

E

ANEXO 8.

- Apéndices técnicos
- Hidrología
- Aptitud de sitios de disposición final
- Geología/estratigrafía

REGIÓN SIERRA OCCIDENTAL

Octubre 2023

Contenido

Hidrología.....	3
Introducción.....	3
Área de estudio hidrológico.....	3
Microcuencas y subcuencas modeladas.....	4
Precipitación.....	7
Calidad del agua.....	10
Contaminación por agroquímicos.....	10
Vulnerabilidad de agua subterránea.....	11
Agua subterránea.....	15
Zonas con mayor potencial de recarga de agua subterránea.....	15
Estimación de recarga.....	17
Balance hidrológico.....	20
Superficial.....	20
Subterráneo.....	28
Bibliografía.....	30
Aptitud de sitios de disposición final de residuos.....	33
Geología/estratigrafía.....	34
Introducción.....	34
Métodos y resultados.....	34
Bibliografía.....	37
Referencias de la columna y de tipos de rocas y relaciones.....	37

Hidrología

Introducción

Los análisis hidrológicos están enfocados en obtener la cantidad de agua superficial y subterránea disponible en la zona de estudio. La caracterización hidrológica se basa en regiones hidrológico-administrativas, sus cuencas, subcuencas, microcuencas y acuíferos.

De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, en su artículo 3, una cuenca hidrológica se define como:

“La unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas o divisoria de las aguas -aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad-, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas.”

Área de estudio hidrológico

Las cuencas hidrográficas son unidades ambientales que engloban varios recursos que dependen de los flujos naturales del agua. El área de estudio hidrológico se definió como las cuencas dentro de las cuales se encuentra enmarcada la Región Sierra Occidental. De acuerdo con la delimitación de regiones hidrológicas de la Comisión Nacional del Agua, el área de estudio hidrológico se encuentra ubicada en cuatro regiones: Región Hidrológica 13 Huicicila, Región Hidrológica 14 Ameca, Región Hidrológica 15 Costa de Jalisco y Región Hidrológica 16 Armería - Coahuayana.

Comprende seis cuencas hidrológicas: Río Cuale - Pitillal, Río Ameca - Atenguillo, Río Ameca - Ixtapa, Río Tomatlán - Tecuán, Río San Nicolás - Cuitzmala y Río Armería. A su vez, estas cuencas se dividen en once subcuencas, mismas que se muestran en la Tabla 1. El área de estudio hidrológico se encuentra ubicado casi en su totalidad en el estado de Jalisco con 1,590,056 hectáreas, mientras que una porción al norte de la región se ubica en el estado de Nayarit, con una extensión de 182,228 hectáreas.



Gráfico 1. Área de estudio hidrológico. Fuente: elaboración propia con datos hidrográficos del INEGI (2010).

Tabla 1. Cuencas y subcuencas en el área de estudio. Fuente: elaboración propia con datos hidrográficos del INEGI (2010).

Cuenca	Subcuenca	Superficie (hectáreas)	Porcentaje (%) de la superficie de la subcuenca dentro del área de estudio
R. Cuale - Pitillal (RH13A)	R. Tecomala (RH13Aa)	75,879	12%
	R. Cuale (RH13Ab)	30,633	39%
	R. Pitillal (RH13Ac)	42,386	41%
R. Ameca - Atenguillo (RH14B)	R. Atenguillo (RH14Ba)	184,870	88%
	R. Ameca - Pijinto (RHBb)	255,165	33%
R. Ameca - Ixtapa (RH14C)	R. Talpa (RH14Ca)	60,101	100%
	R. Mascota (RH14Cb)	151,940	78%
	R. Ameca - Ixtapa (RH14Cc)	232,273	40%
R. Tomatlán - Tecuán (RH15C)	R. Tomatlán (RHCa)	235,614	29%
R. San Nicolás - Cuitzmala (RH15B)	R. San Nicolás (RHBb)	278,271	8%
R. Armería (RH16B)	R. Ayuquila (RH16Bc)	364,851	1%

Microcuencas y subcuencas modeladas

La microcuenca es la unidad mínima del territorio que permite implementar el enfoque de cuenca y orienta la planeación territorial hacia la conservación del agua.

Con el fin de obtener un modelo hidrológico con mayor detalle, se comenzó por delimitar las microcuencas del área de estudio utilizando datos de la mejor resolución espacial posible. Para ello se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) de corrección

radiométrica publicado por el Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center (2015) con resolución de 12.5 metros por píxel. Asimismo, se utilizó la red hidrográfica 1:50,000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010).

El primer paso para desarrollar este análisis es ajustar el MDE con la red hidrográfica para imponer el curso de los escurrimientos sobre el terreno. Esta metodología, llamada “AGREE”, fue desarrollada en la Universidad de Texas (Hellweger, 1997).

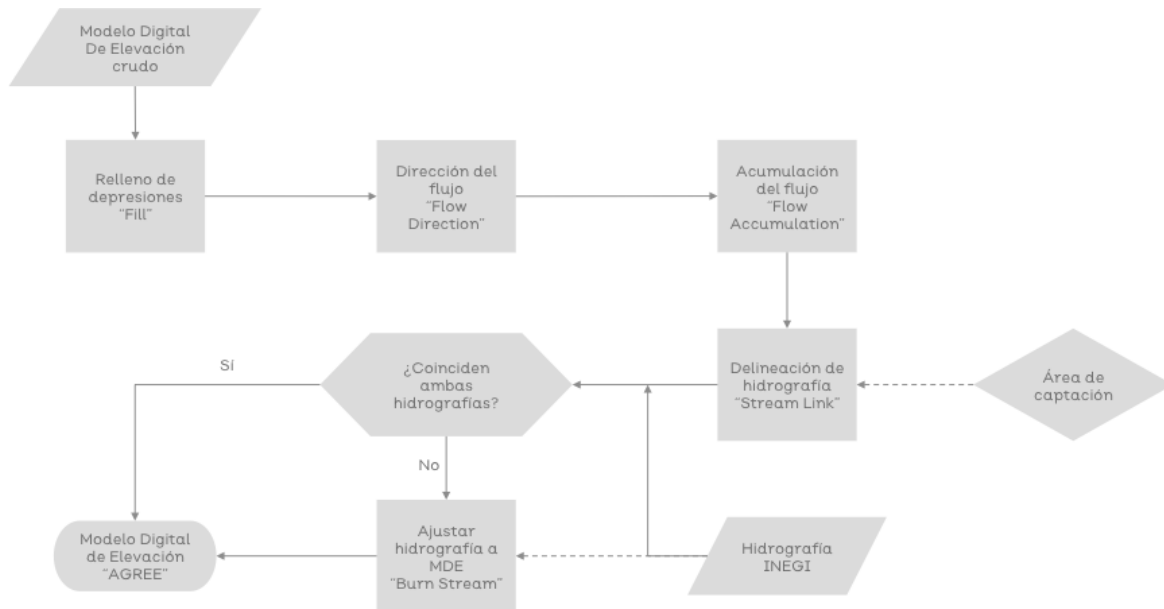


Gráfico 2. Procedimiento para desarrollar un modelo digital de elevación “AGREE”. Fuente: Metodología AGREE (1997).

El producto de este proceso es un MDE “AGREE”, que coincide en su mayoría con la red hidrográfica digitalizada por el INEGI (2010). Esta capa es el insumo principal para la delimitación de microcuencas, que se describe en el siguiente gráfico.

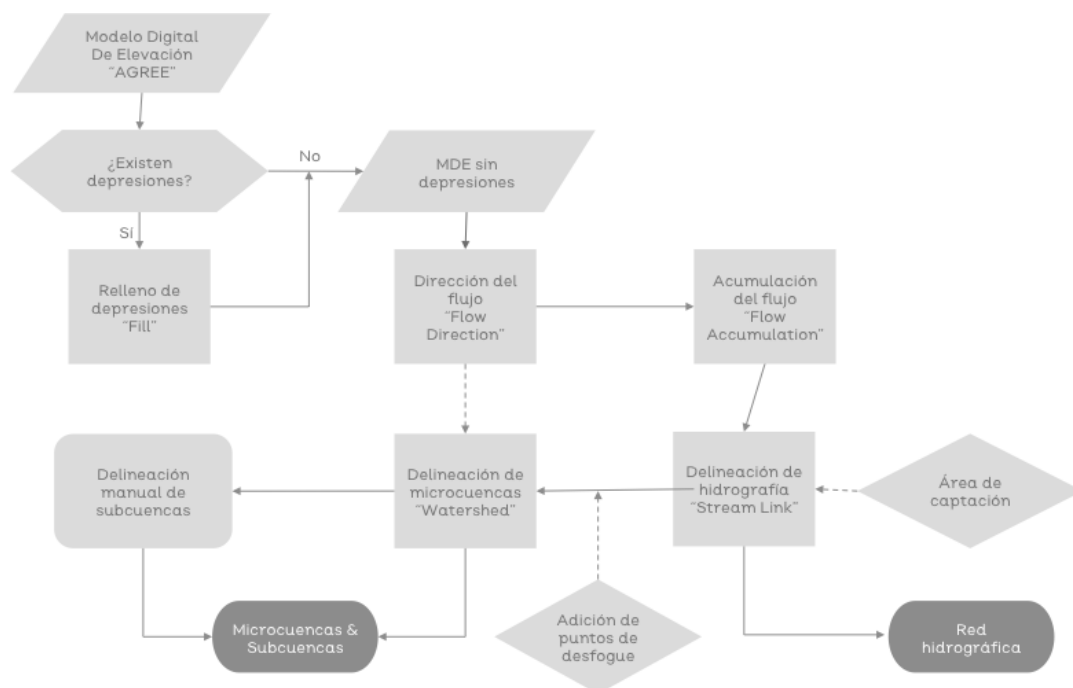


Gráfico 3. Proceso para la elaboración de microcuencas, subcuencas y red hidrográfica.
 Procedimiento para desarrollar un modelo digital de elevación "AGREE". Fuente: Metodología
 AGREE (1997).

El único parámetro que se utilizó para la delimitación de microcuencas fue la definición del área de captación, con una extensión de 45 km². Como resultado se obtuvieron 206 microcuencas dentro de las 11 subcuencas en el área de estudio. La delimitación de las subcuencas y microcuencas se muestra en el gráfico siguiente, así como su superficie en hectáreas.

Asimismo, con los datos del MDE y la delimitación de microcuencas, se obtuvo una red hidrográfica escala 1:5,000 que se corrigió con las imágenes satelitales más recientes de Google Earth.

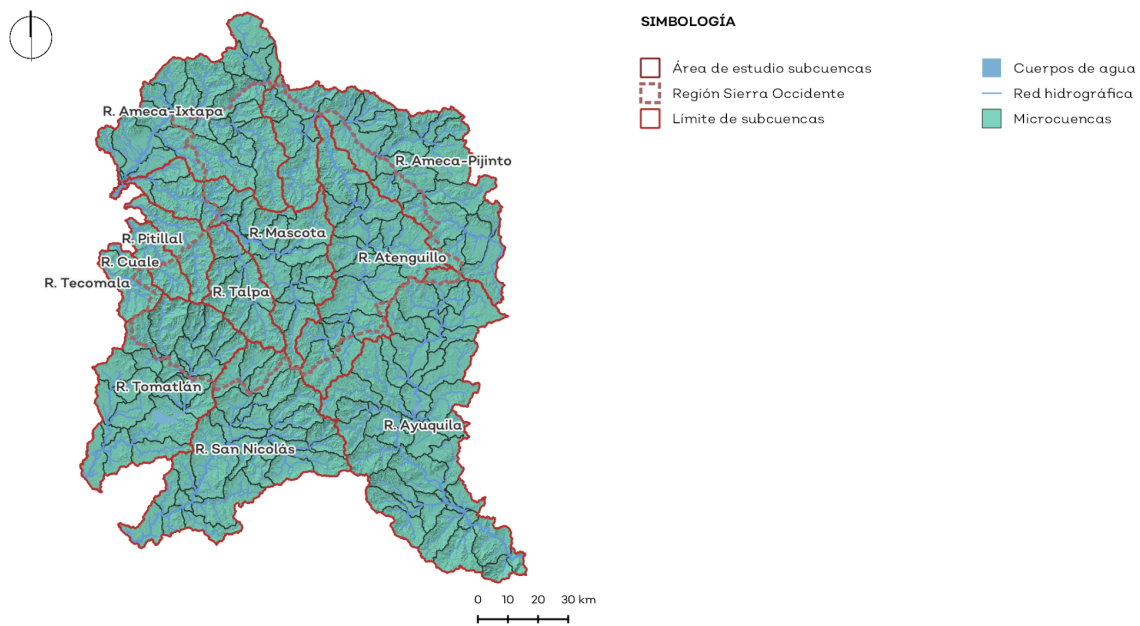


Gráfico 4. Subcuencas y microcuencas modeladas. Fuente: Elaboración propia con Datos de Red hidrográfica 1:50,000 del INEGI, 2010 y el Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR de 12.5m de resolución de las Instalaciones Satelitales de Alaska, NASA, 2015.

Tabla 2. Subcuencas y microcuencas modeladas. Fuente: Elaboración propia con Datos de Red hidrográfica 1:50,000 del INEGI, 2010 y el Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR de 12.5m de resolución de las Instalaciones Satelitales de Alaska, NASA, 2015.

Subcuenca	Área (hectáreas)	Número de microcuencas
R. Ameca-Ixtapa	220,814	25
R. Ameca-Pijinto	259,085	24
R. Atenguillo	187,831	19
R. Ayuquila	363,426	47
R. Cuale	27,084	1
R. Mascota	153,496	24
R. Pitillal	37,594	1
R. San Nicolás	236,851	31
R. Talpa	59,961	7

Subcuenca	Área (hectáreas)	Número de microcuencas
R. Tecomala	28,692	2
R. Tomatlán	197,450	25
Total	1'772,286	206

Precipitación

Con el objetivo de obtener una distribución precisa de la precipitación media anual en el área de estudio hidrológico, se realizó un análisis a partir de la selección espacial de las estaciones presentes en el área y aquellas ubicadas en un radio externo de 20 kilómetros. Se utilizaron datos históricos de las estaciones climáticas de CLICOM . Se seleccionaron datos de 1960 - 2019 y se realizaron análisis estadísticos de los datos de las estaciones para obtener las medias anuales y mensuales por estación.

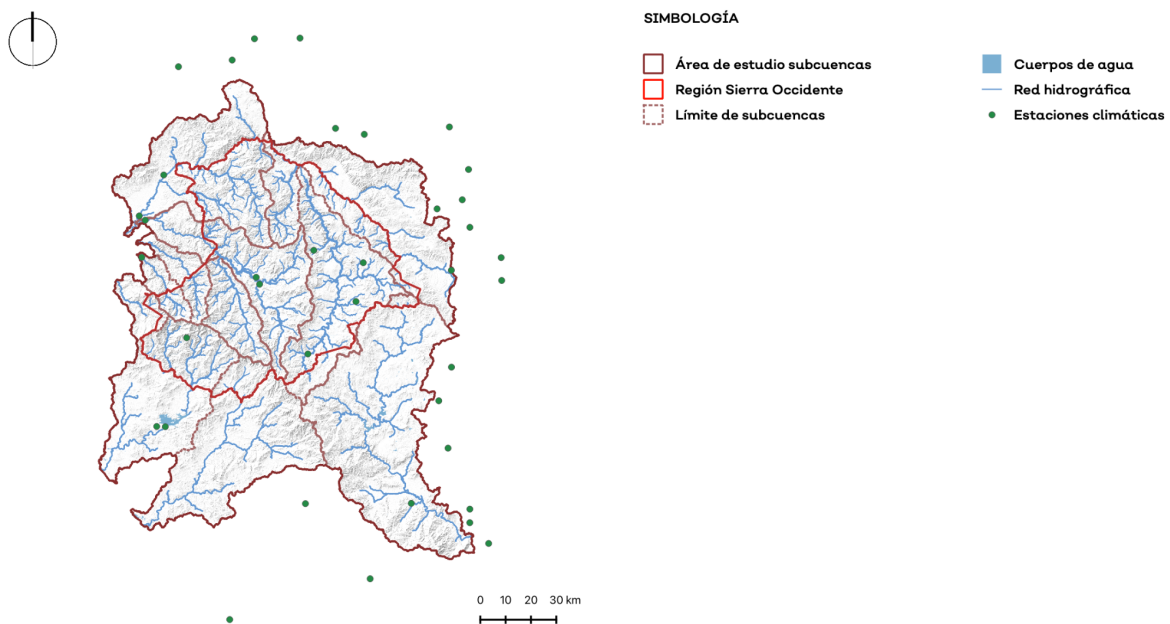


Gráfico 5. Ubicación de las estaciones climáticas del Sistema Meteorológico Nacional seleccionadas para el análisis de precipitación media anual. Fuente: Elaboración propia con base en datos de precipitación de las estaciones de CLICOM (SMN).

Tabla 3. Estaciones, coordenadas, ubicación, estatus, cobertura de datos y precipitación anual promedio (mm) de las estaciones climáticas utilizadas. Fuente: Elaboración propia con base en datos de precipitación de las estaciones de CLICOM (SMN).

