

# Anexo 1.2. Hidrología

El presente documento recopila los procedimientos junto con los resultados de los análisis hidrológicos generados para el área de estudio. La base para el desarrollo de estos análisis son los sistemas de información geográfica (SIG), en donde se genera información geoespacial que después es tratada en hojas de cálculo y representada en esta memoria técnica. El documento se subdivide en ocho apartados en donde cada uno representa un tipo de análisis hidrológico, tomando en cuenta la complejidad y extensión del análisis técnico de cada uno:

1. Delimitación de microcuencas
2. Modelo de ArcSWAT
3. Concesiones superficiales y subterráneas
4. Disponibilidad superficial
5. Disponibilidad subterránea
6. Zonas potenciales de almacenamiento de agua subterránea
7. Agua residual
8. Susceptibilidad hídrica

En seguida se describen los análisis enlistados, cada uno con la descripción del proceso llevado a cabo, tipo de metodología empleada y los resultados encontrados que son relevantes para lograr un mejor entendimiento de las dinámicas dentro del área de estudio.

## 1. Delimitación de microcuencas

### Introducción

Este apartado contiene el tren de pensamiento y la metodología que se llevó a cabo para delimitar las microcuencas del área de estudio.

### Datos de partida y procesamiento de la información

Se partió de los polígonos de las subcuencas INEGI en las que se encuentra el área de estudio. Se utiliza ArcHydro, para realizar la delimitación de microcuencas y se requiere la siguiente información de entrada:

- Modelo de elevación digital (MDE), ALOS PALSAR de 12.5 metros (ASF, 2011) recortado al polígono de las subcuencas INEGI que abarca el área de estudio.
- Red hidrológica, escala 1:50,000 (INEGI,2010)
- Presas y cuerpos de agua

Es importante mencionar que es necesario que dicho modelo, y la red de drenaje se encuentren en el mismo sistema de coordenadas en las que se vaya trabajar, en esta ocasión se trabajó con UTM, Zona 14, Datum WGS84, ya que este sistema se encuentra en

metros y facilita en las mediciones, de lo contrario, podría causar error en los procesos subsiguientes; además, es importante señalar que a la red de drenaje se le realizó una corrección satelital, debido a que los escurrimientos no seguían el cauce marcado en la imagen satelital.

## Metodología

A continuación, se describe paso a paso el procedimiento seguido:

1. El primer paso consiste en preparar el MDE para rellenar posibles depresiones o defectos que tenga el MDE. Esto se realizó con la herramienta *"fill sinks"*.
2. A continuación, se *"quema"* la red de drenaje (red hidrográfica INEGI corregida) con *"DEM Reconditioning"*, esto es corregir efectos de la variación de la pendiente debido a la cobertura vegetal y obliga al DEM a seguir la red de drenaje pre-establecida. Además, se utilizó la capa de presas y cuerpos de agua identificados previamente ([Cuerpo de agua](#)); el modelo se ajustó a estos sumideros para que fueran considerados los cambios en la pendiente, la herramienta que se utilizó fue *"level DEM"*, nuevamente se corrió *fill sinks* como paso final para la preparación del MDE.
3. El tercer paso consistió en modelar la red drenaje con formato raster a partir del archivo MDE ya corregido en el paso 1. Para ello, se utilizaron las herramientas: *"Flowdir"*, *"Flow Accumulation"*, *"Stream Definition"*, en este orden. El resultado del uso de las 3 herramientas fue una capa con la dirección de flujo, otra donde se identifica qué puntos reciben flujo de otros puntos y una tercera que contiene los puntos en los que se vierte mayor flujo de agua. Es en este momento cuando se debe asignar el área específica que recibirá un flujo, en nuestro caso el valor fue de 35 km<sup>2</sup>, este umbral se seleccionó para homologar el tamaño al que se modelaron las microcuencas de los instrumentos de ordenamiento regionales.
4. El cuarto paso consta de la segmentación de la red de drenaje y su vectorización, mediante los procesos aplicados en las herramientas *"Stream Segmentation"* y *"Drainage Line Processing"*, sucesivamente.
5. Una vez obtenida la red de drenaje segmentada y en formato vectorial, se procedió a delimitar las cuencas con la herramienta *"Catchment Grid Delineation"*. A continuación, este ráster se pasa a formato vectorial con *"Catchment Polygon Processing"*, donde resulta una cantidad de 115 microcuencas para las subcuencas: R. Encarnación, R. Grande, R. Turbio - P- Palote y R. de Lagos.



Figura 1. Microcuencas modeladas para las subcuencas INEGI del área de estudio  
Fuente: Elaboración propia

Se prosiguió a unir las microcuencas que drenan en el mismo punto para disminuir el número de unidades de gestión ambiental en las que se convertirán en un futuro.



Figura 2. Microcuencas unidas del área de estudio hidrológico  
Fuente: Elaboración propia

Terminando este proceso y seleccionando las microcuencas que se encuentran dentro del límite del municipio o intersectan con él, se tienen un total de 25 microcuencas para el área de estudio hidrológico.

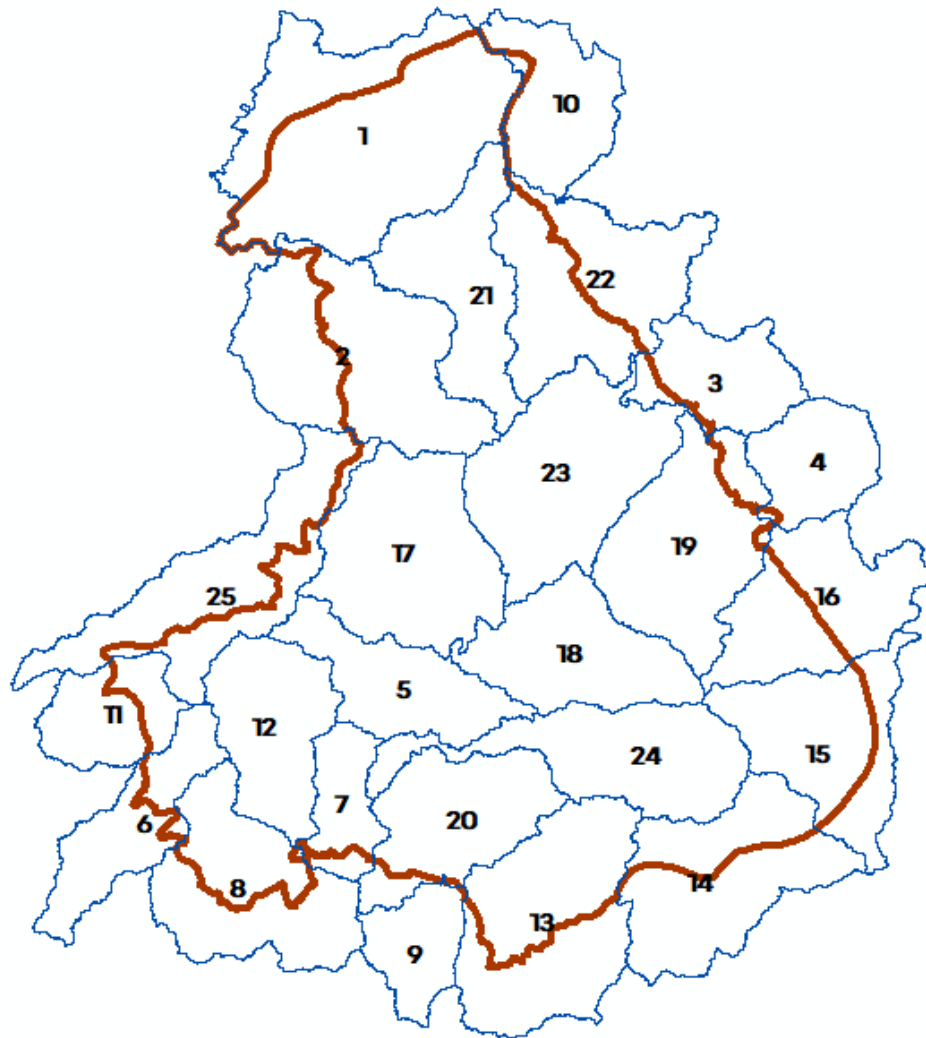


Figura 3. Microcuencas seleccionadas para el área de estudio hidrológico (Total de 25).

Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Se tienen un total de 25 microcuencas modeladas para el área de estudio hidrológico de Lagos de Moreno. A continuación se adjunta la propuesta del mapa final de microcuencas donde se hace distinción entre las subcuencas a las que pertenecen las microcuencas del área de estudio.

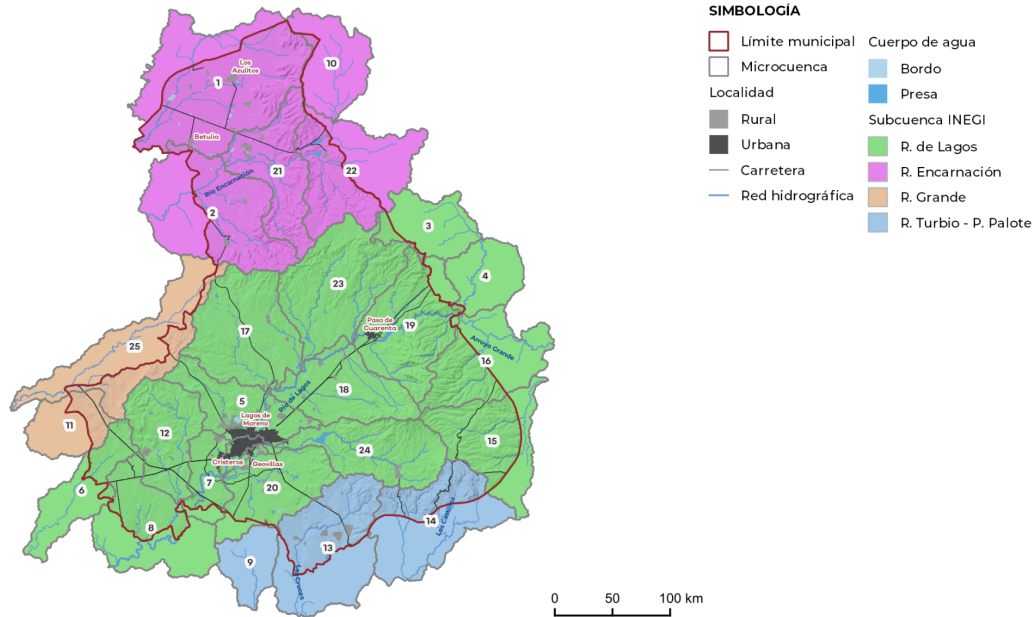


Figura 4. Propuesta de Mapa final de Microcuencas del área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia

## Bibliografía

ASF Data Search Vertex. (2011). Mapa de pendientes clasificado con base en imágenes satelitales. EARTHDATA. Recuperado de: <https://vertex-retired.daac.asf.alaska.edu/#>

INEGI (2010). Red hidrográfica de las subcuencas R. Encarnación, R. Grande, R. Lagos y R. Turbio - P. Palote 1:50000. Recuperado de: [https://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siat/](https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siat/)

## 2. Modelo de ArcSWAT

### Introducción

Esta memoria describe el proceso que sigue al de la delimitación de microcuencas, esto es, el modelo SWAT, cuyo objetivo es obtener un valor de escurrimiento medio anual por microcuena, y que supone el paso previo para determinar la disponibilidad hídrica superficial.

