos naturales del Municipio de Los Cabos, Baja California Sur 2013.* México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010).** *Atlas Geográfico de Medio Ambiente y Recursos Naturales.*
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2000).** *Carta Geológico-Minera. El Rosario F12-B23.* México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2001).** *Carta Geológico-Minera. Todos los Santo F12-B33.* México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2002).** *Carta Geológico-Minera. San José del Cabo F12-2-3-5-6.* México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2003).** *Carta Geológico-Minera. Cabo Pulmo F12-B35.* México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2008).** *Carta Geológico-Minera. San José del Cabo F12-B44.* México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2018).** *Carta Geológico-Minera. Cabo San Lucas F12-B54.* México.

- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2019).** *Carta Geológico-Minera. La Candelaria F12-B43.* México.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2019).** *Carta Geológico-Minera. Boca de San Cristóbal F12-B53.* México.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2017).** *Ciclones tropicales: Información histórica.* En sitio: <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2020).** *Ciclones tropicales: Información histórica.* En sitio: <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- Solís, A., Sosa, J., Jiménez, C. y Ortega, A. (2015).** *La Sierra La Laguna en Baja California Sur: Importancia de su Conservación: Las áreas naturales protegidas y la investigación científica de México.* Centro de Investigación Biológicas del Noroeste, S. C. Universidad Autónoma de Yucatán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Su, N. (1994).** *A formula for computation of timevarying recharge of groundwater.* *J. Hydrology.*, 160, 123–135 p.
- Towards data science (2018).** *Linear Regression-Detailed View.* En sitio: <https://towardsdatascience.com/linear-regression-detailed-view-ea73175f6e86>
- Trasviña, J. (2017).** *Modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca San José del Cabo, B.C.S., utilizando el software Modflow.* Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- TREND (2005).** Manual model stadistics Test.
- United States Geological Server (USGS) (2014).** *Digital Elevation Model.*
- United States Geological Server (USGS) (2019).** El ciclo del agua. En sitio: <https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-del-agua-water-cycle>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2019).** *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019.*
- Universidad Autónoma de Baja California Sur, CiB, CICESE, SEMARNAT, CONACYT y Estado de Baja California Sur. (2012).** *Plan Estatal de acción ante el Cambio Climático para Baja California Sur.*
- Vélez, M. (2010).** *Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos.* Grupo de Recurso Hídrico – Dirección de Ecosistemas Programa de Inversión para el Desarrollo Sostenible – IDS- (BIRF). Medellín, Colombia. 84 p.
- Vélez, M. (2019).** *Métodos para determinar la recarga en acuíferos.* Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Medellín.