Estación	X (m)	Y (m)	Estado	Estatus	Cobertura de datos (1960 - 2020)	Precipitación anual promedio (mm)
C14009	599322	2272393	Jalisco	Operando	94%	832
C14011	511819	2134734	Jalisco	Operando	44%	913
C14024	486401	2210745	Jalisco	Operando	89%	1281
C14035	523607	2266896	Jalisco	Operando	92%	1200
C14036	567262	2150812	Jalisco	Operando	98%	1715
C14044	494811	2245787	Jalisco	Operando	94%	2047

Estación	X (m)	Y (m)	Estado	Estatus	Cobertura de datos (1960 - 2020)	Precipitación anual promedio (mm)
C14046	583488	2180538	Jalisco	Operando	77%	892
C14056	619190	2268369	Jalisco	Operando	89%	889
C14063	593683	2296589	Jalisco	Operando	62%	1087
C14067	483001	2210848	Jalisco	Operando	93%	688
C14068	598552	2328871	Jalisco	Operando	92%	860
C14078	594359	2220955	Jalisco	Operando	93%	680
C14081	478479	2292125	Jalisco	Operando	93%	1080
C14089	618981	2277378	Jalisco	Operando	96%	918
C14093	606109	2312126	Jalisco	Operando	94%	886
C14096	522269	2269627	Jalisco	Operando	98%	1038
C14117	541717	2180424	Jalisco	Operando	82%	1553
C14125	545000	2280241	Jalisco	Operando	94%	1314
C14143	599365	2234208	Jalisco	Operando	92%	834
C14155	606611	2178260	Jalisco	Operando	93%	706
C14195	603634	2300178	Jalisco	Operando	77%	1034
C14269	606628	2289316	Jalisco	Suspendida	67%	866
C14297	564554	2275357	Jalisco	Suspendida	54%	975
C14311	614035	2164726	Jalisco	Suspendida	64%	511
C14317	561660	2260074	Jalisco	Suspendida	51%	1007
C14339	477075	2277497	Jalisco	Suspendida	64%	1711
C14343	598009	2202282	Jalisco	Suspendida	63%	721
C14349	542674	2239410	Jalisco	Suspendida	63%	1025
C14350	606591	2172914	Jalisco	Suspendida	64%	653
C18002	553587	2328321	Nayarit	Suspendida	87%	916
C18005	539569	2363887	Nayarit	Suspendida	84%	1231
C18016	564942	2325960	Nayarit	Suspendida	87%	963
C18021	485783	2309947	Nayarit	Suspendida	84%	1587
C18023	512789	2355233	Nayarit	Suspendida	83%	1245
C18025	491587	2352618	Nayarit	Suspendida	80%	1664
C18030	476118	2293822	Nayarit	Suspendida	72%	1083
C18079	521594	2363632	Nayarit	Suspendida	52%	1403

El análisis estadístico constó de pruebas de correlación de tipo Pearson. Se incluyeron las variables: altitud, latitud, precipitación media anual, temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, orientación de ladera y pendiente geográfica. Se identificó que las variables con los valores de correlación más altos fueron la altitud, la latitud y la temperatura media. Para generar un mapa de distribución preciso, se utilizó una interpolación polinómica local con un mayor peso asignado a la altitud debido a su fuerte correlación con los datos.

Mediante este análisis espacial se determinó la precipitación media, la máxima promedio y la mínima promedio mensual en el área de estudio. La precipitación media histórica regional es de 1,110 mm. Los valores encontrados para la precipitación mínima promedio y la máxima promedio fueron de 896.45 mm y 1,384.25 mm, respectivamente. Los valores de precipitación media anual varían significativamente en los municipios de la región, sin embargo, los municipios con los valores más altos son Talpa de Allende con 1,384.25 mm y Mascota con 1,163.73 mm, mientras que más bajos se encuentran en Guachinango con 896.45 mm y Mixtlán con 1,014.26 mm. Las zonas con mayor precipitación se concentran principalmente en los municipios de Talpa de Allende, Atenguillo y Mascota.

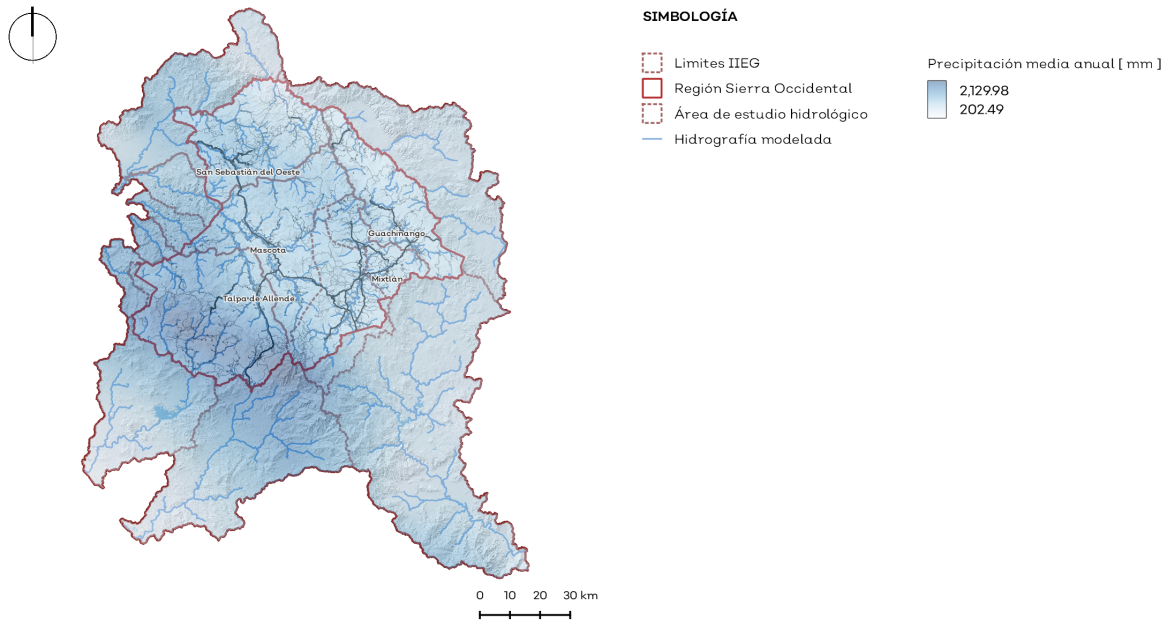


Gráfico 6. Precipitación media anual en los municipios de la región. Fuente: Elaboración propia con base en datos de precipitación del Sistema Meteorológico Nacional.

Tabla 4. Precipitación media anual en los municipios de la región. Fuente: Elaboración propia con base en datos de precipitación del Sistema Meteorológico Nacional.

Municipio	Precipitación media anual (mm)
Atenguillo	1,148.02
Guachinango	896.45
Mascota	1,163.73
Mixtlán	1,014.26
San Sebastián del Oeste	1,054.00
Talpa de Allende	1,384.25

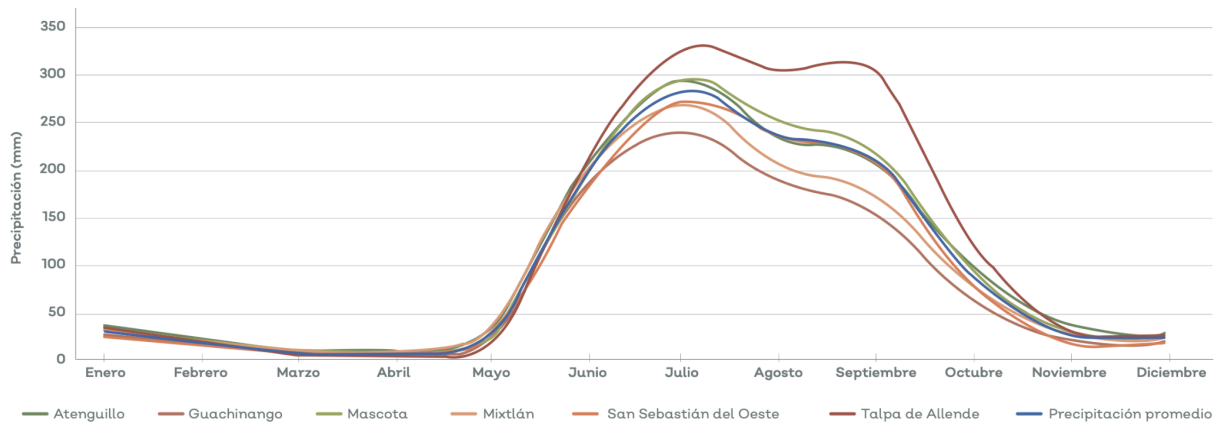


Gráfico 7. Precipitación mensual regional. Fuente: Elaboración propia con datos de precipitación del Sistema Meteorológico Nacional.

A partir del análisis de los datos de temperatura y precipitación media, se construyó un climograma que permite identificar los periodos secos y húmedos a lo largo del año en la región de estudio. El periodo de estiaje en la región se extiende desde noviembre hasta mayo, mientras que el período húmedo se concentra entre junio y octubre, con precipitaciones de gran intensidad.

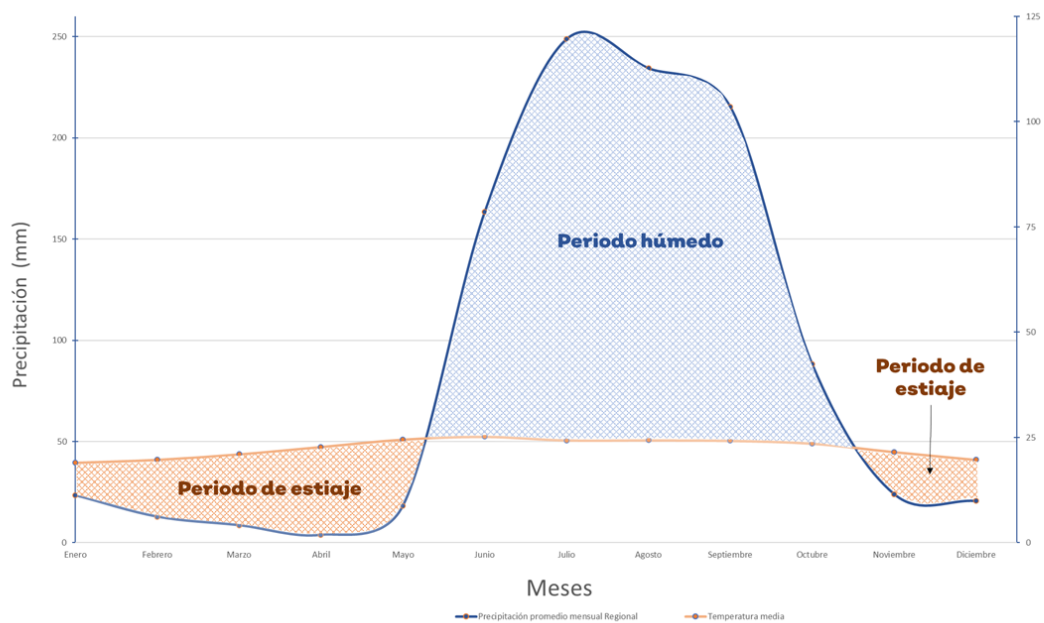


Gráfico 8. Hidro-climograma de la región. Fuente: Elaboración propia con datos de temperatura y precipitación diaria registradas de las estaciones seleccionadas del Sistema Meteorológico Nacional entre 1960 y 2019.

Calidad del agua

Contaminación por agroquímicos

Se llevó a cabo un análisis cualitativo del potencial de contaminación de ríos y arroyos debido a la acumulación y arrastre de agroquímicos. Para este análisis sólo se consideró el área de cultivos y de pastizales inducidos, sin tomar en cuenta la cantidad ni propiedades fisicoquímicas de los agroquímicos que se añaden a cultivos tradicionales, frutales y

pastizales inducidos. De esta forma, este análisis muestra los ríos y arroyos que drenan una mayor extensión de áreas de cultivos y pastizales. Los datos utilizados para este análisis fueron la cobertura de suelo del Estado de Jalisco (2020) y la red hidrográfica modelada que se obtuvo para el área de estudio hidrológico.

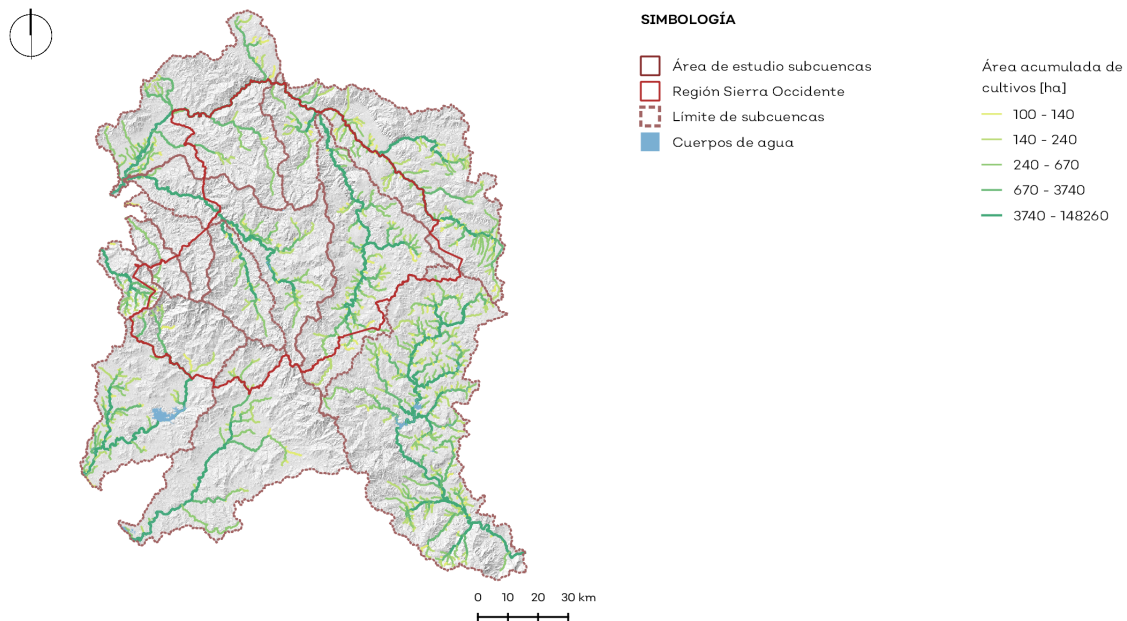


Gráfico 9. Hidrografía susceptible a la contaminación por acumulación de agroquímicos de las áreas de cultivos de la región. Fuente: elaboración propia con datos de Cobertura de Suelo del Estado de Jalisco (2020) y el Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR de 12.5m de resolución de las Instalaciones Satelitales de Alaska, NASA, 2015.

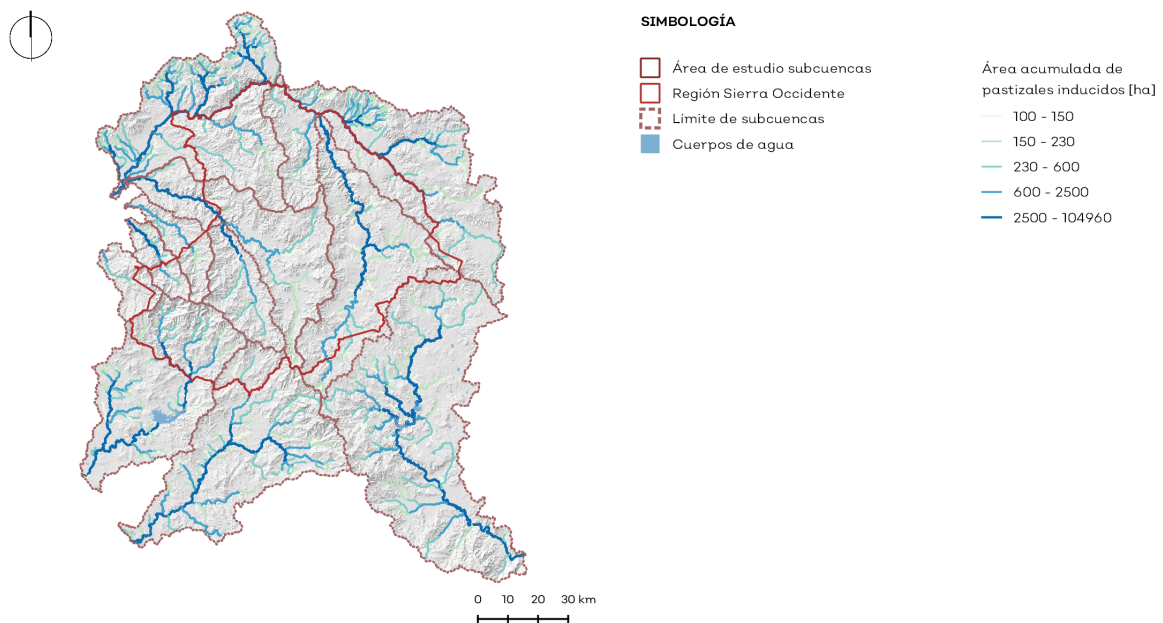


Gráfico 10. Hidrografía susceptible a la contaminación por acumulación de agroquímicos de los pastizales inducidos y cultivados de la región. Fuente: elaboración propia con datos de Cobertura de Suelo del Estado de Jalisco (2020) y el Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR de 12.5m de resolución de las Instalaciones Satelitales de Alaska, NASA, 2015.

Vulnerabilidad de agua subterránea

Para identificar las zonas más vulnerables a la contaminación de agua subterránea se utilizó el método de cartografía a la contaminación de acuíferos (Foster e Hirata, 1988). Esta metodología, llamada GOD, evalúa las características litológicas y piezométricas y estima el potencial de contaminación de agua subterránea por infiltración vertical desde la superficie.