El objetivo principal del modelo SWAT, para este caso particular, es obtener un valor de escurrimiento medio anual por microcuena. Esto se logra por medio de la modelación de los procesos hidrológicos que ocurren en el área de estudio hidrológico a lo largo de un periodo de años. El modelo recibe *inputs* como las condiciones meteorológicas (precipitación y temperatura) y características intrínsecas del área de estudio, como el

relieve, uso y tipo de suelo. Utilizando estos insumos al final se obtiene un registro de volúmenes de agua a lo largo del tiempo modelado, desglosado por microcuenca.

Una vez teniendo el modelo, es necesario proceder a la etapa de calibración en la cual se utilizan datos hidrométricos históricos para calibrar el gasto medio modelado con el gasto medio observado. Este procedimiento se describe en el apartado: "Calibración de modelo SWAT."

Por último, se realiza el cálculo de la disponibilidad media anual por microcuenca utilizando la metodología de la 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. Esta metodología llevada a cabo para el área de estudio se describe en el apartado "4. Disponibilidad superficial"

A continuación, se enlistan los pasos que se siguieron para desarrollar el modelo de ArcSWAT. Se incluyen capturas de pantalla para simplificar el procedimiento y al final hay una sección de notas particulares sobre el modelo del AEH de Lagos de Moreno.

## Datos de partida y preprocesamiento

- Modelo Digital de Elevación (MDE) (ASF, 2011), en formato ráster recortado al polígono del AEH. Es importante que el MDE de partida sea de alta resolución para obtener resultados precisos, el de esta fuente tiene una resolución de 12.5 m.
- Red hidrológica (INEGI, 2010), en formato vectorial. Esta red, fue quemada al MDE para que sean apreciables los cauces naturales en el relieve,
- Uso de suelo y vegetación (SEMADET, 2020).
- Cuerpos de agua (CONAGUA, 2020).
- Edafología (IIEG, 2015), en formato vectorial.
- Pendiente (Elaboración propia, 2022), creada a partir del MDE (ASF, 2011).
- Precipitación (CONAGUA, 1983-2018). Con el fin de tener unos datos de precipitación adecuados para el modelo, se realizó una depuración de la base de datos de CONAGUA. Este procesamiento de datos se explica a continuación.

## Procesamiento de los datos de precipitación

Para realizar el modelo SWAT se debe seleccionar un periodo de mínimo 20 años y preferentemente que este periodo tenga la misma temporalidad a lo largo de todos los años (años húmedos o años secos). El primer paso es ubicar todas las estaciones climatológicas que se encuentran dentro del AEH, una vez sabiendo cuales son, se descargan los datos diarios de temperatura mínima, media, máxima y la precipitación de todas estas estaciones. Posteriormente, se hace un análisis para seleccionar la mayor cantidad de estaciones que tienen más datos para un periodo de mínimo 20 años.

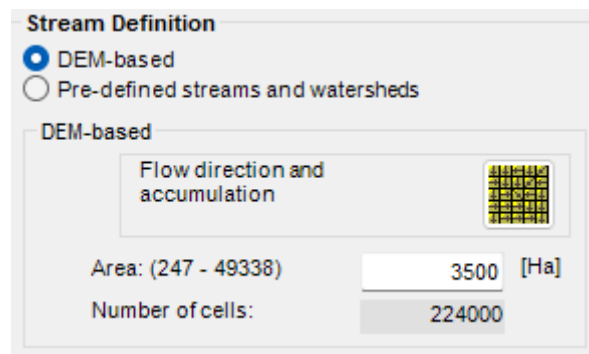
Para el caso de las microcuencas objeto de estudio se utilizaron 22 estaciones climatológicas para la precipitación y temperatura. El periodo de años con más datos disponibles para la mayor cantidad de estaciones fue del 1/1/1983 al 31/12/2018.

## Procedimiento

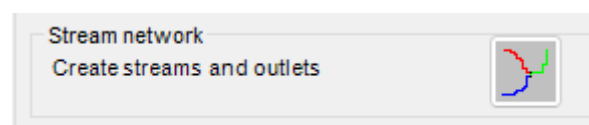
A continuación, se describe el procedimiento llevado a cabo para crear el Modelo SWAT del área de estudio.

El primer paso es crear un nuevo proyecto ArcSWAT utilizando la herramienta SWAT y se le da la ubicación de la carpeta para guardar el proyecto.

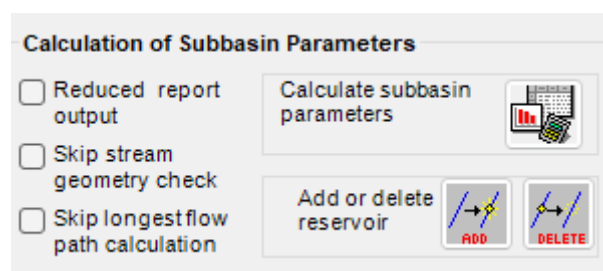
1. Se abre la pestaña “Automatic Watershed Delineation”
  - Se comienza importando el MDE
  - Se le da la opción de “burn in” para quemar red de drenaje (SIATL, 2010) previamente corregida mediante imágenes satelitales.
  - En el apartado de “Stream definition” se modelan los escurrimientos y las subcuencas con base al MDE, mismo procedimiento que se realizó previamente en el archydro, en DEM-based “flow direction” and flow accumulation”, con un área de 3500 Ha.



Se prosigue con la opción de Stream network en donde el programa define automáticamente la red de escorrentías y en donde (en que subcuenca desemboca cada una. Esto crea automáticamente los puntos de outlet para cada subcuenca.



A continuación, se utiliza la opción de “calculate subbasin parameters” se generan curvas hipsométricas para cada subcuenca y entrega un reporte topográfico por subcuenca.



Posteriormente se procede a agregar puntualmente las presas dentro del área de estudio y que se cuente con información disponible. En este caso, se agregó el shp de cuerpos de agua.

El siguiente paso es el análisis de las unidades de respuesta hidrológica por sus siglas en inglés (HRUs), a partir de asignación de uso de suelo, tipo de suelo y clasificación de pendiente.

Se utilizó la capa de uso de Suelo y vegetación de Jalisco (SEMADET, 2020) recortada al polígono que abarca el área de estudio hidrológico. Una vez teniendo esta capa, se prosiguió a clasificar cada uso conforme a como lo pide el programa SWAT. Se creó un archivo .txt con la clasificación del SWAT para utilizarla como "lookuptable" y darle valores a cada uso.

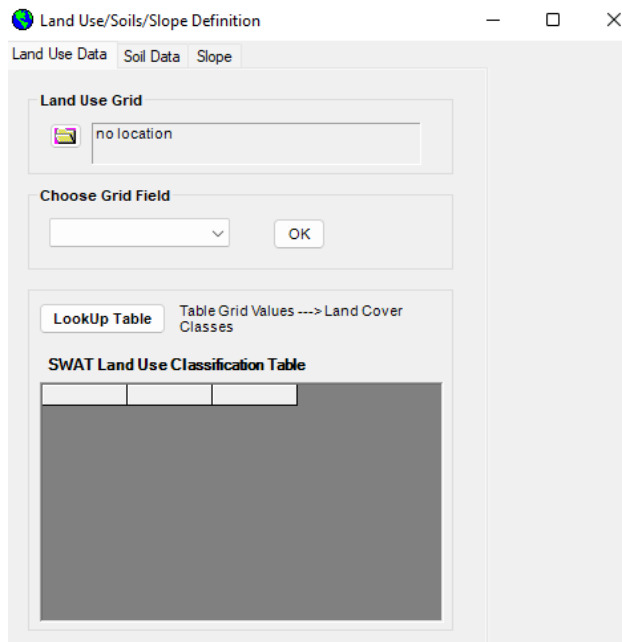
USV_micro_v4						
FID	Shape	LEYENDA	SAMOF_18	VALUE	LandUse	
0	Polygon	Agua	32	11	WATR	
1	Polygon	Bosque de Coníferas	1	42	FRSE	
2	Polygon	Bosque de Encino-Galería	3	43	FRST	
3	Polygon	Bosque de Mezquite	14	52	RNGB	
4	Polygon	Mezquital Xerófilo	14	52	RNGB	
5	Polygon	Pastizales Cultivados e Inducidos	280	81	HAY	
6	Polygon	Pastizales Naturales	28	71	RNGE	
7	Polygon	Selva Baja Caducifolia	12	41	FRSD	
8	Polygon	Selva Mediana Perennifolia	1	42	FRSE	
9	Polygon	Selva Mediana Subcaducifolia	3	43	FRST	
10	Polygon	Selva Mediana Subperennifolia	1	42	FRSE	
11	Polygon	Suelo Desnudo	31	31	BARR	
12	Polygon	Tierras Agrícolas Cultivos Anuales	290	82	AGRR	
13	Polygon	Tierras Agrícolas Cultivos Perennes	290	82	AGRR	
14	Polygon	Tular	23	92	WETN	
15	Polygon	Urbano y Construido	30	24	URLD	

Se necesita convertir el shp a raster utilizando como objetivo el atributo de "LandUse" para ingresarlo como "LandUse Grid"

```

luc - Notepad
File Edit View

["Value", "Landuse"]
1, WATR
2, FRSE
3, FRST
4, RNGB
5, RNGB
6, HAY
7, RNGE
8, FRSD
9, FRSE
10, FRST
11, FRSE
12, BARR
13, AGRR
14, AGRR
15, WETN
16, URLD
  
```



La clasificación del tipo de suelo se realizó con la capa de Edafología de Jalisco del IIEG escala 1:50,000. Para ligar los tipos de suelo del IIEG con los de la base de datos del SWAT, se realizó un proceso extenso de clasificación de cada tipo de suelo con base su suelo predominante y su textura para asignarle un código SNAM de la base de datos del SWAT a cada uno. Se siguieron los mismos pasos anteriormente mencionados para la vegetación de exportar la capa a raster utilizando el código SNAM como objetivo y se creó su lookup table.