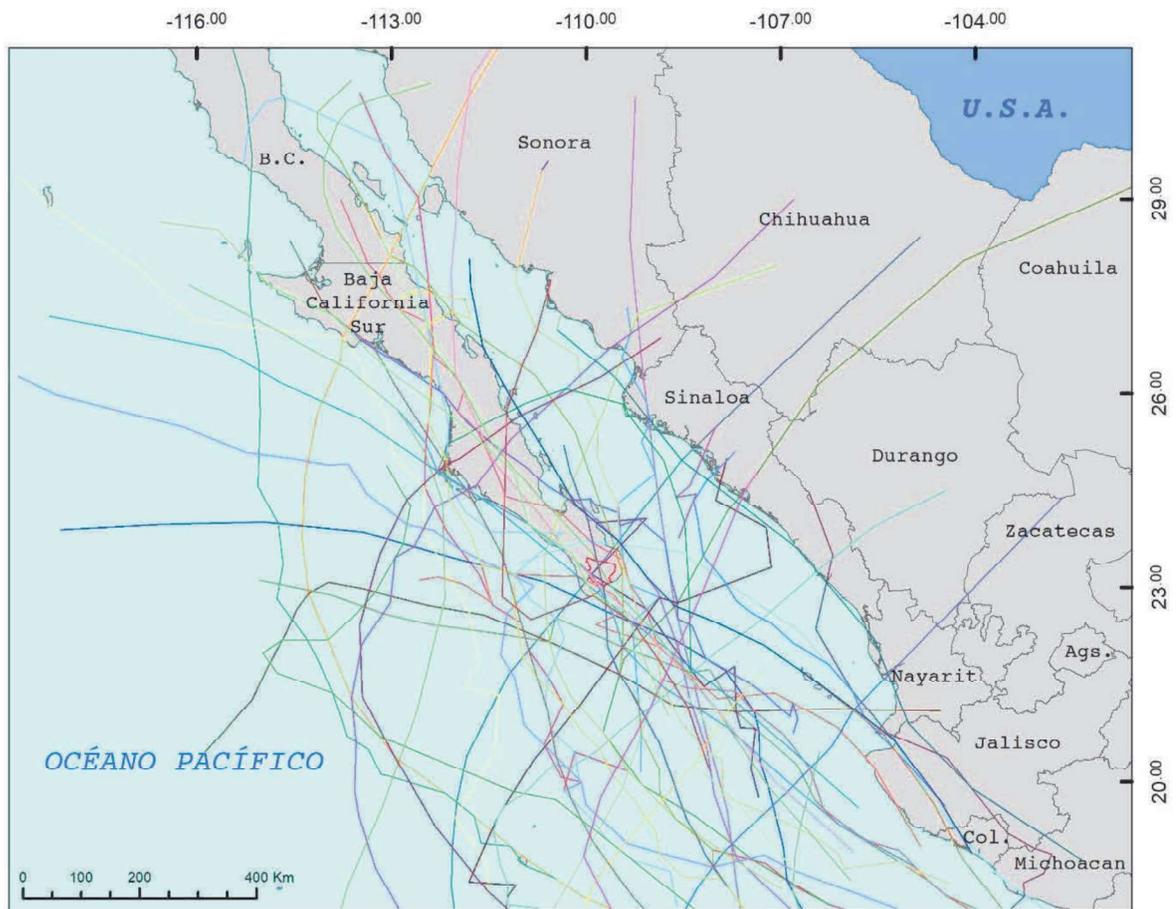
- Valle, A. y Zaragoza, H. (2019).** *La recarga de acuíferos. Análisis de su estimación de acuerdo con la información disponible, el caso del acuífero del Valle de San Juan del Río, Querétaro.* Toluca, México. Universidad Autónoma del Estado de México. Tesis de licenciatura.
- Villalobos, A. (1996).** *Modelación inversa para la estimación de la recarga en acuíferos.* UNAM.
- Weather Spark (2020).** *El clima promedio de San José del Cabo, B.C.S. México.* En sitio: <https://es.weatherspark.com/y/2920/Clima-promedio-en-San-Jos%C3%A9-del-Cabo-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Wult, J., Imaz, L., Hernández, P. y Solís, A. (2018).** *El Acuífero San José del Cabo, B. C. S. Problemas y perspectivas: Manejo para la cuenca hidrológica-forestal San José del Cabo, B. C. S.* UABCS.

ANEXOS

Anexo 1. Trabajos de estimación de recarga en México y temas a fines.

Trabajo de investigación	Autor	Institución
Modelación inversa para la estimación de la recarga en acuíferos.	Villalobos, A. (1996)	UNAM
Nom_011_CONAGUA_2015.	CONAGUA (2015)	CONAGUA
Estimación de la recarga en cuencas tropicales húmedas.	Breña, I. (2016)	UNAM
Estimación espacio-temporal de la recarga de agua subterránea mediante métodos de balance hídrico en el Acuífero del Valle de Toluca	Sánchez, J. (2019)	UAEM
Cuantificación de la recarga regional bajo cambios temporales del uso de suelo por deforestación e incremento de la superficie urbana	Pacheco, K. (2012)	UAEM
Identificación de Áreas Prioritarias para la recarga artificial en el acuífero del Valle de Toluca	Martínez, J. (2016)	UAEM
Trazadores ambientales para detectar el impacto urbano en la recarga de agua subterránea	Barrera, M., Garfías, J., Martel, R., Salas-García, J. (2020)	IITCA
Análisis de las zonas de recarga de acuíferos mediante la percepción remota: aplicación a la cuenca de Almoloya del Río	Diez, J. (1998)	UAEM
Análisis estadístico de hidrógrafos para estimar la recarga de agua subterránea donde se ubica el proyecto piloto de recarga en Chihuahua, Chihuahua. México.	Rivas, R. (2017)	UAChihuahua
Precipitación y recarga en la cuenca de La Paz, BCS, México	Cruz, A. (2011)	IPN
Evaluación de la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación	Guerrero, L. (2016)	UAAguascalientes
Revisión y análisis de los factores que influyen en la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante sistemas de información geográfica (SIG)	Rodríguez, L. (2016)	UAAguascalientes

Anexo 2. Mapa de trayectoria de eventos ciclónicos con influencia en el ASJC.



SIMBOLOGÍA

-  Trayectoria de eventos ciclónicos
-  Área de estudio
-  Límites estatales