Esta metodología es útil y aplicable a zonas con escasa información hidrogeológica que impida cuantificar las características de transmisividad de agua a través del medio. Sus insumos consisten en las siguientes tres variables que constituyen dicho acrónimo:

- G (*Groundwater confinement*, confinamiento de agua subterránea): indica el tipo de acuífero según su confinamiento.
- O (*Overall aquifer class*, clase general de acuífero): representa la litología de la zona no saturada y su grado de consolidación
- D (*Depth to groundwater*, nivel piezométrico): es la profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico.

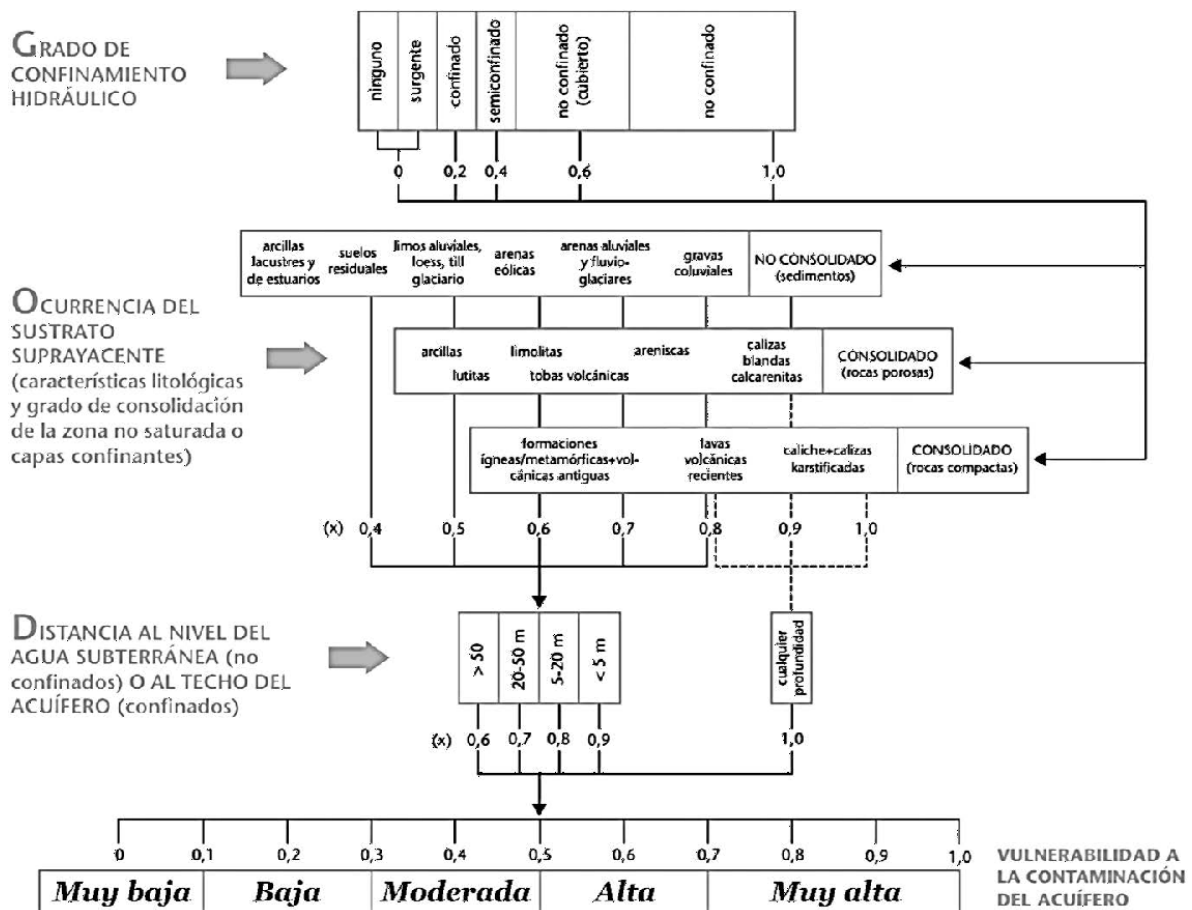


Gráfico 11. Esquema de la metodología de cartografía de vulnerabilidad de agua subterránea GOD.

Fuente: Foster e Hirata (1988).

Debido a que en el área de estudio hidrogeológico se cuenta con escasa información piezométrica actualizada, al valor de la variable D se le asignó un valor de 1, como se ha hecho en estudios hidrogeológicos en el occidente de México (Rizo, 2017).

El cálculo del índice se lleva a cabo de la siguiente manera:

$$\text{Índice } GOD = G \times O \times D \quad \text{Ecuación 1}$$

Al multiplicar las tres variables de la ecuación se obtiene un valor del índice de vulnerabilidad que se comprende entre 0 y 1 (Muy bajo a Muy alta). Las ponderaciones de los factores según sus características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Ponderación de las variables del método GOD para cartografía de vulnerabilidad de agua subterránea. Fuente: Foster e Hirata (1988).

Valor	G	O			D
		No consolidado	Consolidado (rocas porosas)	Consolidado (rocas compactas)	
0.0	Ninguno surgente confinado	-	-	-	-
0.2	-	-	-	-	-
0.3		Arcillas lacustres y de estuarios	-	-	-
0.4	Semiconfinado	Suelos residuales	-	-	-
0.5	-	Limos aluviales	Arcillas y lutitas	-	-
0.6	No confinado (cubierto)	Arenas eólicas	Limolitas y tobas volcánicas	Formaciones ígneas / metamórficas	> 50 m
0.7	-	Arenas aluviales y fluviglaciares	-	-	20-50 m
0.8		Gravas coluviales	Calizas blandas, calcarenitas	Lavas volcánicas recientes	5-20 m
0.9		-		-	< 5 m
1.0	No confinado	-	-	Calizas karsificadas	Cualquier profundidad

Para el análisis e interpretación cartográfica se utilizaron las guías de INEGI y para el análisis de las propiedades edáficas y taxonómicas de los suelos se utilizaron los criterios de la FAO World Reference Base (WRB) Global Soil Resource Reference.

Para cada variable se utilizaron los siguientes datos:

FACTOR G: se utilizó la capa vectorial de unidades hidrogeológicas, obtenida del conjunto de datos vectoriales de las cartas de aguas subterráneas, escala 1:250,000 Serie I Jalisco (1979). Esta capa se reclasificó según su consolidación y posibilidad de contener agua de la siguiente forma:

Tabla 6. Clasificación de unidades hidrogeológicas. Fuente: Elaboración propia con base en las cartas de aguas subterráneas 1:250,000 Serie I Jalisco (1979) y Foster e Hirata (1988).

Tipo de material	Valor
Cuerpo de agua intermitente	0.2

Tipo de material	Valor
Cuerpo de agua perenne	0.2
Material consolidado con posibilidades bajas	0.2
Material consolidado con posibilidades medias	0.3
Material consolidado con posibilidades altas	0.3
Material no consolidado con posibilidades bajas	0.4
Material no consolidado con posibilidades medias	0.6
Material no consolidado con posibilidades altas	1.0

FACTOR O: se utilizó la capa vectorial de unidades litológicas 1:50,000 del IIEG (2015). La litología clasificó de acuerdo con su potencial de confinamiento según el tipo de roca predominante y génesis.

Tabla 7. Clasificación de unidades litológicas. Fuente: Elaboración propia con base en la capa vectorial de unidades litológicas del IIEG 1:50,000 (2015) y Foster e Hirata (1988).

Clave	Descripción	Valor
A	Andesita	0.6
al	Suelo aluvial	0.9
ar	Arenisca	0.7
ar-cg	Arenisca - conglomerado	0.8
B	Basalto	0.6
bs	Brecha	0.7
Bv	Brecha volcánica	0.6
cz	Caliza	0.9
cz-lu	Caliza - lutita	0.9
cg	Conglomerado	0.7
D	Diorita	0.6
E	Esquisto	0.6
eo	Suelo eólico	0.6
lgea	Extrusiva ácida	0.6
lgeb	Extrusiva básica	0.6
lgei	Extrusiva intermedia	0.6
lgia	Intrusiva ácida	0.6
lgii	Intrusiva intermedia	0.6
Gn	Gneis	0.6
Gr	Granito	0.6
li	Suelo litoral	0.7
lu-ar	Lutita - Arenisca	0.8
re	Suelo residual	0.4
pa	Suelo palustre	0.4

Clave	Descripción	Valor
R	Riolita	0.6
T	Toba	0.7
V	Vítrea	0.6

FACTOR D: Debido a que se cuenta con nula información piezométrica actualizada dentro de área de estudio, se optó por utilizar el valor de 1 para toda la región, lo que da como resultado una cartografía de vulnerabilidad dependiente únicamente de las características físicas del medio: unidades hidrogeológicas y unidades litológicas.

Una vez que se clasificaron las capas de unidades hidrogeológicas y unidades litológicas de acuerdo con los valores indicados en las tablas 6 y 7, las capas vectoriales se convirtieron a ráster, multiplicándose con álgebra de mapas.

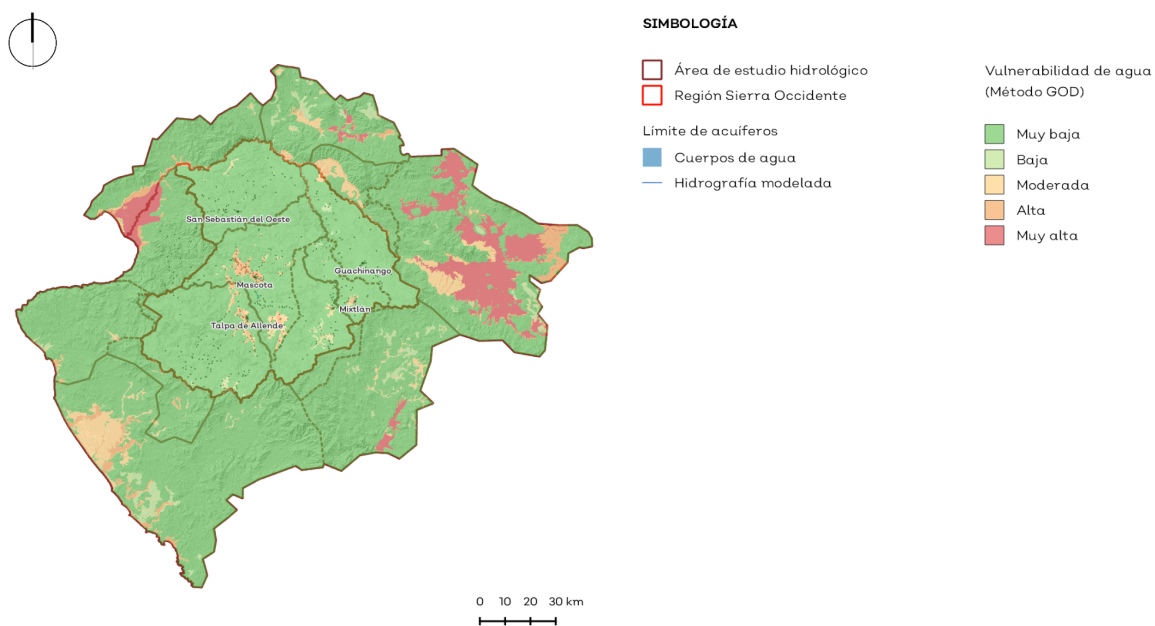


Gráfico 12. Vulnerabilidad de agua subterránea. Fuente: elaboración con propia con base en capas de unidades hidrogeológicas (INEGI, 1979), unidades litológicas (IIEG, 2015) y la metodología de cartografía de vulnerabilidad de agua subterránea (Foster e Hirata, 1988).

Agua subterránea

Zonas con mayor potencial de recarga de agua subterránea

Para la delimitación de las zonas con mayor potencial de almacenamiento de agua subterránea se utilizó la metodología establecida por Rizo (2017). Para ello se utilizaron los siguientes datos: concesiones de agua subterránea (REPD, 2021), unidades hidrogeológicas (INEGI, 1979), unidades litológicas (IIEG, 2015) y el conjunto de datos geológicos vectoriales (INEGI, 1977 - 1989).

Primero se realizó una comparación de las unidades litológicas con las unidades hidrogeológicas. Éstas últimas indican el nivel de consolidación del material geológico y su potencial para almacenar agua. Las unidades hidrogeológicas con posibilidades altas coinciden con suelos de material: aluvial (al), residual (re) y arenisca (ar). Después, como factor de presencia de agua subterránea se consideró la densidad de concesiones de agua

subterránea. Asimismo, se utilizó la capa fallas del conjunto de datos geológicos vectoriales, ya que las zonas con fallas en materiales consolidados tienen el potencial de albergar existir flujos y/o acumulaciones de agua subterránea.

Reuniendo las características mencionadas anteriormente, se delimitaron acuíferos potenciales. Se obtuvieron 17 acuíferos potenciales en el área de estudio hidrológico, de los cuales 15 se sitúan dentro de Jalisco, 2 en Nayarit y 2 compartidos entre los 2 estados. Para fines administrativos y prácticos, y en medida de lo posible, se identifican los acuíferos potenciales con la clave los acuíferos delimitados por CONAGUA dentro del que se encuentran. Cabe destacar que las acciones ejercidas sobre un acuífero potencial propuesto que está dividido por CONAGUA, afectarán ambos lados de la divisoria.

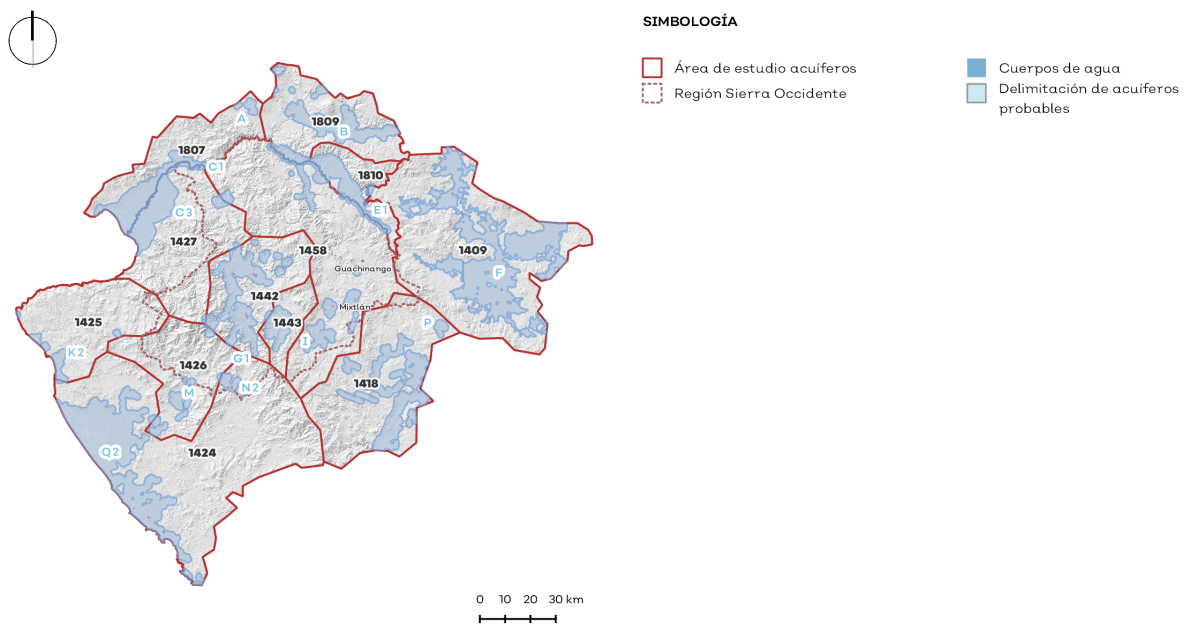


Gráfico 13. Delimitación de zonas con mayor potencial de agua subterránea o acuífero probable. Fuente: Elaboración propia con datos de concesiones de agua subterránea (REPD, 2021), unidades hidrogeológicas (INEGI, 1979), unidades litológicas (IIEG, 2015) y el conjunto de datos geológicos vectoriales (INEGI, 1977 - 1989) y metodología de Rizo (2017).

Tabla 8. Delimitación de zonas con mayor potencial de agua subterránea o acuífero probable. Fuente: Elaboración propia con datos de concesiones de agua subterránea (REPD, 2021), unidades hidrogeológicas (INEGI, 1979), unidades litológicas (IIEG, 2015) y el conjunto de datos geológicos vectoriales (INEGI, 1977 - 1989) y metodología de Rizo (2017).

Delimitación de acuífero CONAGUA	Nombre acuífero CONAGUA	Delimitación de acuífero probable
1409	Ameca	E4
		F
1418	Unión de Tula	O
		P
1424	Tomatlán	K1
		N2

Delimitación de acuífero CONAGUA	Nombre acuífero CONAGUA	Delimitación de acuífero probable
		Q2
1425	Vista del Mar	J
		K2
		L
1426	Santa María	G2
		M
		N1
		Q1
1427	Puerto Vallarta	C3
		D2
		G3
1442	Mascota	G1
		H2
1443	Maravilla	H1
1458	Mixtlán	C2
		D1
		E3
		I
1807	Valle de Banderas	A
		C1
1809	Valle Ixtlán-Ahuacatlán	B
		E2
1810	Valle Amatlán de Cañas	E1

Limitaciones

La delimitación de acuíferos no fue validada en campo, ya que no se puede verificar el almacenamiento de agua debido a la falta de información piezométrica. Su objetivo es identificar zonas de infiltración para recarga de almacenamiento subterráneo de agua en áreas potenciales.