FID	Shape	CLAVESUEL	SUELPREUNI	SUELPRESUB	FASEQUIMI	CLASETEX	SUELOSEC	SUELOTERC	FASEFISICA	SNAM
0	Polygon ZM	Hh/3	Feozem	háplico	Ninguno	Fina	Ninguno	Ninguno	Pedregosa	Hh17-3a-6280
1	Polygon ZM	Hh+Bf/2	Feozem	háplico	Ninguno	Media	Cambisol ferrálico	Ninguno	Lítica profunda	Hh10-2abc-5198
2	Polygon ZM	Hh+Bf/2	Feozem	háplico	Ninguno	Media	Cambisol ferrálico	Ninguno	Ninguno	Hh10-2abc-5198
3	Polygon ZM	Hh+W2	Feozem	háplico	Ninguno	Media	Litosol	Ninguno	Gravosa	Hh10-2abc-5198
4	Polygon ZM	I+Hh/2	Litosol	Ninguno	Ninguno	Media	Feozem háplico	Ninguno	Lítica profunda	I-Re-81
5	Polygon ZM	Lf/3	Luvisol	férrico	Ninguno	Fina	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Lf1-3b-5593
6	Polygon ZM	Lf/3	Luvisol	férrico	Ninguno	Fina	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Lf1-3b-5593
7	Polygon ZM	Lf/3	Luvisol	férrico	Ninguno	Fina	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Lf1-3b-5593
8	Polygon ZM	Lf/3	Luvisol	férrico	Ninguno	Fina	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Lf1-3b-5593
9	Polygon ZM	Re/1	Regosol	éutrico	Ninguno	Gruesa	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Re1-1659

```
Soil FAO - Notepad
File Edit View
VALUE, NAME
199, Rc18-2b-199
213, Rc22-2b-213
225, Rd17-2b-225
244, Re59-2b-244
244, Re59-2b-244
246, Re59-2c-246
258, Vc1-2-3a-258
261, Vc14-3a-261
261, Vc14-3a-261
440, Bc14-2bc-440
957, Vc41-3a-957
1139, Bv2-1bc-1139
1155, E2-2ac-1155
1215, Hh9-2b-1215
1275, I-Lv-1275
1378, Je46-1a-1378
1414, Lc47-2c-1414
1721, Vc14-3b-1721
3084, I-Bc-2c-3084
3107, I-E-2c-3107
3109, I-E-bc-3109
3113, I-Lc-3c-3113
3276, Vc1-3a-3276
3277, Vc47-3b-3277
3277, Vc47-3b-3277
3338, Be11-2b-3338
3343, Be17-1c-3343
3345, Be19-1b-3345
3474, Re14-1b-3474
3535, Lv2-3b-3535
3562, Vc58-3ab-3562
3711, Hh11-2bc-3711
3794, Lf94-2a-3794
3853, Re46-2c-3853
```

Para la clasificación de la pendiente se eligió dividir el % de pendiente en 3 clases para obtener la mejor resolución posible durante la modelación. Las clases van del 0%-8%, 8%-30%, y 30% al 100%.

Land Use Data | Soil Data | Slope

Slope Discretization

Single Slope    Watershed Min: 0.00    Mean: 9.84  
 Multiple Slope    Slope Stats: Max: 541.    St Dev: 9.75

Slope Classes

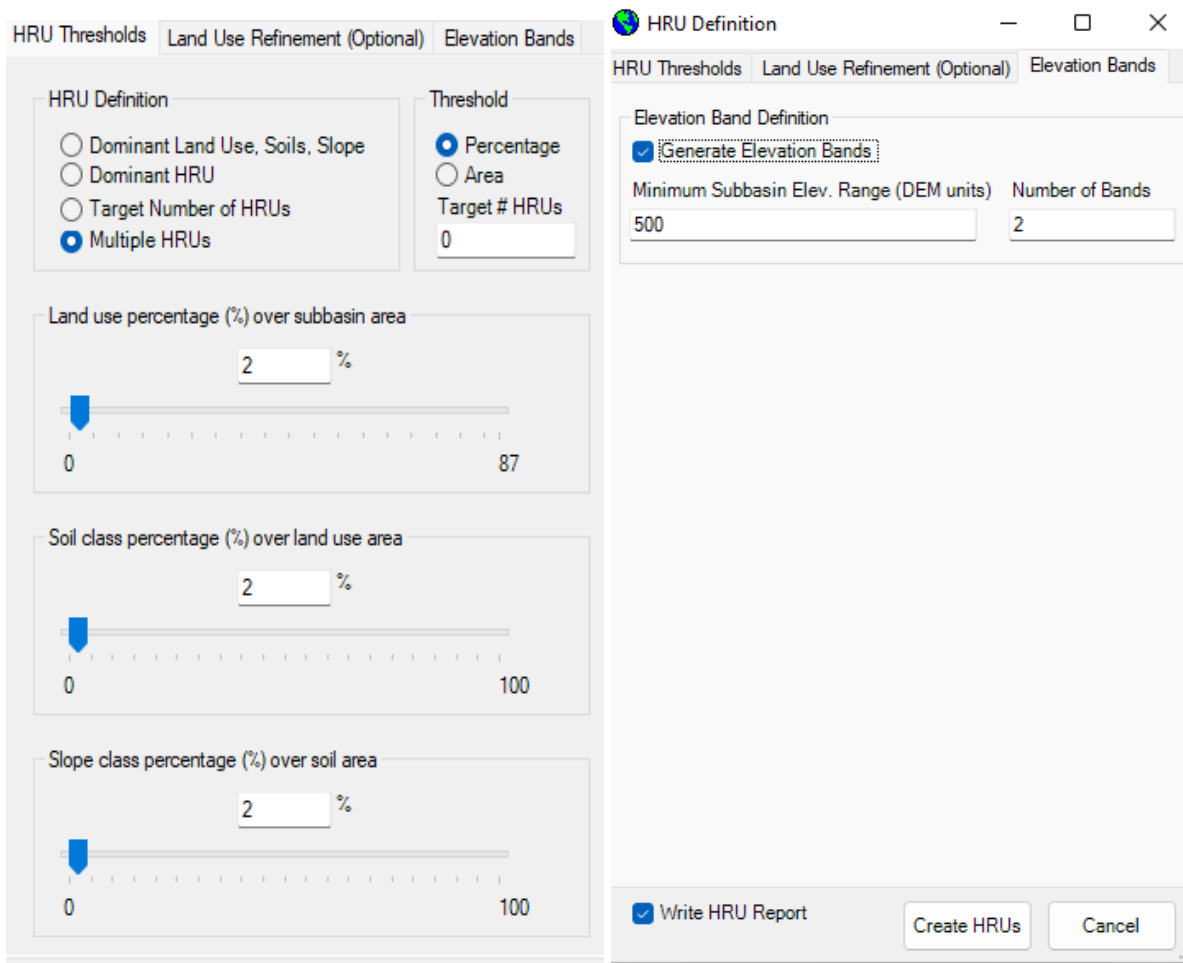
Number of Slope Classes: 3

Current Slope Class: 2    Class Upper Limit (%): 30   

**SWAT Slope Classification Table**

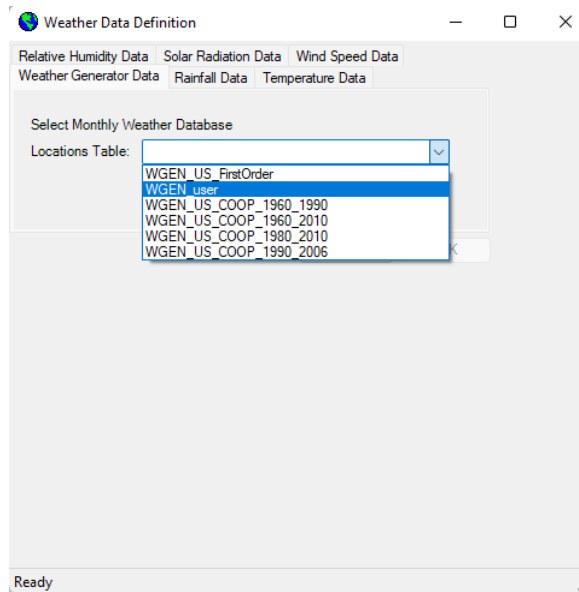
Class	> Lower Limit	<= Upper Limit
1	0	8
2	8	30
3	30	9999

El siguiente paso es definir las HRUs (Hydrologic Response Unit), un proceso que lleva a cabo SWAT en el cual se dividen las subcuencas en polígonos más pequeños que comparten los mismos atributos topográficos, de tipo de suelo y uso de suelo. Se necesita definir un umbral del porcentaje de área que cubre cierta topografía, tipo y uso de suelo sobre una subcuenca y así el programa genera una "n" cantidad de HRUs con base a los valores umbral asignados.



En la pestaña de “Elevation Bands” se palomea donde dice “Generate Elevation Bands” y se dejan los valores por default que te da el programa. Se le da click en “Create HRUs” para continuar con el proceso.

Lo que sigue es la definición de la información climatológica. Para esto ya se debe tener preparada la información de las estaciones climatológicas en archivos de texto por cada estación. Se abre la ventana “Weather Data Definition” y se selecciona la pestaña “Weather Generator Data” para escoger la siguiente opción en el menú:



Esto significa que no utilizaremos los datos climatológicos que vienen por default en la base de datos del SWAT, le daremos nuestra propia información meteorológica.

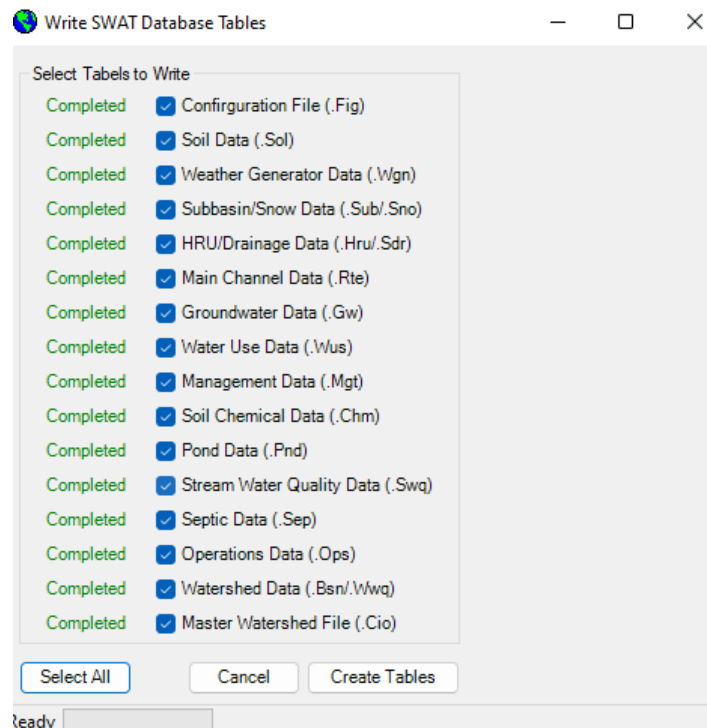
En la pestaña de "Rainfall Data" se selecciona la opción de "raingages" con timestep "daily" ya que se cuenta con datos de precipitación diaria desde 1983 hasta el final del 2018. Se continúa a abrir el archivo "pcpfork" en donde viene la información de las estaciones climatológicas que se usarán para los datos de precipitación.

```
ID,NAME,LAT,LONG,ELEVATION
1,1015_PCP,21.92,-101.97,2038.00
2,1022_PCP,21.75,-102.17,1998.00
3,1024_PCP,21.78,-102.1,2004.00
4,1033_PCP,21.9,-101.99,2026.00
5,1034_PCP,21.89,-102.11,2007.00
6,1073_PCP,21.81,-102.13,2027.00
7,1096_PCP,21.84,-102.18,1970.00
8,1099_PCP,21.98,-102.06,2044.00
9,11020_PCP,21.17,-101.7,1837.00
10,11025_PCP,21.23,-101.71,1920.00
11,11040_PCP,21.2,-101.67,1865.00
12,11045_PCP,21.33,-101.64,2042.00
13,11055_PCP,21.08,-101.87,1794.00
14,11095_PCP,21.14,-101.7,1828.00
15,11159_PCP,21.05,-101.84,1787.00
16,14054_PCP,21.63,-101.97,2050.00
17,14084_PCP,21.36,-101.92,1884.00
18,14114_PCP,21.22,-101.82,1950.00
19,14157_PCP,21.13,-102,1917.00
20,14320_PCP,21.35,-101.85,1940.00
21,14392_PCP,21.49,-101.75,1998.00
22,32118_PCP,22.02,-101.85,2103.00
```

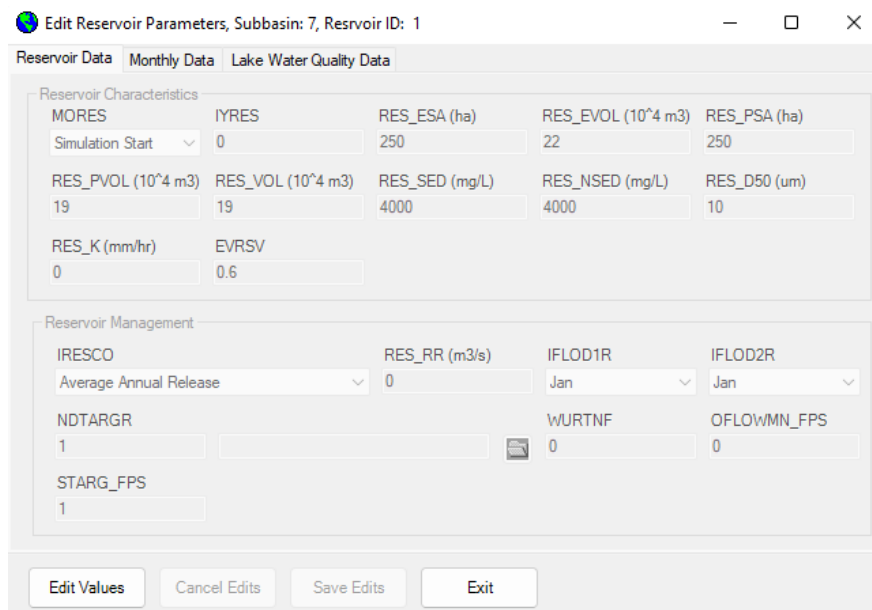
Los datos de precipitación están acomodados en archivos de texto, cada uno con el nombre de su estación climatológica correspondiente y solo cuentan con la fecha en la que empiezan los datos en el primer renglón y a continuación se enlistan todos los valores de precipitación, un renglón por día. Estos archivos deben de estar guardados en la misma carpeta que el archivo "pcpfork".

Continuando con el procedimiento, se ingresan los datos de temperatura seleccionando la pestaña con dicho nombre y se selecciona la opción de "Climate Stations" para realizar el mismo procedimiento que en precipitación, pero ahora con el archivo "tempfork".

El siguiente paso es generar las tablas de la base de datos para el modelo. Se seleccionan todas las casillas de la lista y se le da click en "Create Tables".



Una vez creando las tablas, es posible editar los SWAT Input, ya sea los datos de la cuenca en general, de alguna subcuenca, establecer entrada y/o salidas puntuales y editar los reservorios. En la pestaña de reservorios se editó la información de la presa que se incluyó en el modelo previamente para darle los valores que se observan en la realidad.



Cuando se realiza una modificación a algún SWAT Input, es necesario regresar al paso anterior y volver a escribir las SWAT Input Tables.

Ahora si el modelo está listo para correr, se abre la pestaña de “Run SWAT” para acomodar los parámetros generales del modelo. Aquí se definen los años por los que correrá el modelo, que van de la mano del rango de años para los que se tienen datos de precipitación y temperatura. Se le asignan 2 años de calentamiento al modelo para que nos arroje datos hasta después de esta etapa de calentamiento y también se selecciona la opción del programa de 64 bits, de acorde al sistema operativo de la computadora del modelador.

Period of Simulation

Starting Date : **1/1/1983** Ending Date : **12/31/2018**   
Min Date = 1/1/1983 Max Date = 12/31/2018

Rainfall Sub-Daily Timestep

Timestep:  Minutes

Rainfall Distribution

Skewed normal  
 Mixed exponential 1.3

SWAT.exe Version

32-bit, debug  32-bit, release  
 64-bit, debug  64-bit, release  
 Custom (swatUser.exe in TxtIn folder)

Printout Settings

Daily  Yearly  Print Log Flow  Print Pesticide Output  
 Monthly NYSKIP : 2  Print Hourly Output  Print Soil Storage  
 Print Soil Nutrient  Route Headwaters  Print Binary Output  
 Print Water Quality Output  Print Snow Output  Print Vel./Depth Output  
 Print MGT Output  Print WTR Output  Print Calendar Dates

Output File Variables: All

Set CPU Affinity CPU ID: 1

Al terminar el proceso “SWAT Run” se abre la pestaña “Read SWAT Output” para importar a tu base de datos del proyecto las tablas que representan al modelo y se puede correr la primera medida de calibración, el SwatCheck, un programa que lo incluye el ArcSWAT.

SWAT Output

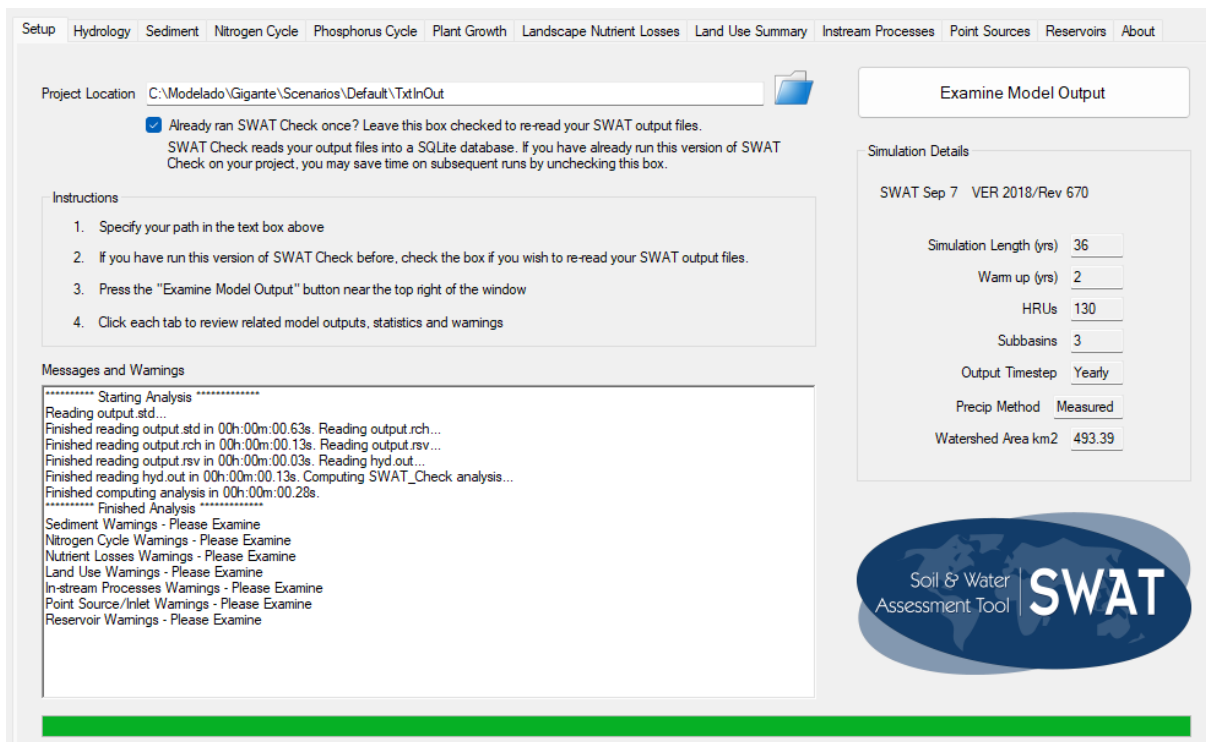
Read SWAT Output

Check Output Files to Import

output.rch  output.sed  output.snu  
 output.sub  output.rsv  output.pot  
 output.hru  output.pst  output.vel  
 output.dep  output.wtr  output.wql  
 output.snw  output.swr  output.mgt

Review SWAT Output

Save SWAT Simulation



Si el modelo no tiene errores, se completa la barra verde como en la figura anterior. El modelo está listo para pasar a la etapa de calibración con el programa SWATCUP.