Estimación de recarga

Para estimar el volumen de recarga de agua subterránea se llevó a cabo la metodología propuesta por Piscopo (2001). Esta metodología surgió con el fin de generar la variable Recarga neta (R_r) del método de vulnerabilidad DRASTIC (Rizo, 2017). Esto supone ciertas limitaciones debido a que el método de Piscopo reclasifica las tres variables utilizadas para su cálculo en variables semi-cualitativas que después se traducen a cuantitativas por medio de relaciones numéricas (adimensionales) entre métodos, además de que la información obtenida no fue validada con cambios en el nivel piezométrico.

Las tres variables que utiliza Piscopo para el cálculo de la recarga (R_r) son el factor de precipitación (F_p), el factor de pendiente (F_s) y el factor de capacidad de infiltración del

suelo (F_{sp}). Las tres variables se relacionan de la siguiente forma y permiten determinar, espacialmente, la recarga neta de un acuífero:

$$R_r = F_p + F_s + F_{sp} \quad \text{Ecuación 2}$$

Estas variables, representadas en capas de información geográfica, son reclasificadas de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 9. Asignación de valores para la determinación de la recarga neta. Fuente: Piscopo (2001), Rizo (2017).

Pendiente (%)	F_s	Precipitación [mm/año]	F_p	Capacidad de infiltración	F_{sp}
<2	4	>850	4	Moderada-Alta	4
2-10	3	700-850	3	Moderada	3
10-33	2	500-700	2	Lenta	2
>33	1	<500	1	Muy lenta	1
-	-	-	-	Casi nula	0

Para el factor pendiente (F_p) se generó una capa de pendiente a partir del Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR de 12.5m de resolución de las Instalaciones Satelitales de Alaska, NASA (2015). Para obtener el factor de precipitación se reclasificó la capa de precipitación modelada para el área de estudio hidrológico. El factor F_{sp} tiene un carácter cualitativo y ello supone cierta subjetividad.

Para obtener el factor de capacidad de infiltración se utilizó la capa de vulnerabilidad de agua subterránea, que, como se mencionó anteriormente, se elaboró con capas de unidades hidrogeológicas en donde se encuentra el grado de confinamiento de agua subterránea y litología de la zona no saturada y su grado de consolidación agregando las zonas donde la capacidad de infiltración es casi nula como las zonas urbanas y los cuerpos de agua.

El factor de recarga (R_r) obtenido con valores de 3 al 13, se reclasificó en rangos de recarga con unidades en mm/año en una relación propuesta por la EPA para traducir valores del factor R del método DRASTIC mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 10. Relación de valores de recarga neta con valor obtenido del factor R_r . Fuente: Piscopo (2001), Rizo (2017), Aller et al. (1987)

R_r (Piscopo, 2001)	Valor R (método DRASTIC)	Recarga neta [mm/año]
11-13	9	≥ 254
9-11	8	178 – 254
7-9	6	103 – 178
5-7	3	50 – 103
3-5	1	< 50

La recarga neta R_r obtiene mediante la suma raster según la ecuación 2

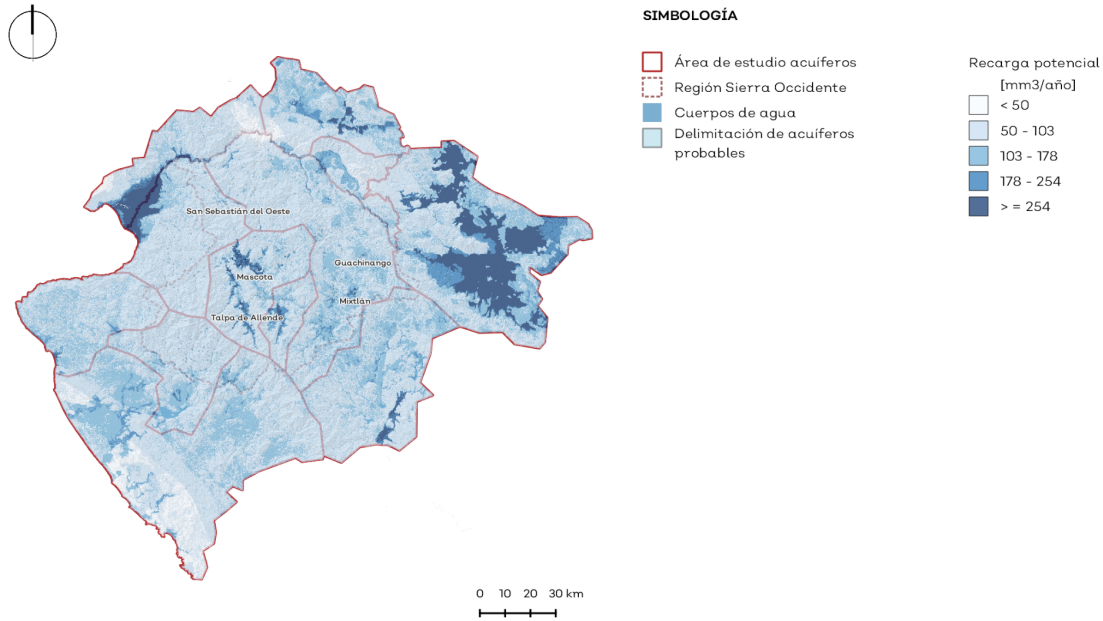


Gráfico 14. Mapa de recarga potencial por subcuencas Fuente: Elaboración propia con datos de concesiones de agua subterránea (REPDA, 2021), unidades hidrogeológicas (INEGI, 1979), unidades litológicas (IIEG, 2015) y el conjunto de datos geológicos vectoriales (INEGI, 1977 - 1989) y metodología de Rizo (2017).

Para la estimación de recarga por acuífero potencial, se consideró recarga igual a cero en zonas urbanas y en cuerpos de agua ya que la recarga estimada por este método, está en función del agua disponible, proveniente únicamente de la precipitación que ingresa a través de la infiltración vertical.

Para la estimación de recarga neta en el área de estudio hidrológico, se cuantificó la entrada de agua al subsuelo únicamente dentro de la delimitación de los acuíferos potenciales. Esto bajo el supuesto de que, en algunas de estas zonas, se conoce que existe agua almacenada en el subsuelo y en otras se tiene alta probabilidad de contención de agua. Fuera de la delimitación de acuíferos sí existe una infiltración, pero se desconoce si esa infiltración llega a recargar algún acuífero.

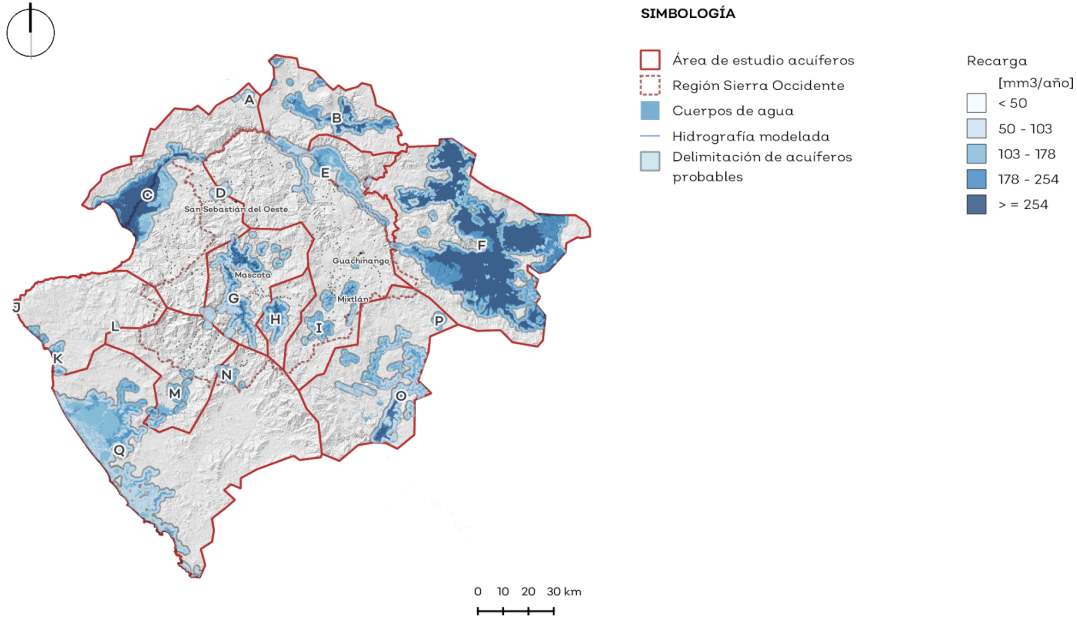


Gráfico 15. Recarga estimada en delimitación de acuíferos potenciales. Fuente: Método de Piscopo (2001) Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR (NASA, 2015), capa de la distribución de precipitación con mediciones del CLICOM 1950-2012, capa hidrogeológica del INEGI (2002), Rizo (2017).

El resultado final de la recarga delimitada por los acuíferos probables se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 11. Recarga potencial agrupada por acuífero. Fuente: Elaboración propia con datos de Cartas Geohidrológicas, INEGI (2002) y capa de vulnerabilidad GOD.

Delimitación de acuífero CONAGUA	Nombre acuífero CONAGUA	Delimitación de acuífero probable	Recarga en acuífero probable [hm ³]	Recarga agrupada por acuífero CONAGUA [hm ³]
1409	Ameca	E4	0.54	300.69
		F	300.15	
1418	Unión de Tula	O	66.81	70.68
		P	3.88	
1424	Tomatlán	K1	0.30	114.78
		N2	6.05	
1425	Vista del Mar	Q2	108.43	10.70
		J	0.30	
1426	Santa María	K2	9.22	16.26
		L	1.18	
		M	10.90	
1427	Puerto Vallarta	N1	0.36	50.47
		Q1	3.98	
1427	Puerto Vallarta	C3	47.62	50.47

Delimitación de acuífero CONAGUA	Nombre acuífero CONAGUA	Delimitación de acuífero probable	Recarga en acuífero probable [hm ³]	Recarga agrupada por acuífero CONAGUA [hm ³]
		D2	2.09	
		G3	0.76	
1442	Mascota	G1	58.66	59.28
		H2	0.62	
1443	Maravilla	H1	17.09	17.09
1458	Mixtlán	C2	0.05	40.55
		D1	1.64	
		E3	14.33	
		I	24.53	
1807	Valle de Banderas	A	3.03	58.05
		C1	55.02	
1809	Valle Ixtlán-Ahuacatlán	B	50.09	55.34
		E2	5.25	
1810	Valle Amatlán de Cañas	E1	24.83	24.83

Balance hidrológico

Superficial

Los modelos hidrológicos han sido utilizados globalmente como una herramienta eficiente para el manejo de recursos naturales y son clave para el manejo integral de cuencas, especialmente en zonas sujetas a planeación, para proyecciones ante el cambio climático, para la sustentabilidad en aprovechamiento de recursos naturales y mitigación de impacto (Sánchez et al., 2017).

Sin embargo, hay bastantes limitaciones que deben ser consideradas para interpretar los resultados de los modelos. Estas son representaciones sistemáticas de la realidad, donde hay muchos factores que pueden aumentar sus errores. Los modelos hidrológicos dependen fundamentalmente de la información alimentada. El reto que conlleva es tener acceso a información con buena resolución espacial y temporal para disminuir el error y mejorar la precisión de los resultados.

El modelo hidrológico para el área de estudio hidrológico se creó a partir de simulaciones del programa "SWAT" (Soil and water assessment tool, Herramienta de evaluación de suelos y agua). Este programa se creó por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) para simular la producción de agua y sedimentos en cuencas, así como la distribución de nutrientes y contaminantes. El modelo SWAT tiene la capacidad de simular caudales, transporte de sedimentos y erosión, y producción de biomasa (Arnold et al., 2012). El análisis principal por el que se utiliza en este proyecto es para la modelación hidrológica de largo plazo, es decir, balance de agua.

El ciclo hidrológico del modelo SWAT se basa en la ecuación general del balance de agua:

$$SW_t = SW_0 + i = 1 \times t (R_{dia} - Q_{sup} - E_a - w_{inf} - Q_r) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde SW_t es la cantidad final de agua en el suelo (mm), SW_o es la cantidad inicial de agua en el suelo (mm), t es el tiempo en días, $R_{\text{día}}$ es la precipitación diaria (mm), Q_{sup} el escurrimiento superficial diario (mm), E_a es la cantidad de evapotranspiración diaria (mm), w_{inf} es la cantidad diaria de agua que se infiltra a la zona vadosa (mm) y Q_r es la cantidad del flujo de retorno diario (mm) (Neitsch et al., 2011).

La evapotranspiración se calcula, dentro del programa, a partir del método de Penman-Montieth, que es considerado como uno de los mejores métodos para su estimación (Allen et al. 2006).

Para el cálculo de erosión, el programa contiene la Ecuación Modificada de Pérdida Universal del Suelo (MUSLE). Esta estimación de la erosión modifica el término "R" de la ecuación USLE (Ecuación de Pérdida Universal del Suelo) (Neitsch et al., 2011).

La simulación del escurrimiento superficial se estimó en SWAT con el número de curva (CN) de la SCS (Soil Conservation Service) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). Esta metodología surgió desde la década de 1960 como herramienta para la caracterización hidrológica de una cuenca. Esta metodología presenta extensas limitaciones en cuanto a su aplicabilidad. Debe ser utilizado en cuencas con áreas de drenaje relativamente pequeñas, donde sus parámetros hidrológicos sean comprendidos y estudiados, y se debe contar con información climatológica y terrenal de alta resolución espacial y temporal. Sus debilidades principales son que no considera la duración e intensidad de la lluvia (De Alba, 2019), ni los efectos de las escalas espaciales, y es sumamente sensible a la variabilidad de su único parámetro: CN (Número de Curva) (Soulis & Valiantzas, 2012).

La ecuación del método de la SCS para estimar el escurrimiento es la siguiente:

$$Q = (P - I_a) \times 2(P - I_a) + S \quad \text{Ecuación 4}$$

Siendo Q el escurrimiento (in), P la precipitación (in), S potencial máximo de retención (in) y I_a es la abstracción inicial (in) (De Alba 2019).

La abstracción inicial es la retención de la lluvia antes de que comience el escurrimiento. Así que, cuando la cantidad de precipitación sea menor que la abstracción inicial del terreno, el escurrimiento es igual a 0. Siendo así, la abstracción inicial (I_a) es una fracción del potencial máximo de retención (S) (Soulis & Valiantzas, 2012):

$$I_a = S \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde S es el porcentaje del potencial máximo de retención.

La variable S está en función del suelo y cobertura del terreno, que a la vez depende el número de curva (CN) (Soulis & Valiantzas, 2012):

$$S = 1000 \text{ CN} - 10 \quad \text{Ecuación 6}$$

El número de curva es un coeficiente del 0 al 100 determinado por la combinación del uso de suelo y vegetación, el tipo de suelo y la condición hidrológica del terreno. A esta combinación de factores se les denomina Grupo Hidrológico del Suelo (GHS) (De Alba 2019), clasificado en 4 grupos según su capacidad de infiltración y generación de escurrimiento.

Modelo SWAT

El primer insumo para el modelo son los datos topográficos para la delimitación de subcuencas o microcuencas. Se realiza un proceso similar al que se describe en la delimitación de microcuencas. La capa que alimenta este proceso es el modelo digital de elevación con la hidrografía modelada ("AGREE").

El segundo paso del modelo es la creación de Unidades Hidrológicas de Respuesta (HRU, por sus siglas en inglés) para agrupar los tipos suelo, uso de suelo y vegetación, y la pendiente del terreno. Para esto, es necesario cuadrar la información de suelos, y uso de suelo y vegetación con las bases de datos que tiene precargadas el modelo.

A partir de la base de datos mundial de suelos, se relacionó la edafología del IIEG (2015) con los tipos de suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), y el uso de suelo y vegetación (SEMADET, 2020) se reclasificó para poder preparar el insumo en el modelo. Asimismo, la pendiente se partió en 5 clases para las unidades hidrológicas.

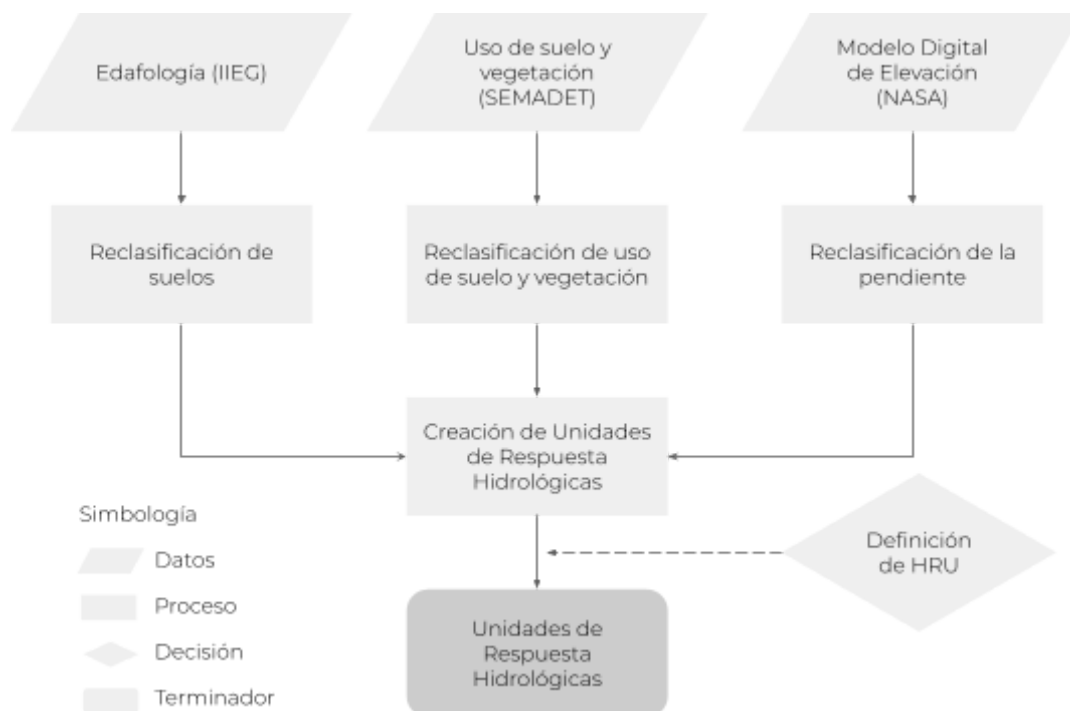


Gráfico 16. Representación de los métodos para la obtención de las Unidades de Respuesta Hidrológica utilizando datos de edafología, uso de suelo y vegetación y modelo digital de elevación.