## Resultados

Los resultados obtenidos del modelo arrojan datos sobre el escurrimiento medio anual por microcuenca para un periodo de 34 años de modelación (1983-2018) (Ver tabla siguiente). Se utilizaron los valores de escurrimiento superficial (SURQ) y flujo lateral (LATQ), la suma de ambas variables nos dará el valor buscado que es la lluvia neta. Este volumen medio anual es el dato tomado en cuenta para el Volumen Medio Anual Escurrimiento Natural (Cp), requerido para obtener la disponibilidad hídrica por microcuenca.

Microcuenca	Tiempo simulado (años)	Área (km2)	Volumen de escurrimiento anual CP (hm3)
1	34	392.14	6.48
2	34	280.95	07.02
3	34	110.29	3.50
4	34	98.09	4.88
5	34	134.18	11.01
6	34	122.81	3.88
7	34	71.77	5.21
8	34	206.80	27.19

9	34	76.93	15.74
10	34	154.24	4.52
11	34	97.35	3.23
12	34	148.06	6.62
13	34	252.54	35.08
14	34	221.86	19.28
15	34	184.58	15.51
16	34	186.08	11.09
17	34	227.34	17.26
18	34	164.28	12.46
19	34	215.60	16.67
20	34	162.47	14.20
21	34	160.74	7.44
22	34	205.69	08.03
23	34	239.35	10.63
24	34	189.08	13.62
25	34	235.70	9.97

Tabla 1. Volumen de escurrimiento anual por microcuenca  
Fuente: Elaboración propia

## Notas modelo SWAT RST

- Se utilizaron datos diarios de temperatura y precipitación de 1983 hasta el 2018. para la primera corrida.
- La segunda corrida del modelo se realizó con la temperatura y precipitación de la base de datos del CSF World.
- El procedimiento que se siguió viene descrito a mayor detalle en “documentación de entrada/salida” (Arnold et al., n.d.).
- El archivo que exporta el modelo y se usa para la calibración se llama “TxtInOut” y se encuentra bajo la carpeta donde se guarda el proyecto SWAT.

## Bibliografía

Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., Williams, J., Haney, E., & Neitsch, S. (n.d.). Input/Output Documentation Soil & Water Assessment Tool. Recuperado de: <https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>

ASF Data Search Vertex. (2011). Mapa de pendientes clasificado con base en imágenes satelitales. EARTHDATA. Recuperado de: <https://vertex-retired.daac.asf.alaska.edu/#>

CONAGUA. (2020) Humedales y areas naturales protegida (ANP) nacional. Recuperado de: <https://sigagis.conagua.gob.mx/humedales/>

IIEG (2015). Conjunto de datos vectoriales edafológicos 1:50000 Jalisco. Recuperado de: <https://datos.jalisco.gob.mx/search?query=edafologia>

INEGI (2010). Red hidrográfica de la cuenca RH12I escala 1:50000. Recuperado de: [https://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/](https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/)

SEMADET. (2020). *Uso de suelo y vegetación*. Jalisco: Geomática.

## 3. Concesiones superficiales y subterráneas

### Introducción

Este apartado describe el tratamiento dado al compilado de información de extracciones de agua superficiales y subterráneas del Registro Público de los Derechos de Agua (REPDA) ubicados dentro de las microcuencas del área de estudio hidrológico.

Estos datos son insumos para el análisis de disponibilidad subterránea y superficial del área de estudio, cuyos resultados son eje rector en el establecimiento de políticas, usos compatibles y criterios regulatorios tanto del POEL como del PMDU. Por tanto, contar con insumos de partida veraces y precisos es fundamental para obtener resultados congruentes, y con ello, unos instrumentos de planeación ajustados a la realidad del territorio.

### Datos de partida y fuentes de información de referencia

- Se utilizó el archivo vectorial de puntos en formato shapefile (SHP) compartido por SEMADET de [REPDA 2021](#), que incluye los títulos de extracción de agua superficial y los títulos de extracción de agua subterránea a escala nacional registrados hasta el 2020.

Este shapefile contiene los siguientes campos en su tabla de atributos:

**FID** Id de identificación de atributo

**Shape \*** Tipo de shapefile

**FID\_REPDA\_** Id de identificación de concesión (Se lo pusimos nosotros)

**OBJECTID** Id de identificación del objeto

**LONDEC** Longitud decimal del atributo

<b>LATDEC</b>	Latitud decimal del atributo
<b>TITULO</b>	Título de concesión
<b>ID_REGHID</b>	Id de identificación de la región hidrológica donde se encuentra el atributo
<b>NOMREGHID</b>	Nombre de la región hidrológica donde se encuentra el atributo
<b>CUENCAINI</b>	Nombre de la cuenca de INEGI donde se encuentra el atributo
<b>CUENCAPUB</b>	Nombre de la Cuenca Pública de CONAGUA donde se encuentra el atributo
<b>ID_EDO</b>	Id de identificación del estado donde se encuentra el atributo
<b>NOMESTADO</b>	Nombre del estado donde se encuentra el atributo
<b>CVEMPIO</b>	Clave del municipio donde se encuentra el atributo
<b>NOMMUPIO</b>	Nombre del municipio donde se encuentra el atributo
<b>USO</b>	Uso principal al que se destina el volumen concesionado
<b>VOLSP (VOLSB para el shp de extracciones subterráneas)</b>	Volumen de agua concesionado al uso principal (m <sup>3</sup> )
<b>USO2</b>	Uso secundario al que se destina VSP2
<b>VOLSP2</b>	Volumen de agua concesionado al uso secundario (m <sup>3</sup> )
<b>USO3</b>	Uso terciario al que se destina VSP3
<b>VOLSP3</b>	Volumen de agua concesionado al uso terciario (m <sup>3</sup> )
<b>GRALAT</b>	Grados de latitud del atributo
<b>MINLAT</b>	Minutos de latitud del atributo
<b>SEGLAT</b>	Segundos de latitud del atributo
<b>GRALON</b>	Grados de longitud del atributo
<b>MINLON</b>	Minutos de longitud del atributo
<b>SEGLON</b>	Segundos de longitud del atributo
<b>FECHA_REGI</b>	Fecha de inicio del registro de la concesión
<b>FECHAVENCE</b>	Fecha de vencimiento de la concesión

Este shapefile tiene muchos errores:

- Puntos en otras partes fuera del territorio nacional
- Concesiones sin atributos de cuenca pública, municipio, etc.

- Concesiones con atributos correctos pero ubicación geoespacial sin lógica
- Concesiones faltantes

#### RESTO DE FUENTES UTILIZADAS PARA VALIDAR DATOS

- Registro Público de los derechos del agua  
<https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>
- Imagen satelital ESRI

## Tratamiento de la información

Una vez teniendo el archivo vectorial de puntos con las concesiones de agua superficial y subterránea en el municipio, dentro de las subcuencas que abarca el mismo,, se prosiguió a seleccionar y separar solo las que caen dentro de las microcuencas del área de estudio hidrológico.

Para utilizar el SHP de REPDA 2021 se realizó una selección por atributos de la información que viene en el shp. Se seleccionaron atributos como cuenca de CONAGUA y se ubicó por clave de título. Una vez seleccionadas únicamente las concesiones que cumplían estos criterios, se detectó que varias se encontraban fuera de la cuenca a la que pertenecían y otras, fuera del municipio de estudio; estos puntos detectados como erróneos fueron editados con el fin de reubicarlos en una posición lógica con base a lo que describen sus atributos y con base a su ubicación reportada en el portal del REPDA.

Para verificar la ubicación de concesiones situadas dentro de las microcuencas con las que se está trabajando, se ingresó al registro del REPDA para buscar título por título el nombre del titular o de la autoridad que emitió la concesión para tratar de ligar uno de estos dos con la ubicación de algún ejido o industria para poder ubicar de manera correcta la concesión.

## Resultados

Dos shp. de puntos, uno para las concesiones superficiales y otro para las concesiones subterráneas dentro de las microcuencas del área de estudio hidrológico.

## Bibliografía

Elaboración propia con la base de datos de [CONAGUA, 2022](#) e información geoespacial del SHP, [REPDA, 2021](#) (Proporcionados por SEMADET)

# 4. Disponibilidad superficial

## Introducción

La presente memoria describe la obtención de los volúmenes de disponibilidad media anual para las microcuencas pertenecientes al área de estudio hidrológico del municipio Lagos de Moreno.