Fuente: Metodología SWAT (Abbaspour, 2014).

La definición de las unidades de respuesta hidrológica es una acotación, según su área, de las mismas para disolver aquellas que no sean suficientemente representativas. Para el caso de la simulación hidrológica de la Región Sierra Occidental, se acotó el 1% del área de uso de suelo contra el área total, el 5% del área por tipo de suelo contra el área del uso de suelo y el 10% del área de la pendiente clasificada contra el tipo de suelo. Esta definición es bastante útil cuando se pretende obtener una mejor eficiencia computacional al correr una simulación.

Otro insumo del modelo son los datos meteorológicos de la región. Al no contar con suficientes datos meteorológicos para obtener un modelo deseable, se acudió a los datos

meteorológicos globales proporcionados por el Sistema de Pronóstico Climático (CFSR, por sus siglas en inglés) (NCAR, 2017). Los datos proporcionados son de precipitación, temperatura, viento, radiación solar y humedad relativa, con datos diarios desde 1960 al 2019.

Tabla 12. Esgurrimento medio, rango de años y porcentaje de años con datos en las estaciones hidrométricas. Fuente: elaboración propia con datos de BANDAS (CONAGUA).

Clave	Estación	Río	Esgurrimento medio (hm ³ /año)	Gasto medio (m ³ /s)	Rango de años	Porcentaje de años con datos
13004	El Cuale	Río Cuale	121.37	4	1981 - 2014	93.33
14007	Las Gaviotas Río	Río Ameca	1239.19	39	1953 - 2014	76.27
14008	La Desembocada	Río Mascota	503.79	16	1949 - 2007	87.72
14010	Puente Ameca	Río Ameca	154.24	5	1956 - 2013	46.67
14029	Corrinchis II	Río Mascota	87.97	3	1981 - 2014	68.97
14031	El Rodeo	Arroyo Cebollas	131.84	4	1981 - 2013	75.00
15014	Higuera Blanca II	Río San Nicolás	1257.43	44	1970 - 2011	82.93

Para correr la simulación del modelo SWAT, se tomó el rango de años con mayor coincidencia con la medición de caudal de las estaciones hidrométricas con el objetivo de calibrar la simulación. Esta fue desde 1987 - 2019, con tres años de calentamiento inicial para la normalización de parámetros hidrológicos. En este rango de años solamente fue posible analizar las mediciones de una estación hidrométrica, Las Gaviotas II.

Tabla 13. Parámetros de la modelación SWAT para el área de estudio hidrológico. Fuente: elaboración propia usando la metodología SWAT (Abbaspour, 2014).

Parámetro	Valor
Simulación	33 (1987 - 2019)
Calentamiento del modelo	3 años
HRUs	8,306
Subcuencas	105
Unidades de tiempo de la simulación	años
Método de precipitación	media
Área total de cuencas	876,805.22 hectáreas

La simulación hidrológica del modelo arroja errores, o puntos de cautela, que son de gran utilidad para su calibración. En este caso, se avisa que el rendimiento de agua superficial puede llegar a ser excesivo y las proporciones de esta variable pueden ser incorrectas.

Calibración SWAT-CUP

La calibración de un modelo consiste en un proceso iterativo de variaciones en los parámetros del mismo, para ajustar los resultados a las observaciones (Abbaspour, 2014). En el programa SWAT-CUP se puede calibrar un rango amplio de parámetros, donde su elección se basa en las variables observadas y en el conocimiento científico de la cuenca.

Como todos los modelos, la calibración de estos también cuenta con limitaciones y puntos que merecen atención y cuidado, como la elección de parámetros, las limitaciones

de un modelo “calibrado”, y los problemas de incertidumbre (Abbaspour, 2014). La incertidumbre de un modelo de cuencas puede recaer en el desconocimiento conceptual del modelo hidrológico, incertidumbre sobre los insumos del modelo y sobre los parámetros que lo influyen.

Existen varios algoritmos para la calibración en el programa de SWAT-CUP. La calibración del modelo hidrológico se realizó por el Ajuste de Incertidumbre Secuencial (SUFI-2). El SUFI-2 es una solución estocástica, de manera en que se reconocen los errores e incertidumbres para recalcar la ignorancia que se tiene sobre los procesos naturales del modelo (Abbaspour, 2014). Todos los tipos de incertidumbre en el modelo se reflejan, para este algoritmo, en los rangos seleccionados para los parámetros. Por lo tanto, dicha incertidumbre también se refleja en las variables de salida. La incertidumbre en el SUFI-2 se expresa en distribuciones probabilísticas del 95%, o 95 PPU. Los 95 PPU son los resultados de los algoritmos estocásticos ya que expresan la solución en un rango de probabilidades determinado por los rangos de los parámetros (Abbaspour, 2014).

El algoritmo SUFI-2 te permite elegir varios parámetros y sus rangos de calibración, así como un análisis de sensibilidad a través de las estadísticas resultantes (Abbaspour, 2014). Existen dos maneras en las que se pueden calibrar los parámetros en el SUFI-2: por sensibilidad global, y por sensibilidad individual.

La sensibilidad global tiene la ventaja de realizar simulaciones cambiando los valores de un número extenso de parámetros, mientras que la sensibilidad individual realiza la simulación con el cambio de pocos parámetros. La desventaja del análisis de sensibilidad global es que se debe contar con una buena noción de los parámetros de las cuencas modeladas, además de necesitar gran capacidad computacional.

Como todos los parámetros del modelo son sistemáticos y tienen relación uno con otro (Sameh et al., 2019), se optó por el análisis de sensibilidad global. Para poder llegar a una calibración deseable, este análisis requiere de 200 a 500 simulaciones con 3 a 5 iteraciones (Abbaspour, 2014), actualizando el rango de los parámetros después de cada iteración.

Se calibraron 20 parámetros relacionados con el flujo de agua en las cuencas y fueron elegidos con base en la investigación hecha por Sameh et al. (2019). Los parámetros seleccionados se categorizan por grupos reguladores del suelo, agua subterránea, canal del río principal, uso de suelo y vegetación, y subcuencas.

Tabla 14. Parámetros, descripción y rangos obtenidos en la calibración del modelo SWAT. Fuente: elaboración propia con base en Metodología SWAT (Abbaspour, 2014).

Parámetro	Descripción	Tipo de cambio	Cambio percentil (%)
CN2	Número de curva de escurrimiento del SCS	r	-45
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/h)	r	-35

El tipo de cambio de los valores de los parámetros se realizó por cambios relativos (r). Los cambios relativos consisten en la multiplicación de los valores de los parámetros por 1 más un factor del rango de parámetro dado.

La calibración se realizó mediante iteraciones manuales con los datos de la estación hidrométrica 14007, Las Gaviotas II.

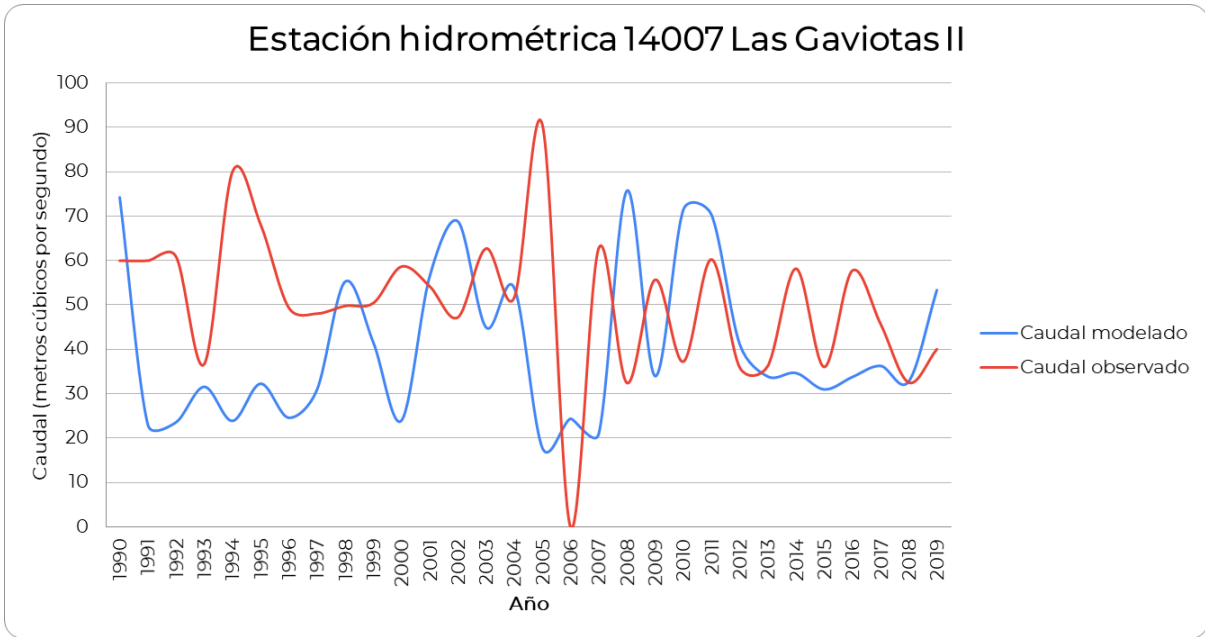


Gráfico 17. Comparación del caudal observado y el caudal modelado en la estación hidrométrica 14007 Las Gaviotas II. Fuente: elaboración propia con base en datos de CONAGUA y metodología SWAT (Abbaspour, 2014).

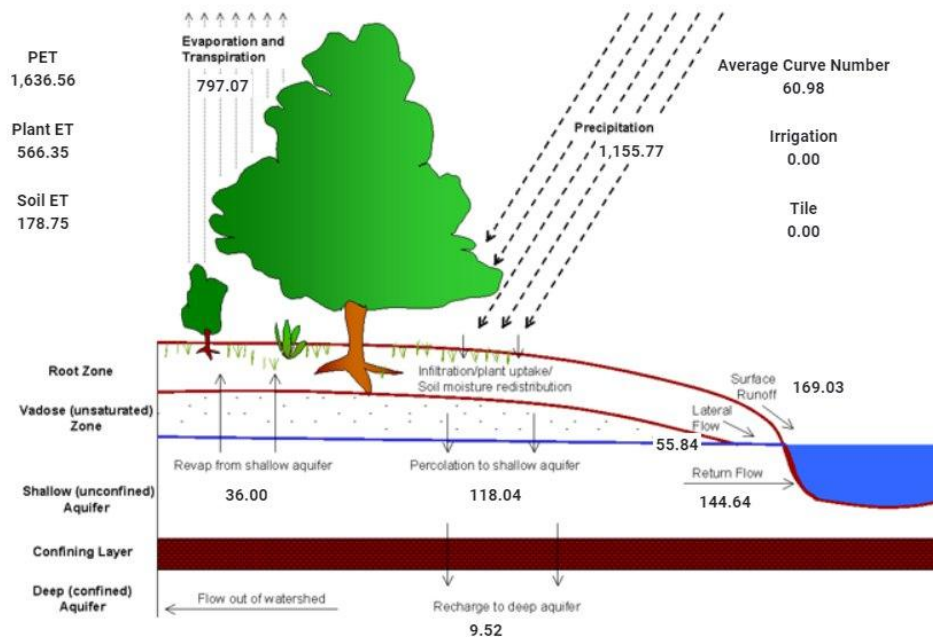


Gráfico 18. Modelo gráfico del modelo SWAT para el área de estudio hidrológico. Unidades en milímetros de precipitación. Fuente: elaboración propia con metodología SWAT (Abbaspour, 2014).

La calibración de los parámetros del modelo hidrológico modificó las proporciones del balance de agua obtenido por el modelo original, aunque hay unas proporciones que siguen siendo excesivas, como el flujo de retorno desde el acuífero somero o “Return Flow”.

La cantidad neta del volumen de escurrimiento, en el modelo SWAT, se calcula de la siguiente manera:

$$WYLD = SUR_Q + LAT_Q + GW_Q - T_{Loss} - Pond\ abstraction \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde, WYLD es la cantidad de agua total en el canal principal que sale de cada HRU, SURQ es el escurrimiento superficial, LATQ es el escurrimiento lateral, GWQ es la aportación de agua del agua subterránea al canal principal como flujo de retorno, TLOSS son las pérdidas por infiltración de los canales y Pond Abstraction son las pérdidas de agua desde los estanques o depresiones (Neitsch et al., 2011). Todas las variables se reportan en mm de agua.

Se encontró que el fenómeno causante del error en la proporción del flujo de retorno (GWQ) se debe a la profundidad de los suelos. La reclasificación entre los suelos del INEGI a la FAO, en general, tomó suelos bastante profundos, por lo que aumenta la cantidad de agua como flujo de retorno en una simulación.

Para encontrar la correlación entre la profundidad del suelo y la cantidad de sobreestimación del GWQ, se hizo una calibración manual del escurrimiento modelado con el escurrimiento calculado entre la precipitación y el caudal de las hidrométricas. El ajuste se hizo modificando el valor del coeficiente de escurrimiento calculado para las estaciones hidrométricas y el modelado, tomando una fracción de GWQ.

Se encontró la correlación entre la profundidad media de los suelos en las subcuencas de las hidrométricas y el porcentaje de sobreestimación del caudal a la salida de la estación hidrométrica con un $R^2=0.85$. Con la regresión de este análisis se tomó una fracción de GWQ por subcuenca para corregir la cantidad de agua superficial neta (WYLD).

Una vez calculado el coeficiente de escurrimiento calibrado manualmente por microcuenca, se calcula el volumen de escurrimiento utilizando la precipitación calculada. Después, se acumula el flujo utilizando sistemas de información geográfica.

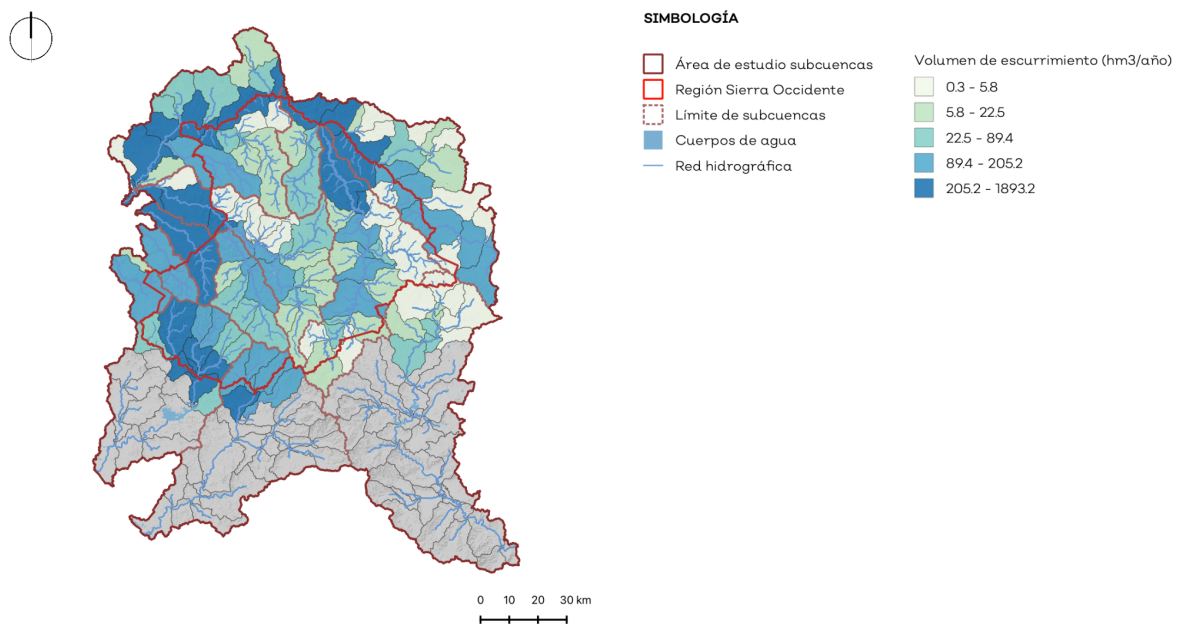


Gráfico 19. Resultados de la modelación del volumen de escurrimiento. Fuente: elaboración propia con metodología SWAT (Abbaspour, 2014).

Extracciones de agua superficial

A partir de las concesiones de extracción de agua superficial del REPDA (2021), se calcularon las salidas por extracción antrópica por microcuenca. Se tomó la extracción total por microcuenca, y con base en el flujo del escurrimiento, se acumuló la extracción de las microcuencas para influir en la acumulación del escurrimiento.