El cálculo de la disponibilidad de agua superficial se basó en lo escrito dentro de la NOM-011-CONAGUA-2015 que establece *“las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.”*

La expresión que determina la norma queda visible a continuación tal y como lo expresa NOM-011-CONAGUA-2015:

$$\begin{array}{l} \text{Disponibilidad Media} \\ \text{Anual de Agua} \\ \text{Superficial en la Cuenca} \\ \text{Hidrológica} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Volumen Medio Anual} \\ \text{de Esgurrimiento de la} \\ \text{cuenca hacia aguas} \\ \text{abajo} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Volumen Anual actual} \\ \text{comprometido aguas} \\ \text{abajo} \end{array}$$

El volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia agua abajo se determina de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} \text{Volumen Medio} \\ \text{Anual} \\ \text{Esgurrimiento} \\ \text{de la cuenca} \\ \text{hacia aguas} \\ \text{abajo (Ab)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Volumen Medio} \\ \text{Anual} \\ \text{Esgurrimiento} \\ \text{desde la cuenca} \\ \text{aguas arriba (Ar)} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Volumen Medio} \\ \text{Anual} \\ \text{Esgurrimiento} \\ \text{Natural (Cp)} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Volumen Anual} \\ \text{Retornos (R)} \end{array} \\ + \begin{array}{l} \text{Volumen Anual} \\ \text{Importaciones} \\ \text{(Im)} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Volumen Anual} \\ \text{Exportaciones} \\ \text{(Ex)} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Volumen Anual} \\ \text{Extracción de} \\ \text{Agua Superficial} \\ \text{(Uc)} \end{array} \\ - \begin{array}{l} \text{Volumen Medio} \\ \text{Anual} \\ \text{Evaporación en} \\ \text{Embalses (Ev)} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Volumen Medio} \\ \text{Anual Variación} \\ \text{Almacenamiento} \\ \text{en Embalses (Av)} \end{array}$$

## Procedimiento

A continuación, se hace un desglose de las variables que intervienen en el cálculo del volumen medio anual de escurrimiento por microcuenca en el área de estudio hidrológico (AEH), de esta forma, poder aplicar la ecuación antes mencionada.

## Volumen medio anual escurrimiento

El escurrimiento medio anual se determinó a partir de la simulación hecha en ArcSWAT, el resultado reportado, es el que se obtiene de la suma del escurrimiento superficial (SURQ)

y el flujo lateral (LATQ). Ambas variables se multiplicaron por el área de cada microcuenca y se dividieron entre 1000 para tener volúmenes reportados en m<sup>3</sup>. Asimismo, los detalles del modelo hidrológico están reportados en el apartado de memoria Modelo ArcSWAT.

## Volumen anual de retorno

La NOM-011-CONAGUA-2015 establece porcentajes de retorno de los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje dependiendo de los diferentes usos que se da en la cuenca, los cuales se presentan en la tabla, dichos volúmenes son sumados dentro del balance hídrico.

Uso	% Rango de Retorno
Acuicultura	95-100
Agrícola	10-30
Doméstico	70-80
Industrial	50-60
Pecuario	10-30
Público urbano	70-80

Tabla 1. Porcentaje de retorno de cada sector

Fuente: Elaboración propia

## Volumen Anual Extracción de Agua Superficial

Las concesiones para la extracción de agua superficial obtenidas del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) presentan algunos errores en la ubicación de los puntos; por este motivo, se decidió realizar una reubicación de acuerdo a valores registrados en la tabla de atributos del archivo vectorial.

Para la reubicación de las concesiones se realizó la validación de datos a partir de la siguiente información:

- Municipio
- Subcuenca
- Titular (cuando estaba registrado como ejido o municipio)
- Coordenadas geográficas

Estos volúmenes son parte importante, ya que nos muestran el panorama de las actividades socioeconómicas que se desarrollan dentro del área de estudio y los consumos de agua que dichas localidades realizan.

## Volumen anual actual comprometido aguas abajo

Ya para finalizar, el volumen anual comprometido aguas abajo (Rxy), los cuales incluyen los volúmenes correspondientes a reservas, uso ambiental, reglamentos y programación hídrica. Estos fueron repartidos entre las microcuencas ajustado al Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo (Ab), con la finalidad de obtener el resultado final que es la disponibilidad media anual (D) por microcuenca.

## Resultados

Para terminar, en la tabla siguiente se muestran el desglose de las variables involucradas en la obtención de los volúmenes medios anuales por microcuenca para el área de estudio hidrológico, junto con el nombre de la subcuenca y cuenca a las que corresponden.

Micro	AREA_HA	SUBCUENCA INEGI	CUENCA CONAGUA	CUENCA INEGI	CP	Uc(a)	Retorno	Rxy	Ab	D (hm <sup>3</sup> anuales)
1	392.140.936	R. Encarnación	Río Encarnación	R. Verde Grande	6.47668349	3.11948262	0.63142891	3.98678692	3.98862978	0.00184286
2	280.953.438	R. Encarnación	Río Encarnación	R. Verde Grande	7.02239188	3.7818907	0.79626029	4.03489637	4.03676147	0.0018651
3	110.294.531	R. de Lagos	Presa El Cuarenta	R. Verde Grande	3.49529701	0.109	0.0218	3.40703548	3.40809701	0.00106153
4	9808.75	R. de Lagos	Presa El Cuarenta	R. Verde Grande	4.87812249	0.024111	0.0053524	4.85785033	4.85936389	0.00151356
5	134.179.219	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	11.0144179	0.292785	0.09346055	10.8095707	10.8150934	0.00552268
6	122.812.969	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	3.88145102	0.07641	0.0375075	3.84058634	3.84254852	0.00196218
7	717.653.125	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	5.2090141	0.343391	0.078323	4.94142149	4.9439461	0.00252461
8	206.796.094	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	27.1901723	5.158571	1.05426475	23.0740774	23.0858661	0.01178871
9	769.295.313	R. Turbio - P. Palote	Río Turbio	R. Lerma - Salamanca	15.7401286	0.0527	0.029625	16.2598536	15.7170536	-0.54280002
10	154.242.656	R. Encarnación	Río Encarnación	R. Verde Grande	4.52156036	0.0073	0.00146	4.51363397	4.51572036	0.00208639
11	973.484.375	R. Grande	Río Grande	R. Verde Grande	3.22864674	0.359218	0.079306	2.94739851	2.94873474	0.00133623
12	148.061.094	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	6.6200159	0.321524	0.1019446	6.39716814	6.4004365	0.00326836
13	252.544.844	R. Turbio - P. Palote	Río Turbio	R. Lerma - Salamanca	35.0760084	0.949021	0.25081075	35.5650608	34.3777982	-1.18726259
14	221.859.531	R. Turbio - P. Palote	Río Lerma 5	R. Lerma - Salamanca	19.2819505	1.28912931	0.27329698	19.6492468	18.2661182	-1.38312859
15	184.581.406	R. de Lagos	Presa El Cuarenta	R. Verde Grande	15.5118924	0.12213338	0.06255604	15.4475021	15.4523151	0.00481299
16	186.081.094	R. de Lagos	Presa El Cuarenta	R. Verde Grande	11.093307	1.520712	0.3053304	9.87484869	9.8779254	0.00307671
17	22.733.875	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	17.2624195	2.7474675	0.58956815	15.0968071	15.1045201	0.00771306
18	16.428.125	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	12.4553496	0.472266	0.150254	12.1271418	12.1333376	0.00619584

19	215.603.906	R. de Lagos	Presa El Cuarenta	R. Verde Grande	16.6744886	0.024971	0.00992825	16.6542569	16.6594459	0.00518898
20	162.466.719	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	14.196096	0.3200045	0.07452845	13.9434961	13.9506199	0.00712383
21	160.736.094	R. Encarnación	Río Encarnación	R. Verde Grande	7.43913315	2.20308375	0.45344715	5.68686785	5.68949655	0.00262871
22	205.691.875	R. Encarnación	Río Encarnación	R. Verde Grande	8.03206662	1.218383	0.24718725	7.05760855	7.06087087	0.00326232
23	239.354.219	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	10.6279004	0.50446	0.1021559	10.2203746	10.2255963	0.00522166
24	189.076.406	R. de Lagos	Río de Lagos	R. Verde Grande	13.623424	13.11195	2.6774329	3.18727851	3.18890692	0.0016284
25	235.697.813	R. Grande	Río Grande	R. Verde Grande	9.97318071	0.580264	0.1212316	9.50983692	9.51414831	0.00431138

Tabla 2. Variables involucradas en la obtención de volúmenes medios anuales.

Fuente: Elaboración propia.

## Notas disponibilidad superficial

- La variable de caudal ecológico no fue determinada debido a que la información hidrométrica no cumplía con los requisitos básicos para su obtención.
- El volumen anual comprometido aguas abajo utilizado fue obtenido a partir de una ponderación del volumen de escurrimiento anual de cada microcuenca en comparación con el volumen de escurrimiento anual de la cuenca a la que pertenece la microcuenca.
- No se encontraron ni importaciones ni exportaciones en las microcuencas mencionadas.

## Bibliografía

DOF (2020). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. Recuperado de: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020#gsc.tab=0)

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. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, primera sección, 27 de marzo de 2015.

# 5. Disponibilidad subterránea

## Introducción

Este documento contiene el tren de pensamiento y la metodología que se llevó a cabo para delimitar el balance hídrico del agua subterránea. El balance de agua subterránea sólo se realizó para 4 de los 9 acuíferos delimitados por CONAGUA, los mismos para los que se delimitaron los acuíferos potenciales del área de estudio.

## Datos de partida y preprocesado de información

La información requerida de entrada fue:

- Puntos de aprovechamiento de agua subterránea pertenecientes al Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) (CONAGUA, 2021)
- Recarga de agua subterránea
- Descarga natural comprometida (DNC)
- Re-evaporación

Se utilizó Qgis en su versión 3.22, para la estimación de las variables que forman parte de la ecuación del balance hídrico de agua subterránea.

## Metodología

Lo primero que se realizó fue la obtención de cada una de las variables por separado para posteriormente, poder aplicar la ecuación 1 que relaciona cada una de ellas como se muestra a continuación:

$$\text{Disponibilidad del acuífero} = \text{recarga} - \text{concesiones} - \text{DNC} - \text{revap} \text{ Ecuación 1}$$

A continuación, se describe paso a paso el procedimiento seguido:

La primera variable que se obtuvo fue la recarga anual se estimó a partir de la metodología propuesta por Piscopo (2001) para estimar la recarga potencial de agua subterránea. Donde se aprecia como aplica el método DRASTIC (desarrollado por la EPA en 1987) para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la cuenca de Castlereagh, Australia.