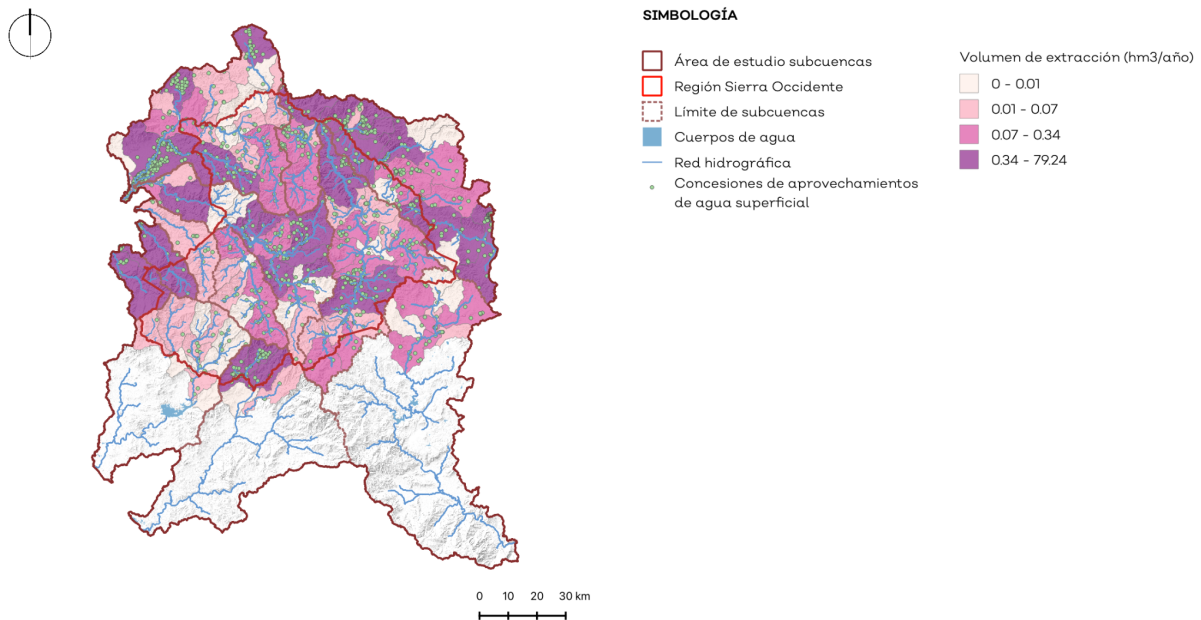


Gráfico 20. Resultados de la modelación de extracción de agua superficial y concesiones de agua superficial. Fuente: elaboración propia con metodología SWAT (Abbaspour, 2014) y concesiones otorgadas por el Registro Público de Derechos de Agua de CONAGUA (2021).

Reservas ecológicas

Dentro de las regiones hidrológicas, se encuentran algunas subcuencas con decretos de reserva de agua para fines ecológicos y de preservación del ecosistema. Estas reservas se describen en el Diario Oficial de la Federación (2018) donde se suprimen las vedas del Río Ipala, Río Tomatlán A, Río Tomatlán B, Río San Nicolás A, Río San Nicolás B, Río Cuitzmala, Río Purificación y Río Marabasco A; y se sustituye por un volumen de reserva, o caudal ecológico.

Se tomó la fracción del volumen de escurrimiento medio anual calculado para cada subcuenca destinado al caudal ecológico para calcular las reservas con los valores de disponibilidad calculados por el modelo. Esta fracción fue calculada mediante la norma NMX-AA-159-SCFI-2012, reportada en el:

“ACUERDO por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Río Ipala, Río Tomatlán A, Río Tomatlán B, Río San Nicolás A, Río San Nicolás B, Río Cuitzmala, Río Purificación y Marabasco A, pertenecientes a la Región Hidrológica número 15 Costa de Jalisco.” (DOF, 2018).

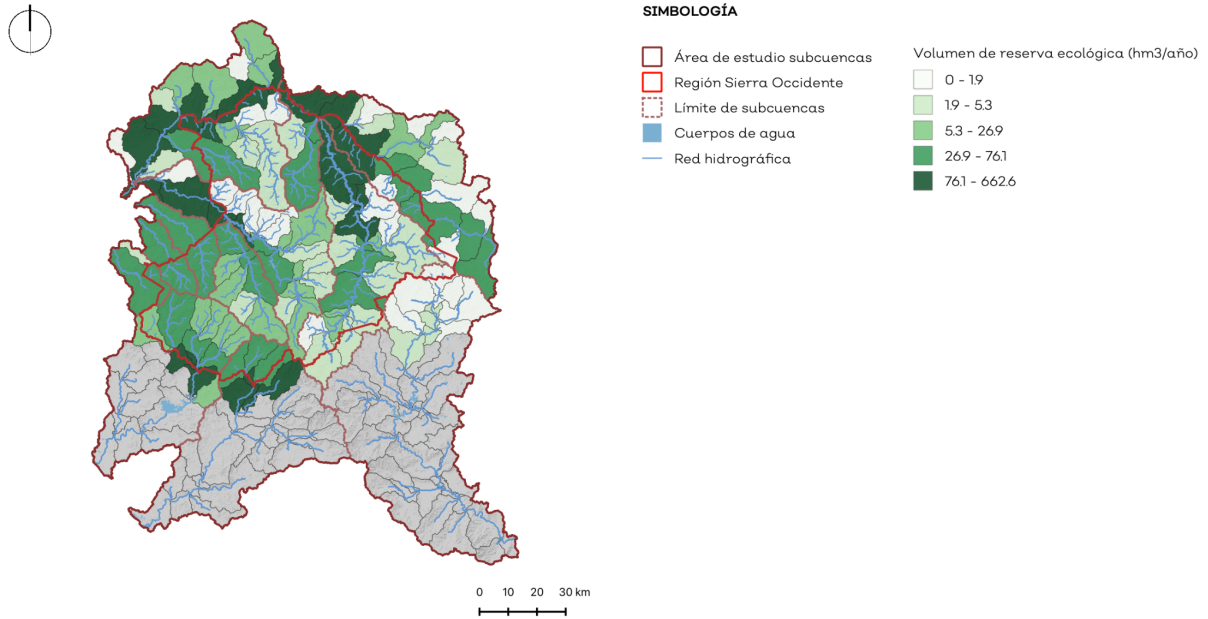


Gráfico 21. Resultados de la modelación de volumen de reserva ecológica. Fuente: elaboración propia con metodología SWAT (Abbaspour, 2014) y volúmenes de reserva ecológica publicadas en el Diario Oficial de la Federación (2018).

Resultados

La manera en la que se calculó la disponibilidad máxima para cada microcuena fue restándole los volúmenes de reserva tomados del DOF (2018) y los volúmenes de extracción anual reportados en el REPDA (2021) al modelo de lluvia-escurrencimiento creado por el modelo SWAT.

La disponibilidad máxima reportada para las microcuencas y subcuencas representa el volumen anual o flujo máximo del cauce principal. Es importante reconocer que no todo el volumen reportado está disponible todo el año para su aprovechamiento debido a la variación estacional, es decir, los escurrencimientos no son constantes durante el año, sino que siguen el comportamiento estacional de las lluvias. Además, equivalen a un valor medio anual, considerando los promedios de lluvia anuales que hay registrados para la zona.

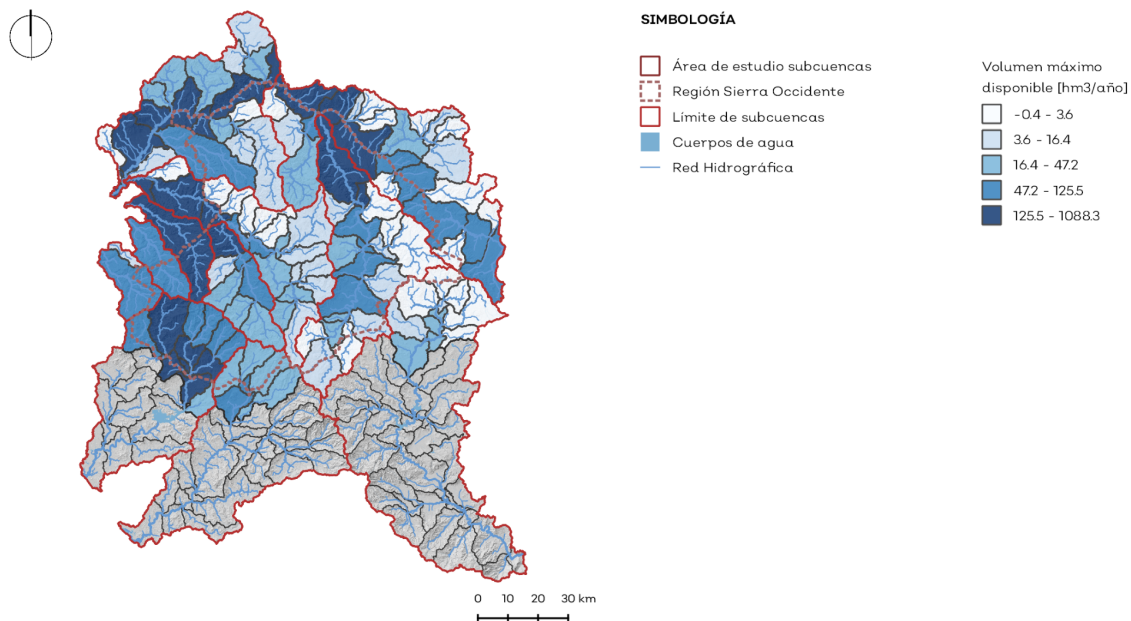


Gráfico 22. Volumen máximo disponible anual en las microcuencas de la región. Fuente: elaboración propia con datos de Modelo hidrológico de SWAT Plus, con los insumos de Edafología del IIEG, 2015, Cobertura de Suelo del Estado de Jalisco, 2020, información climática del Sistema de Pronóstico Climático, NCRA, 2017, datos climatológicos CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA, 2019, y del Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR de 12.5m de resolución de las Instalaciones Satelitales de Alaska, NASA, 2015.

Subterráneo

Para la estimación de la disponibilidad de agua subterránea se partió de la definición básica de un balance:

$$\text{Almacenamiento} = \text{Entradas} - \text{Salidas} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde se contemplan como entradas: la recarga por infiltración de agua de precipitación ($\text{hm}^3/\text{año}$) y como salidas: las extracciones de agua subterránea por concesión ($\text{hm}^3/\text{año}$), la re-vaporización desde la superficie del acuífero ($\text{hm}^3/\text{año}$) y la Descarga Natural Comprometida ($\text{hm}^3/\text{año}$) teniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$\text{Disponibilidad} = \text{Recarga neta} - \text{Extracciones} - \text{Revap} - \text{DNC} - \text{Extracciones de Manantiales} \quad \text{Ecuación 9}$$

Se tomó en cuenta que la recarga era efectiva únicamente dentro de los polígonos que delimitan los acuíferos probables, considerando que la infiltración solamente se convierte en recarga cuando llega a un acuífero. Esto para minimizar el error de la ecuación utilizada, ya que no contempla otros factores como la profundidad del acuífero, la evapotranspiración, el uso de suelo, entre otros.

Se cuantificaron las extracciones anuales de agua subterránea (REPD, 2021) dentro de las delimitaciones de los acuíferos de CONAGUA.

La Descarga Natural Comprometida (DNC) está definida en la NOM-011-CONAGUA-2015 como la “fracción de la descarga natural de un acuífero, que está comprometida como agua superficial para diversos usos o que debe conservarse para prevenir un impacto ambiental negativo a los ecosistemas o la migración de agua de mala calidad a un acuífero.” Esta descarga incluye el agua concesionada a la salida de los manantiales y el

caudal base de los ríos. Para su estimación, inicialmente se cuantificaron las concesiones por manantiales ubicadas dentro de los límites del acuífero de CONAGUA. Después para la DNC se estableció una relación proporcional entre el área del acuífero probable y el área del acuífero definido por CONAGUA. Este proceso permitió obtener una DNC (Disponibilidad de Agua en el Acuífero) proporcional para cada acuífero probable. Finalmente, estos acuíferos probables se agruparon de acuerdo con la delimitación establecida previamente por CONAGUA.

$$DNC = \text{Área de acuíferos probables}$$

La revaporización del acuífero se estimó a partir del modelo SWAT, la cual corresponde al agua que se encuentra en la superficie del acuífero y por efecto de la temperatura, sale de él en forma de vapor de agua. Este parámetro supone una profundidad media del agua subterránea de 95 cm.

Se obtuvo una disponibilidad negativa en los acuíferos: 1409, 1427, 1458, 1807, y 1809. Esto quiere decir que se está utilizando más agua de la que se estima como recarga, sin embargo, no se cuenta con información suficiente que cuantifique la descarga o recarga de acuíferos por interacción con cuerpos de agua superficial, recarga localizada, pérdida o ganancia de agua entre los límites de acuíferos de CONAGUA, entre otros. El valor de disponibilidad de agua subterránea es un comparativo de extracciones contra la estimación de recarga, sin embargo, no representa un valor real de disponibilidad extraíble del subsuelo.

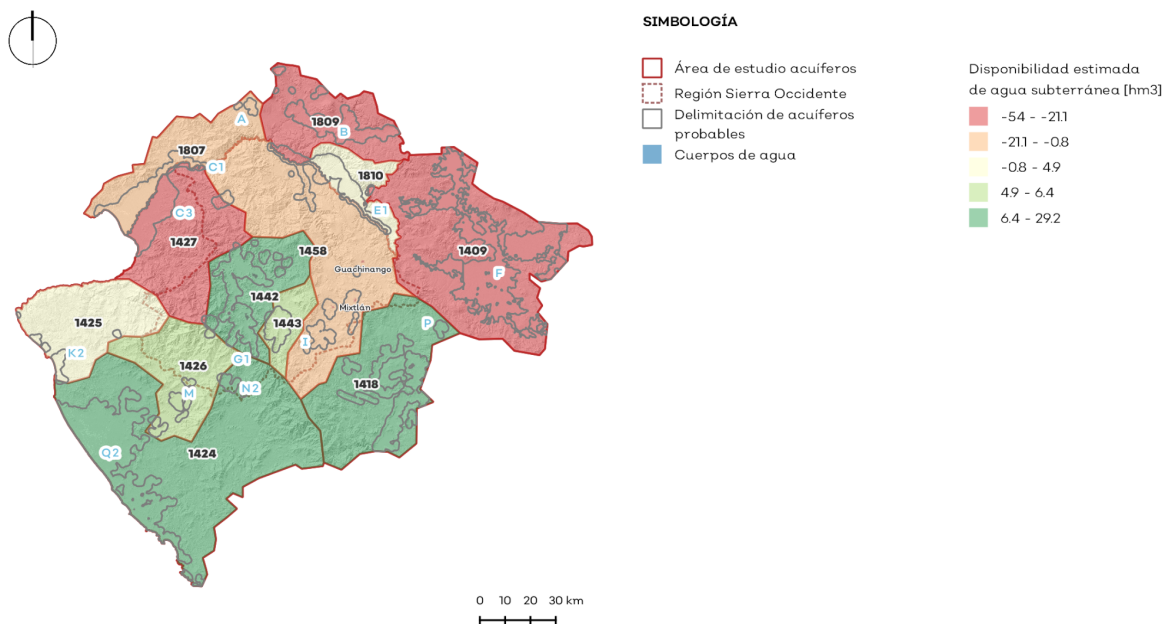


Gráfico 23. Disponibilidad de agua Fuente: Elaboración propia con resultados de recarga, acuíferos por CONAGUA (2020), concesiones REPDA (2020) y resultados de revaporización del modelo SWAT.

Tabla 15. Fuente: Elaboración propia con resultados de recarga, acuíferos por CONAGUA (2020), concesiones REPDA (2020) y resultados de revaporización del modelo SWAT.

Delimitación de acuífero CONAGUA	Recarga agrupada por acuífero CONAGUA [hm ³]	Extracciones por concesión [hm ³]	Revaporización desde la superficie del acuífero [hm ³]	Manantiales [hm ³]	DNC [hm ³]	Balance [hm ³]
1409	300.69	297.48	45.54	4.74	6.94	-54.01
1418	70.68	20.10	21.78	0.54	21.59	6.66
1424	114.78	23.93	40.55	1.14	19.95	29.20
1425	10.70	2.65	3.09	0.17	0.23	4.56
1426	16.26	1.98	7.21	0.05	1.83	5.19
1427	50.47	69.68	14.78	0.67	2.90	-37.56
1442	59.28	6.91	19.35	1.61	21.53	9.88
1443	17.09	1.05	4.55	0.08	5.92	5.49
1458	40.55	11.20	13.79	2.35	14.99	-1.79
1807	58.05	47.25	13.54	0.27	4.54	-7.56
1809	55.34	39.65	14.62	13.43	12.12	-24.48
1810	24.83	6.53	8.36	5.22	4.00	0.71

Bibliografía

- Abbaspour, (2014). Abbaspour, K. C. (2014). SWAT-CUP 2012 User Manual. Obtenido de: http://www.neprashtechology.ca/Downloads/SwatCup/Manual/Usermanual_Swat_Cup_2012.pdf
- Alaska Satellite Facility (2015). Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR. Obtenido de <https://search.asf.alaska.edu/#/?searchType=Baseline%20Search>
- Allen et al. (2006). · Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Estudio FAO, Riego y Drenaje No. 56.
- Aller L, Bennet T, Lehr JH, Petty RJ (1987) DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrologic settings. US EPA report, 600/2-87/035. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, 641 pp
- Arnold et al. (2012). Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, J. J., Srinivasan, R., Santhi, C.; Harmel, R. D.; Van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. J. (2012). SWAT: Model Use, Calibration and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 55 (4):1491-1508.
- Comisión Estatal del Agua (2021). Inventario Estatal de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales: https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/seida/plantas_tratamiento.php
- Comisión Nacional del Agua (1960-2019). Datos climáticos diarios del CLICOM del Sistema Meteorológico Nacional a través del Sistema de Información Hidrológica. Estaciones climáticas superficiales de México administrada por el Servicio

Meteorológico Nacional (SMN). Recuperado de <ftp://climas:climas@sih.conagua.gob.mx/>

Comisión Nacional del Agua (2020). Datos vectoriales de la disponibilidad de los acuíferos. escala 1:250000. Recuperado del Sistema Nacional de Aguas: <https://sigaims.conagua.gob.mx/dma/acuiferos.html>

Comisión Nacional del Agua. (2016). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Obtenido de Base de datos Hidrométricas. Recuperado de <ftp://hidros:hidros@sih.conagua.gob.mx/>

De Alba et al. (2019). Cruz-Sáenz, D., Lazcano, D., Guerrero, S., & Téllez-López, J. (2009). Notes on the Herpetofauna of Western Mexico 2: Distribution Patterns of Reptiles in the Mexican State of Jalisco. Chicago Herpetological Society Bulletin, 44(10), 5 pp. De Alba-Martínez, H. (2019). Servicio ecosistémico de regulación de inundaciones en la microcuenca "El Guayabo", Jalisco, México. Tesis Doctoral, Universidad de Guadalajara.