El método DRASTIC contempla siete variables, tal como lo expresa su nombre (acrónimo en inglés): profundidad del nivel piezométrico (D), recarga neta (R), material del acuífero (A), suelo (S), topografía (T), impacto de la zona no saturada o vadosa (I) y conductividad hidráulica (C). Para el análisis en cuestión, es de particular interés la manera en la que Piscopo (2001) determinó la recarga neta (R). Dicho autor propone calcular dicha variable con la siguiente ecuación:

A cada término se le asigna un puntaje dependiendo de su grado de influencia en la recarga. Los puntajes están contenidos en la Tabla 1.

Pendiente		Precipitación		Permeabilidad del suelo	Puntaje
Rango (%)	Puntaje	Rango (mm/año)	Puntaje	Alta	
< 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

Tabla 1. Puntajes para los factores que rigen la recarga según Piscopo (2001)

Fuente: Extraído de Rizo (2017).

Rizo (2017) señala que la *permeabilidad del suelo* supone cierta subjetividad al tener carácter cualitativo. Por ello, propone calificar esta variable con respecto al uso de suelo, litología y textura del suelo, y llamarla *capacidad de infiltración* (cp). No obstante, no detalla los valores empleados, por lo que se proponen los siguientes según las características del área de estudio. Esta propuesta es meramente teórica, basada en la bibliografía revisada; con base a lo dicho anteriormente, se decidió seguir la propuesta metodológica de Matus, Faustino & Jiménez (2007). Para la cual se deben de ponderar cinco atributos, pendiente, tipo de suelo, geología, uso de suelo y cobertura vegetal. Y se clasificaron como se muestra en las tablas 2-6:

Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
0-6	Muy alta	5
6-15	Alta	4
15-45	Moderada	3
45-65	Baja	2
>65	Muy Baja	1

Tabla 2. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según la pendiente.

Fuente: (Matus, M; Faustino & Jiménez, 2007)

Porcentaje (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
>80%	Muy alta	5
70-80%	Alta	4
50-70%	Moderada	3
30-50%	Baja	2
<30%	Muy Baja	1

Tabla 3. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal.

Fuente: (Matus, M; Faustino & Jiménez, 2007).

Unidades de suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Andosol, Feozem, Fluvisol, Litosol	Muy alta	5
Regosol, Planosol	Alta	4
Luvisol	Moderada	3
Cambisol	Baja	2
Vertisol, Solonchaks, Gleysol	Muy Baja	1

Tabla 4. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica del suelo.

Fuente: (Matus, M; Faustino & Jiménez, 2007).

Rocas	Posibilidad de recarga	Ponderación
Aluvial, brecha, caliza	Muy alta	5
Arenisca-Conglomerado	Alta	4
Conglomerado	Moderada	3
Andesita, riolita, toba y toba basáltica fracturada.	Baja	2
Basalto, brecha volcánica, extrusiva ácida, extrusiva basáltica, extrusiva intermedia, vítrea sin fracturas. Residual.	Muy Baja	1

Tabla 5. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca.

Fuente: (Matus, M; Faustino & Jiménez, 2007).

Uso de suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosque, Selva	Muy alta	5
Matorral, Pastizal	Alta	4
Agrícola	Moderada	3
Zona urbana, invernaderos, desprovisto de vegetación	Muy Baja	0.5

Tabla 6. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el uso de suelo.

Fuente: (Matus, M; Faustino & Jiménez, 2007).

Las cinco variables utilizadas para determinar las zonas con mayor posibilidad de recarga (ZR) o en este caso para obtener la capacidad de infiltración son: pendiente (Pend), tipo de suelo (Ts), tipo de roca (Tr), cobertura vegetal (cve) y uso de suelo (Us). Su relación se establece en la Ecuación 3 propuesta por Matus, Faustino y Jiménez (2007).

$$ZR = (0.27 \times Pend) + (0.23 \times Ts) + (0.12 \times Tr) + (0.25 \times cve) + (0.13 \times Us) \quad \text{Ecuación 3}$$

Utilizando la calculadora ráster de del programa de SIG se realizó la operación de la ecuación anterior con los ráster generados anteriormente. En la siguiente tabla se

muestra la clasificación de los resultados obtenidos. Estas cinco categorías se usaron para dar congruencia con la metodología de Piscopo (2001), tal como se muestra en la Tabla 3-29.

Capacidad de infiltración	Rango
Muy alta	4.1-5
Alta	3.5-4.09
Moderada	2.6-3.49
Baja	2-2.59
Muy Baja	1-1.99

Tabla 7. Potencial de recarga hídrica.

Fuente: Matus, M; Faustino & Jiménez (2007)

En la figura 1 se muestran las zonas con mayor potencial de recarga de agua subterránea.

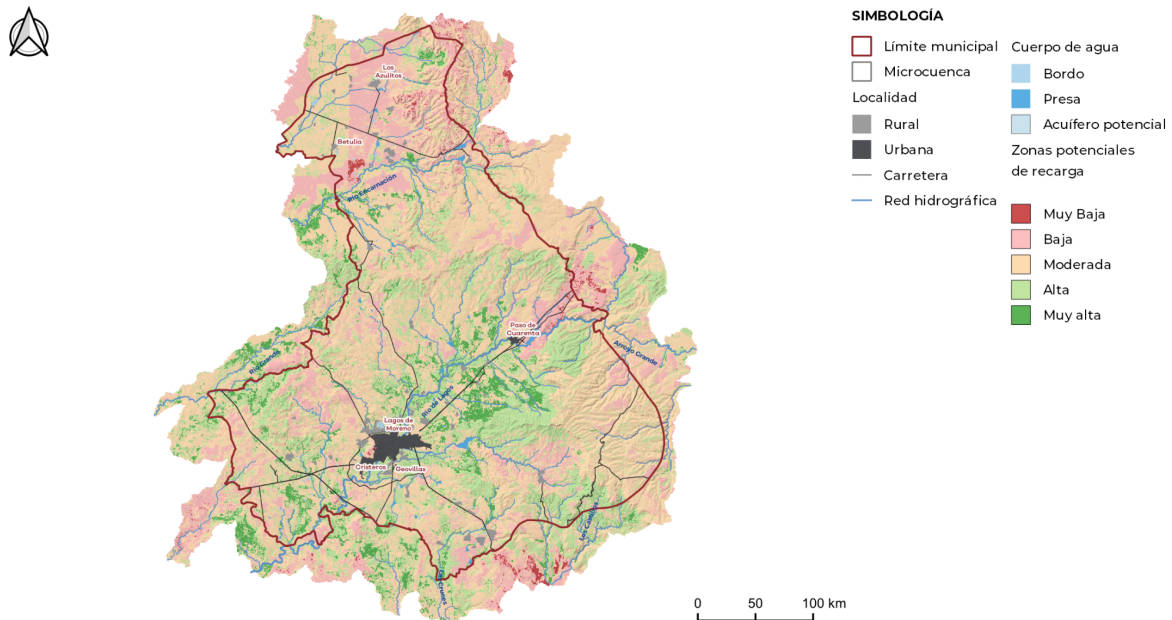


Figura 1. Mapa de zona con capacidad de infiltración en el AEH.

Fuente: Elaboración propia

Regresando con la clasificación hecha por Piscopo (2001) y al aplicar la ecuación 1, se obtienen los rangos de acuerdo con la tabla 8 que expresa la relación entre la recarga neta y los valores del método DRASTIC. El resultado final se muestra en la figura 2.

Rr (Piscopo, 2001)	Valor R (método DRASTIC)	Recarga neta [mm/año]
11-13 (muy alta)	9	≥ 254
9-11 (alta)	8	178 – 254
7-9 (Media)	6	103 – 178

Rr (Piscopo, 2001)	Valor R (método DRASTIC)	Recarga neta [mm/año]
5-7 (Baja)	3	50 – 103
3-5 (Muy baja)	1	< 50

Tabla 8. Relación de valores de recarga neta con valor obtenido del método DRASTIC.

Fuente: Extraído de Piscopo (2001)

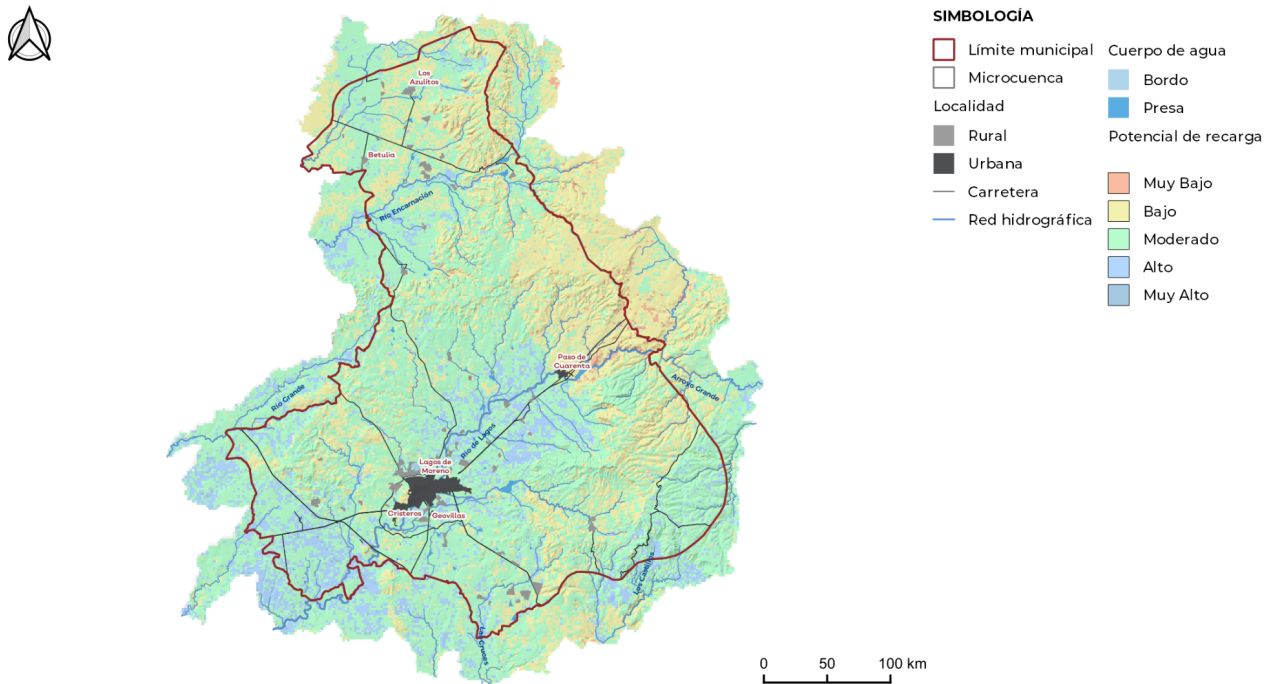


Figura 2. Mapa de la recarga de agua subterránea en el AEH

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo con las variables de la ecuación 1, las siguientes se obtuvieron de la siguiente manera:

- Las extracciones se calcularon a partir de la información del REPDA al 2021 para el área de los acuíferos delimitados por CONAGUA.
- La 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”. La DNC reportada por CONAGUA para los acuíferos del área de estudio es 0.
- Finalmente, la re- evaporación del acuífero se tomó a partir del modelo SWAT, que corresponde al agua que se encuentra en la superficie del acuífero y sale de él en forma de vapor o es absorbida por las raíces de la vegetación.