Diario Oficial de la Federación (2018). ACUERDO por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Río Ipala, Río Tomatlán A, Río Tomatlán B, Río San Nicolás A, Río San Nicolás B, Río Cuitzmala, Río Purificación y Marabasco A, pertenecientes a la Región Hidrológica número 15 Costa de Jalisco. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5514344&fecha=26/02/2018#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación (2023). Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada DOF 08-05-2023. Obtenido de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index.htm>

Foster, S.; Hirata, R. (1988), Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS Technical Report. Lima, Perú. 73 pp.

Hellweger, Ferdi (1997). AGREE - DEM Surface Reconditioning System. Obtenido de <https://www.cae.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>

Instituto de Información Estadística y Geografía (2015). Cartas Geológicas, Escala 1:50,000. INEGI (1971-1973). Digitalizado por IIEG en 2015-2016. Obtenido de Instituto de Información Estadística y Geográfica: <https://iieg.gob.mx/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1979 - 1981). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas F13-11 (Jalisco) escala 1:250 000 serie I, Recuperado de https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-aguas-subterraneas-escala-1-250-000-serie-i-jalisc/resource/bc3c5010-34a5-47a2-98dd-684b55cab03d?inner_span=True

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1979 - 1981). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas F13-11 (Puerto Vallarta) escala 1:250 000 serie I, Recuperado de https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-aguas-subterraneas-escala-1-250-000-serie-i-jalisc/resource/bc3c5010-34a5-47a2-98dd-684b55cab03d?inner_span=True

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1979 - 1981). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas F13-8 (Tepic) escala 1:250 000 serie I, Recuperado de https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-aguas-subterranas-escala-1-250-000-serie-i-jalisco/resource/2badd9a0-826d-4400-9f52-8b6e71dc8b6f?inner_span=True
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Red hidrográfica, regiones hidrológicas, cuencas y subcuencas, escala 1:50,000. Obtenido de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siat/
- National Center for Atmospheric Research (2017). The Climate Data Guide: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). Obtenido de: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>
- Neitsch et al. (2011). Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J.R. (2011). Soil and water assessment tool. Theoretical Documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report no. 406. Texas A&M University system. College station, Texas
- Piscopo, G. (2001). Groundwater vulnerability map explanatory notes - Castlereagh Catchment. Centre for Natural Resources of New SW Department of Land and Water Conservation. Nueva Gales del Sur, Australia. 18 pp.
- Registro Público de Derechos del Agua (2021). Títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Bases de datos del REPDA 2021.
- Rizo Decelis, L. D. (2017). Consideraciones sobre la calidad del agua del río Santiago (México) y cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de su cuenca, para una adecuada gestión y planificación hidrológica. Málaga, Andalucía, España. Tesis doctoral, Universidad de Málaga Facultad de Ciencias.
- Rizo Decelis, L. D. (2017). Consideraciones sobre la calidad del agua del río Santiago (México) y cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de su cuenca, para una adecuada gestión y planificación hidrológica. Málaga, Andalucía, España. Tesis doctoral, Universidad de Málaga Facultad de Ciencias.
- Sameh et al. (2019). Sameh, A. R., B., Uvo, B. C., Martins, J., Domingues, M. L., Anderson, R., Thais, F., & Edmilson, F. (2019). Large-Scale Hydrological Modelling of the Upper Paraná River Basin. Water. 11. 882. 10.3390/w11050882.
- Sánchez et al. (2017). Sánchez, M., Fernández, D. S., Martínez, M., Rubio, E., & Ríos, J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. Tecnología y Ciencias del Agua, 8(5), 141-156
- Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Estado de Jalisco (2020). Cobertura del suelo del Estado de Jalisco. Obtenido de <https://mapa.jalisco.gob.mx/mapa>
- Soulis & Valiantzas. (2012). Soulis, K. X. & Valiantzas J. D. (2012). SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds– the two-CN system approach. Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering. Agricultural University of Athens, Greece.

Aptitud de sitios de disposición final de residuos

La gestión adecuada de los residuos sólidos es un componente esencial para el mantenimiento de un entorno ambiental sano y la preservación de la salud pública. Contar con sistemas de gestión de residuos que se adapten a las circunstancias específicas de cada área es un componente importante para la preservación de la salud pública y el medio ambiente.

Este análisis es un instrumento clave en el plan de Ordenamiento Ecológico Territorial (POET), ya que contribuye a la protección de los recursos naturales, la prevención de riesgos para la salud y la seguridad de la población, y el cumplimiento de regulaciones ambientales y sanitarias.

Métodos y resultados

Se llevó a cabo un análisis multicriterio para determinar las zonas de mayor aptitud para la ubicación de sitios de disposición final el cual consideró una variedad de variables entre las cuales se encuentran las referidas en la NOM-083-SEMARNAT-2003 con el fin de cumplir con las regulaciones ambientales.

Estas variables incluyeron la distancia a localidades rurales y urbanas para minimizar los impactos en las comunidades circundantes, la cercanía a vías de comunicación para asegurar acceso a los sitios de disposición, zonas de inundación, cauces, cuerpos de agua y pozos de extracción para evitar riesgos ambientales y garantizar la protección de fuentes de agua. Las especificaciones y distancias mínimas utilizadas para estas variables fueron las establecidas en la NOM-083-SEMARNAT-2003.

De igual forma se evaluó el uso actual del suelo, donde se catalogaron como aptos únicamente pastizales inducidos y suelo desnudo. Se consideraron también las zonas agrícolas, otorgándoles una ponderación menor a los usos mencionados anteriormente. La peligrosidad de deslizamientos y la vulnerabilidad del agua subterránea se evaluaron para prevenir situaciones de riesgo y contaminación. Se tomaron como aptas pendientes de terreno menores a 15% (Dávila, C., 2021) y la presencia de Áreas Naturales Protegidas (ANP) y sitios prioritarios para la conservación, como el corredor del jaguar, se tuvieron en cuenta para resguardar áreas ecológicamente sensibles. Finalmente, se excluyeron áreas de menos de 5 hectáreas.

La siguiente tabla detalla las especificaciones y distancias mínimas para cada variable.

Tabla 16. Parámetros para el análisis multicriterio de la selección de sitios aptos para la disposición final de residuos sólidos urbanos.

Fuente: elaboración propia utilizando datos de la NOM-083-SEMARNAT-2003 y (Dávila, C., 2021)

Variable	Criterio
Localidades rurales y urbanas	Distancias iguales o mayores a 500 m según las especificaciones para la selección del sitio NOM-083-SEMARNAT-2003
Cobertura	Cobertura de pastizales inducidos, suelo desnudo y zonas agrícolas según la metodología sugerida por Dávila, C. 2021
Accesibilidad/Vías de comunicación	Distancias iguales o mayores a 500 m, según la metodología sugerida por Dávila, C. 2021

Variable	Criterio
Zonas de inundación	Distancias mayores a 0m, según las especificaciones para la selección del sitio NOM-083-SEMARNAT-2003
Cauces y cuerpos de agua	Distancias mayores a 1,500 m según la metodología sugerida por Dávila, C. 2021
Pozos de extracción	Distancias iguales o mayores a 500 m, según las especificaciones para la selección del sitio NOM-083-SEMARNAT-2003
Zonas susceptibles a deslizamientos	Zonas no susceptibles a deslizamiento según la metodología sugerida por Dávila, C. 2021
Zonas de alta vulnerabilidad de agua subterránea	Zonas sin vulnerabilidad de agua subterránea según la metodología sugerida por Dávila, C. 2021
Pendiente	Pendientes menores a 15%, según la metodología sugerida por Dávila, C. 2021
ANPs y zonas prioritarias para la conservación	Distancias iguales o mayores a 500 m, según las especificaciones para la selección del sitio NOM-083-SEMARNAT-2003

Los resultados de este análisis no tienen como objetivo la selección definitiva de los sitios de disposición final, pero sí definen las áreas más adecuadas para su ubicación. Los criterios que se deben evaluar dependen de las particularidades de la región y de la demanda de la población que se beneficiará de estos sitios. En el Gráfico 25 se presentan de manera resumida las principales dimensiones que se consideraron en este análisis.

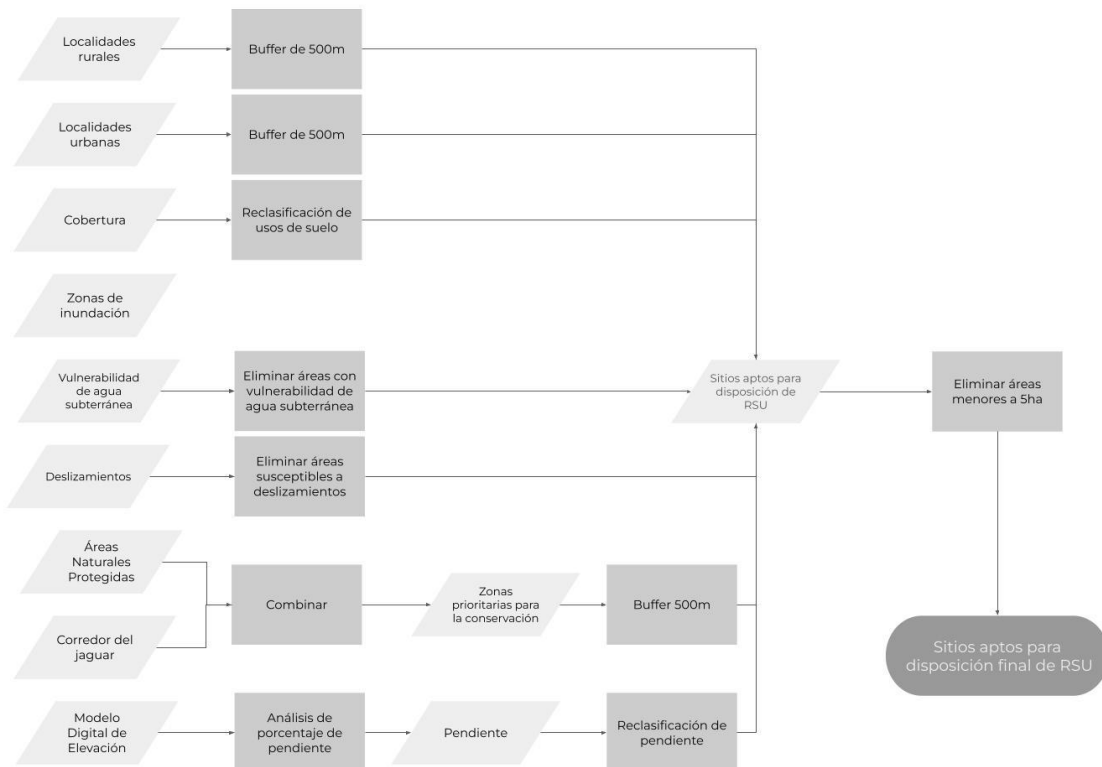


Gráfico 25. Análisis multicriterio para la aptitud de sitios de disposición final
Fuente: Elaboración propia utilizando datos de la NOM-083-SEMARNAT-2003 y (Dávila, C., 2021)

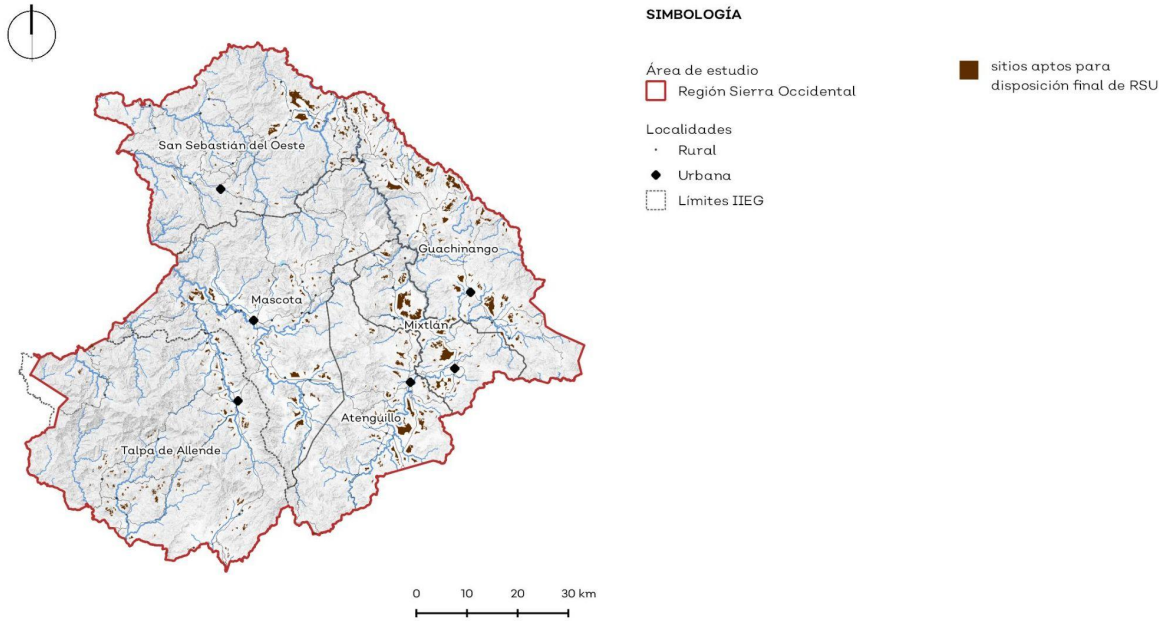


Gráfico 24. Análisis multicriterio para la aptitud de sitios de disposición final
 Fuente: Elaboración propia utilizando datos de la NOM-083-SEMARNAT-2003 y (Dávila, C., 2021)

Bibliografía

- Abbaspour, (2014). Abbaspour, K. C. (2014). SWAT-CUP 2012 User Manual. Obtenido de: http://www.neprashtechology.ca/Downloads/SwatCup/Manual/Usermanual_Swat_Cup_2_012.pdf
- Alaska Satellite Facility (2015). Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR. Obtenido de <https://search.asf.alaska.edu/#/?searchType=Baseline%20Search>
- Allen et al. (2006). · Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Estudio FAO, Riego y Drenaje No. 56.
- Aller L, Bennet T, Lehr JH, Petty RJ (1987) DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrologic settings. US EPA report, 600/2-87/035. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, 641 pp
- Arnold et al. (2012). Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, J. J., Srinivasan, R., Santhi, C.; Harmel, R. D.; Van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. J. (2012). SWAT: Model Use, Calibration and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 55 (4):1491-1508.
- Atlas Estatal de Riesgos del Estado de Jalisco. (2013). Gobierno de Jalisco. <https://www.jalisco.gob.mx/es/atlas-de-riesgos-del-estado-de-jalisco>
- Avila Lugo, F., Merida Cruz, A. A., Salinas, J., & Saenz, R. (1998). Informe Final Complementario a la Cartografía Geológico-Minera y Geoquímica Escala 1:250 000 Puerto Vallarta F13-11. Consejo de Recursos Minerales.
- Barrera, D., Rosas-Elguera, J., Pérez, G., & Valladolid, R. (2001). CARTA GEOLÓGICO-MINERA MASCOTA F13-D64. Consejo de Recursos Minerales.
- Barrera, C., Camargo, C., & Vázquez, R. (2008). San Juan de Abajo, F13-C59. Servicio Geológico Mexicano.
- Barrera, C., & Ramírez, A. (2012). Texto Explicativo de la Carta Geológico-Minera Llano Grande F13-D81 (p. 51). Servicio Geológico Mexicano.

Centeno-García, E., Guerrero-Suástegui, M., Talavera-Mendoza, O. (2008). The Guerrero composite terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone.

Comisión Estatal del Agua (2021). Inventario Estatal de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales: https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/seida/plantas_tratamiento.php

Comisión Nacional del Agua (1960-2019). Datos climáticos diarios del CLICOM del Sistema Meteorológico Nacional a través del Sistema de Información Hidrológica. Estaciones climáticas superficiales de México administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Recuperado de ftp://climas:climas@sih.conagua.gob.mx/

Comisión Nacional del Agua (2020). Datos vectoriales de la disponibilidad de los acuíferos. escala 1:250000. Recuperado del Sistema Nacional de Aguas: <https://sigaims.conagua.gob.mx/dma/acuiferos.html>

Comisión Nacional del Agua. (2016). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Obtenido de Base de datos Hidrométricas. Recuperado de ftp://hidros:hidros@sih.conagua.gob.mx/

Dávila, Carlos. (2021). Criterios y métodos para seleccionar la ubicación de los rellenos sanitarios. Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable. 5. 9. 10.25127/aps.20212.764.

De Alba et al. (2019). Cruz-Sáenz, D., Lazcano, D., Guerrero, S., & Téllez-López, J. (2009). Notes on the Herpetofauna of Western Mexico 2: Distribution Patterns of Reptiles in the Mexican State of Jalisco. Chicago Herpetological Society Bulletin, 44(10), 5 pp.

De Alba-Martínez, H. (2019). Servicio ecosistémico de regulación de inundaciones en la microcuenca "El Guayabo", Jalisco, México. Tesis Doctoral, Universidad de Guadalajara.

De la Teja, M., & Pérez, L. (2007). INFORME DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA EL TULE F13-C89. Servicio Geológico Mexicano.

Diario Oficial de la Federación (2018). ACUERDO por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Río Ipala, Río Tomatlán A, Río Tomatlán B, Río San Nicolás A, Río San Nicolás B, Río Cuitzmala, Río Purificación y Marabasco A, pertenecientes a la Región Hidrológica número 15 Costa de Jalisco. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5514344&fecha=26/02/2018#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación (2023). Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada DOF 08-05-2023. Obtenido de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index.htm>

Durán, H., Sánchez, E., Salas, H., & Cham, C. (2004). INFORME DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA EL TUITO F13-C79. Consejo de Recursos Minerales.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57(3), 343-378.

Foster, S.; Hirata, R. (1988), Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS Technical Report. Lima, Perú. 73 pp.

Hellweger, Ferdi (1997). AGREE - DEM Surface Reconditioning System. Obtenido de <https://www.cae.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>

Instituto de Información Estadística y Geografía (2015). Cartas Geológicas, Escala 1:50,000. INEGI (1971-1973). Digitalizado por IIEG en 2015-2016. Obtenido de Instituto de Información Estadística y Geográfica: <https://iieg.gob.mx/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1979 - 1981). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas F13-11 (Jalisco) escala 1:250 000 serie I, Recuperado de <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-ag>

[uas-subterraneas-escala-1-250-000-serie-i-jalisco/resource/bc3c5010-34a5-47a2-98dd-684b55cab03d?inner_span=True](https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-aguas-subterraneas-escala-1-250-000-serie-i-jalisco/resource/bc3c5010-34a5-47a2-98dd-684b55cab03d?inner_span=True)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1979 - 1981). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas F13-11 (Puerto Vallarta) escala 1:250 000 serie I, Recuperado de

https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-aguas-subterraneas-escala-1-250-000-serie-i-jalisco/resource/bc3c5010-34a5-47a2-98dd-684b55cab03d?inner_span=True

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1979 - 1981). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas F13-8 (Tepic) escala 1:250 000 serie I, Recuperado de https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-aguas-subterraneas-escala-1-250-000-serie-i-jalisco/resource/2badd9a0-826d-4400-9f52-8b6e71dc8b6f?inner_span=True

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Red hidrográfica, regiones hidrológicas, cuencas y subcuencas, escala 1:50,000. Obtenido de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siat/

Maciel, R., Sánchez, S., & Silva, J. (2001). Carta Geológico-Minera San Felipe de Híjar F13-D51. Consejo de Recursos Minerales.

National Center for Atmospheric Research (2017). The Climate Data Guide: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). Obtenido de: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>

Neitsch et al. (2011). Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J.R. (2011). Soil and water assessment tool. Theoretical Documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report no. 406. Texas A&M University system. College station, Texas

Piscopo, G. (2001). Groundwater vulnerability map explanatory notes - Castlereagh Catchment. Centre for Natural Resources of New SW Department of Land and Water Conservation. Nueva Gales del Sur, Australia. 18 pp.

Paz, A., Torres, J., & Durán, H. (2005). INFORME DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA COMPOSTELA, CLAVE F13-D41. Consejo de Recursos Minerales.

Registro Público de Derechos del Agua (2021). Títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Bases de datos del REPDA 2021.

Rizo Decelis, L. D. (2017). Consideraciones sobre la calidad del agua del río Santiago (México) y cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de su cuenca, para una adecuada gestión y planificación hidrológica. Málaga, Andalucía, España. Tesis doctoral, Universidad de Málaga Facultad de Ciencias.

Rizo Decelis, L. D. (2017). Consideraciones sobre la calidad del agua del río Santiago (México) y cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de su cuenca, para una adecuada gestión y planificación hidrológica. Málaga, Andalucía, España. Tesis doctoral, Universidad de Málaga Facultad de Ciencias.

Sameh et al. (2019). Sameh, A. R., B., Uvo, B. C., Martins, J., Domingues, M. L., Anderson, R., Thais, F., & Edmilson, F. (2019). Large-Scale Hydrological Modelling of the Upper Paraná River Basin. Water. 11. 882. 10.3390/w11050882.

Sánchez et al. (2017). Sánchez, M., Fernández, D. S., Martínez, M., Rubio, E., & Ríos, J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. Tecnología y Ciencias del Agua, 8(5), 141-156

Sánchez, J., & Ávila, F. (2001). CARTA GEOLÓGICO-MINERA TALPA DE ALLENDE F13-D71. Consejo de Recursos Minerales.

Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Estado de Jalisco (2020). Cobertura del suelo del Estado de Jalisco. Obtenido de <https://mapa.jalisco.gob.mx/mapa>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Ciudad de México: SEMARNAT.

Soulis & Valiantzas. (2012). Soulis, K. X. & Valiantzas J. D. (2012). SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds- the two-CN system approach. Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering. Agricultural University of Athens, Greece

Vásquez, R., Romo, J., & Gracia, M. (2001). INFORME GEOQUIMICO DE LA CARTA GEOLÓGICO - MINERA Y GEOQUÍMICA GUACHINANGO CLAVE F13-D62. Consejo de Recursos Minerales.

Geología/estratigrafía

Introducción

Una columna estratigráfica es una herramienta importante para comprender la historia geológica de un área determinada y proporciona información valiosa sobre la litología, espesor y volumen, estructuras primarias, distribución y relaciones de contacto, contenido fósil, ambientes de depósito, determinación de los sistemas sedimentarios, geometría y orientación de los cuerpos sedimentarios, discordancias y caracterización.

Métodos y resultados

La columna estratigráfica que se presenta a continuación representa la sucesión de rocas que se encuentran en la región Sierra Occidental la cual cubre los municipios de Atenguillo, Guachinango, Mascota, Mixtlán, San Sebastián del Oeste y Talpa de Allende. En el contexto geológico esta región se ubica en una zona donde convergen 3 distintas provincias fisiográficas que ordenadas de mayor antigüedad a la más reciente son las siguientes: Sierra Madre del Sur, Sierra Madre Occidental y el Eje Volcánico Transmexicano. Por último es importante mencionar que la región se ubica en la zona conocida como Terreno compuesto Guerrero particularmente en el terreno Zihuatanejo (Centeno et al, 2008).

Para la realización de esta columna se utilizaron las cartas geológico mineras elaboradas por el Servicio Geológico Mexicano las cuales se encuentran disponibles en el sitio web de Geoinfomex. En estas cartas encontramos la temporalidad estimada para las diferentes formaciones rocosas así mismo se tomaron como guía las diferentes columnas estratigráficas ahí expuestas.

La columna estratigráfica está representada por 27 unidades litoestratigráficas que abarcan desde el Triásico-Jurásico hasta el Reciente. En ella podemos encontrar los tres tipos de rocas conocidos: Metamórficas, Sedimentarias e ígneas. Se describen brevemente a continuación.

La primera unidad es una capa de esquistos y metaareniscas llamada informalmente como esquisto vallarta en la carta de San Juan de abajo, Esta unidad se encuentra en la base de la columna. Enseguida una sucesión volcano-sedimentaria ampliamente representada en la región, en las primeras etapas de esta podemos distinguir una capa de andesitas con lutitas, luego de esta tenemos arenisca intercalada con andesitas y una riocacita mezclada con brecha riolítica. Entre las dos unidades anteriores encontramos un pórfido riolítico. Por sobre estas unidades existen dos capas que son contemporáneas una de andesitas con forma de almohadilla y otra de toba andesítica donde también se intercalan andesitas. El resto de esta secuencia simplemente se describe como vulcano sedimentaria. Es importante mencionar que al interior de esta encontramos caliza metamorfozada.

En orden ascendente la unidad contigua a esta es una de brechas volcánicas, la cual está en contacto con tobas andesíticas que se entremezclan con tobas riolíticas y una capa de conglomerado polimíctico que se sobrepone parcialmente a ambas. El periodo Cretácico termina con una capa de toba riolítica que se extiende hasta finales del paleoceno. En lo concerniente al cretácico podemos mencionar como cuerpos intrusivos a uno conformado por Granito-Granitodiorita conocido como “batolito Puerto Vallarta”.

En la columna también apreciamos diferentes unidades del periodo terciario. En este periodo existen principalmente tobas de naturaleza riolítica (dos unidades). Existe una capa de conglomerado polimíctico que se intercala con lavas de naturaleza andesítica y sobre este tenemos basaltos que inician en el plioceno pero se encuentran hasta el mediados del pleistoceno. Para este periodo se registran múltiples cuerpos intrusivos: tres de ellos en el eoceno y un cuarto correspondiente al mioceno. Dos de ellos son pórfidos (riolítico y andeístico respectivamente) y los otros dos se distinguen entre sí por su afinidad hacia el granito o la diorita (Granito-granodiorita Y Granodiorita-granito).

El cuaternario es un periodo de menor complejidad en cuanto a las unidades se refiere ya que solo se cuenta con 5 de esta temporalidad. Es notable el dominio durante el pleistoceno de lavas de tipo andeístico o de tipo basáltico. Durante el holoceno solo encontramos capas producto de la erosión de los cuerpos preexistentes como lo son el aluvión, el conglomerado polimíctico y lutitas con arenas.

En resumen estas unidades pueden explicarse por la actividad volcánico tectónica de la región. Durante el mesozoico la región correspondía a un arco volcánico insular separado de la costa por un mar intracontinental. Entonces todos los depósitos asociados a la secuencia volcánico sedimentaria (conocida como Formación Tepalcatepec), así como tobas, brechas y lavas se asocian con estos volcánicos cretácicos. En cuanto al batolito de vallarta este se considera como las raíces de aquellos cuerpos volcánicos.

Con el advenimiento de la orogenia Laramide por la subducción de la placa de Farallón bajo la Norte América y la apertura del Golfo de California. Estos mares interiores desaparecen y comienza un proceso de elevación. Aunado a este evento tenemos el emplazamiento de la provincia ígnea silícica más grande del mundo, la Sierra Madre Occidental (SMO). Para la SMO se distinguen en la región tres de los cinco conjuntos ígneos principales: rocas plutónicas y volcánicas del Cretácico Superior-Paleoceno, el Complejo Volcánico Inferior y el Supergrupo Volcánico Superior (Ferrari et al., 2005). Finalmente reconocemos la actividad del Eje Volcánico Transmexicano, en las lavas calcoalcalinas y medias emplazadas desde el plioceno hasta el pleistoceno, así como los diferentes aparatos volcánicos dispersos por la región.

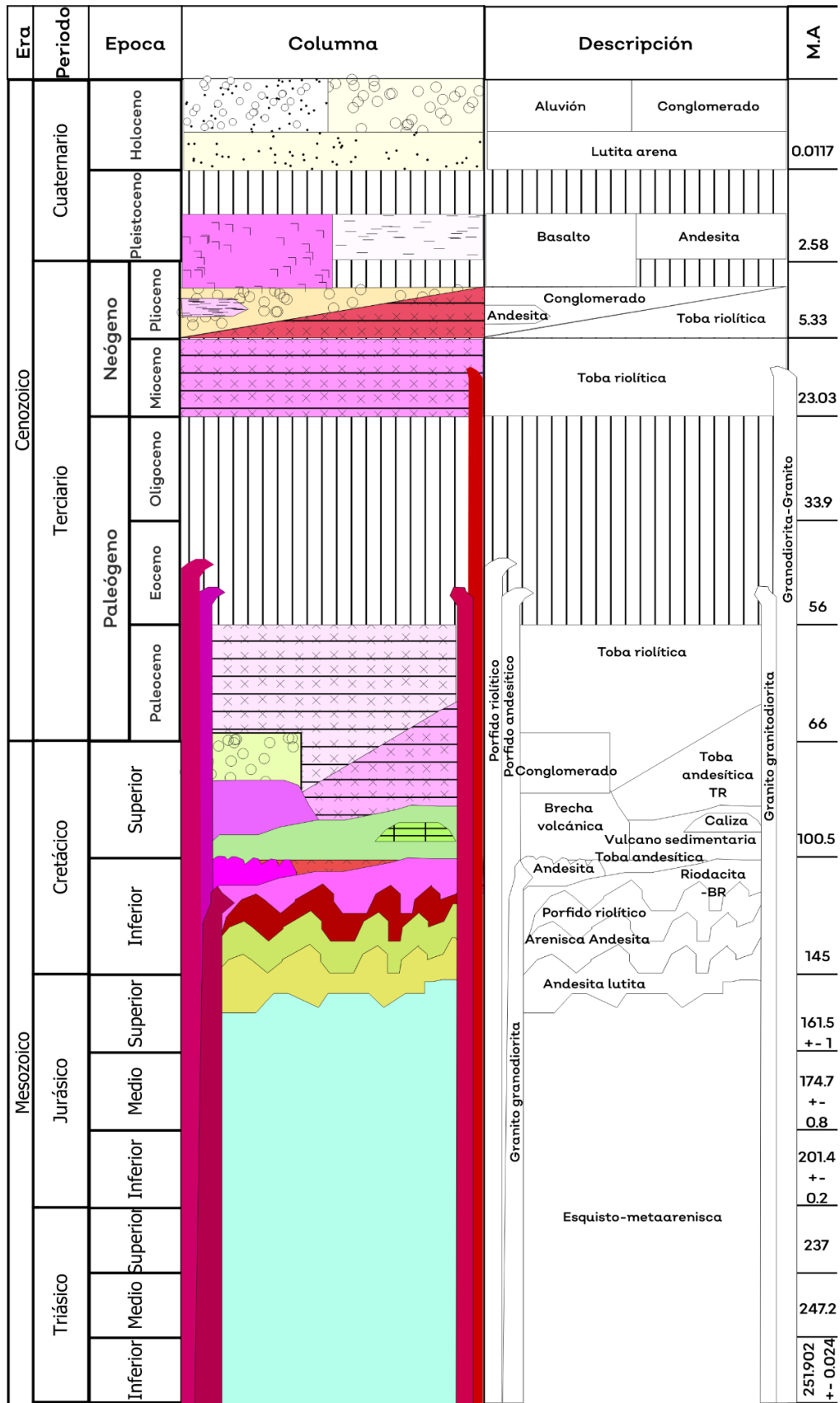


Gráfico 1. Columna estratigráfica de la Región Sierra Occidental elaborado con base en las cartas Geológico Mineras escala 1 a 50 000 de Amatlán, Ameca, Atenguillo, Atengo, Ayutla, Compostela, Guachinango, Llano grande, Mascota, San Juan de abajo, San Felipe de Hajar, Talpa de Allende, El Tuito, El Tule y escala 1 a 250 000 de Puerto Vallarta.

Bibliografía

Centeno-García, E., Guerrero-Suástegui, M., Talavera-Mendoza, O. (2008). The Guerrero composite terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378.

Referencias de la columna y de tipos de rocas y relaciones

Atlas Estatal de Riesgos del Estado de Jalisco. (2013). Gobierno de Jalisco. <https://www.jalisco.gob.mx/es/atlas-de-riesgos-del-estado-de-jalisco>

Maciel, R., Sánchez, S., & Silva, J. (2001). Carta Geológico-Minera San Felipe de Híjar F13-D51. Consejo de Recursos Minerales.

Barrera, D., Rosas-Elguera, J., Pérez, G., & Valladolid, R. (2001). CARTA GEOLÓGICO-MINERA MASCOTA F13-D64. Consejo de Recursos Minerales.

Vásquez, R., Romo, J., & Gracia, M. (2001). INFORME GEOQUÍMICO DE LA CARTA GEOLÓGICO - MINERA Y GEOQUÍMICA GUACHINANGO CLAVE F13-D62. Consejo de Recursos Minerales.

Avila Lugo, F., Merida Cruz, A. A., Salinas, J., & Saenz, R. (1998). Informe Final Complementario a la Cartografía Geológico-Minera y Geoquímica Escala 1:250 000 Puerto Vallarta F13-11. Consejo de Recursos Minerales.

Durán, H., Sánchez, E., Salas, H., & Cham, C. (2004). INFORME DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA EL TUITO F13-C79. Consejo de Recursos Minerales.

Sánchez, J., & Ávila, F. (2001). CARTA GEOLÓGICO-MINERA TALPA DE ALLENDE F13-D71. Consejo de Recursos Minerales.

Barrera, C., Camargo, C., & Vázquez, R. (2008). San Juan de Abajo, F13-C59. Servicio Geológico Mexicano.

Barrera, C., & Ramírez, A. (2012). Texto Explicativo de la Carta Geológico-Minera Llano Grande F13-D81 (p. 51). Servicio Geológico Mexicano.

De la Teja, M., & Pérez, L. (2007). INFORME DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA EL TULE F13-C89. Servicio Geológico Mexicano.

Paz, A., Torres, J., & Durán, H. (2005). INFORME DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA COMPOSTELA, CLAVE F13-D41. Consejo de Recursos Minerales.