Limitaciones e incertidumbre

Debido a las limitaciones para delimitar acuíferos y para cuantificar la recarga (como la falta de piezometría, de información geológica no superficial y la nula verificación en campo), es importante resaltar que la disponibilidad reportada no representa un volumen real de agua extraíble del subsuelo, es más un comparativo de concesiones contra recarga estimada que exhibe la presión ejercida sobre el agua subterránea. Asimismo, es relevante destacar que las concesiones pueden ser muy distintas a la extracción real de agua subterránea, siendo este otro factor importante de incertidumbre.

## Resultados

La Tabla 9 muestra el balance por acuífero probable y la figura 3 presenta espacialmente la disponibilidad de agua subterránea. La disponibilidad obtenida solo es para los acuíferos Lagos de Moreno, Encarnación, San Diego Alejandría y Valle de León, de los delimitados por CONAGUA. En la estimación de la disponibilidad de agua subterránea se obtuvieron acuíferos donde la extracción es mayor que la recarga de ahí que la disponibilidad sea negativa.

Acuífero CONAGUA	Clave acuífero probable	Área (m2)	Recarga mm	Recarga m	Recarga en acuífero probable (m3)	Recarga en acuífero probable (hm3)	Recarga agrupada por acuífero CONAGUA (hm3)	Extracciones (hm3)	DNC	Revap	Disponibilidad agrupada por acuífero CONAGUA (hm3/año)	Disponibilidad (hm3/año)
Lagos de Moreno	A1	455485889.8	254	0.254	115693416	115.693416	125.4732666	119.6835849	0	17.3757913	-11.58610959	-10.48558849
	A2	3194150.7	254	0.254	811314.2778	0.811314278						-0.073531476
	A3	1277660.28	254	0.254	324525.7111	0.324525711						-0.02941259
	A4	1916490.42	254	0.254	486788.5667	0.486788567						-0.044118886
	A5	30131488.27	178	0.178	5363404.912	5.363404912						-0.693646925
	A6	958245.21	178	0.178	170567.6474	0.170567647						-0.022059443
	A7	9475980.41	254	0.254	2406899.024	2.406899024						-0.218143379
	A8	851773.52	254	0.254	216350.4741	0.216350474						-0.019608394
Encarnación	B1	245736660.5	103	0.103	25310876.03	25.31087603	26.69011031	45.28478661	0	4.62302363	-23.21769993	-22.71574881
	B2	5430056.19	254	0.254	1379234.272	1.379234272						-0.501951122
San Diego de Alejandría	C1	9369508.72	254	0.254	2379855.215	2.379855215	2.379855215	13.66327	0	0.22687176	-11.51028655	-11.51028655
Valle de León	D1	12563659.42	50	0.05	628182.971	0.628182971	0.628182971	0.343	0	0.4799416	-0.194758629	-0.194758629

Tabla 9 Estimación del balance subterráneo dentro de la delimitación del acuífero de CONAGUA.

Fuente: Elaboración propia

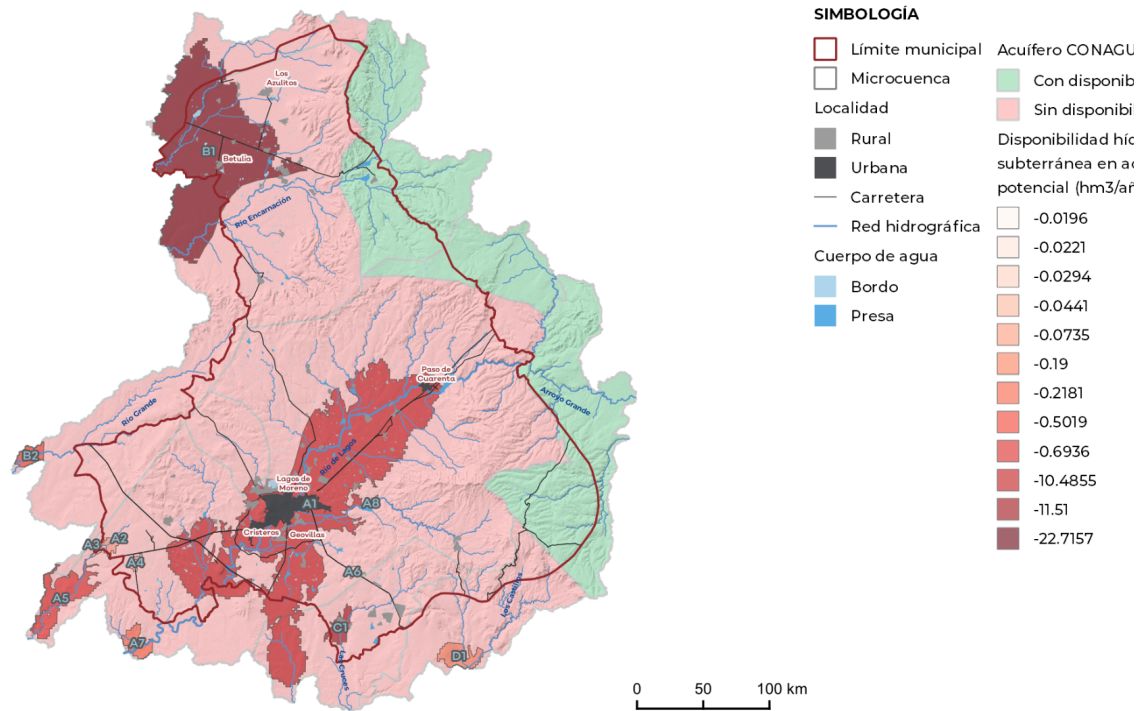


Figura 2. Disponibilidad de agua subterránea para el área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

## Bibliografía

INEGI (1999). Conjunto de datos vectoriales de la carta de aguas subterráneas escala 1:250 000 serie I.

Matus, M; Faustino, J., & Jiménez, F. (2007). Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. *Recursos Naturales y Ambiente*, 55, 74–82.

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.

REPDA (2021) Concesiones de agua subterránea al 2021 según información proporcionada por la CONAGUA.

Rizo (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 (tesis doctoral). Universidad de Málaga, España. Recuperado de: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/16434>.

# 6. Zonas potenciales de almacenamiento de agua subterránea

## Introducción

Este documento contiene el tren de pensamiento y la metodología que se llevó a cabo para delimitar las zonas potenciales de almacenamiento de agua subterránea.

## Datos de partida y preprocesado de información

Se utilizó Qgis en su versión 3.22, para realizar la delimitación de las zonas potenciales de almacenamiento de agua subterránea y se requiere la siguiente información de entrada:

- Puntos de aprovechamiento de agua subterránea pertenecientes al Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) (CONAGUA, 2021)
- Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas escala 1:250 000 (INEGI, 1999)
- Unidades litológicas de Jalisco, escala 1: 50 000 (IIEG,2018)

## Metodología

Se hizo la revisión bibliográfica para elegir la más adecuada para el área de estudio y la que fuera posible reproducirse con los insumos disponibles en la zona. Dentro de las metodologías consultadas se encuentran las descritas por Rizo (2017), Magesh *et al.* (2012) y Al Saud (2010). La metodología más adecuada para el área de estudio resultó ser la descrita por Rizo (2017), sin embargo, no se pudo reproducir en su totalidad por falta de información, por lo que se complementa con otros análisis.

A continuación, se describe paso a paso el procedimiento seguido:

De acuerdo con Rizo (2017) para la delimitación de los acuíferos se debe de analizar las siguientes características: litología (permeabilidad) y pozos (densidad, rendimiento y profundidad). Las zonas que presenten mayor densidad pozos a mismo tiempo presentaran mayor profundidad y rendimiento (l/s); asimismo, las zonas con rendimiento  $\geq 10$  l/s y donde se identifiquen aluviales como unidades litológicas se demarcan como acuíferos.

Para el presente estudio no se cuenta con información cuantitativa de permeabilidad ni con rendimiento o profundidad de los pozos. Por consiguiente, se trabajó con las cartas carta de Aguas subterráneas del INEGI escala 1: 250 000, la carta geológica de Jalisco escala 1: 50 000 del IIEG y la capa de pozos creada a partir de la información del REPDA al 2021, todo en formato vectorial. Las cartas de unidades hidrogeológicas contienen información de la consolidación del material geológico y la posibilidad de almacenar agua subterránea económicamente explotable (grado de posibilidades geohidrológicas). El grado de posibilidades geohidrológicas es una medida indirecta de la permeabilidad del

material; a mayor posibilidad, mayor permeabilidad. La Tabla 1 muestra los campos y sus respectivos atributos de las cartas en cuestión.

Campo	Atributo
Tipo de material	Consolidado
	No consolidado
Grado de posibilidades geohidrológicas	Altas
	Medias
	Bajas

Tabla 1. Campos y atributos de la carta de unidades hidrogeológicas

Fuente: elaboración propia a partir de las cartas de agua subterráneas escala 1:250 000 del INEGI (1999)

1. El primer paso, dentro del software GIS, consiste en hacer una intersección entre la capa de unidades hidrogeológicas y la capa de tipo de roca.
2. Se identificaron que las unidades geohidrológicas con posibilidades medias y altas se situaban principalmente en cuatro tipos de material geológico: aluvial, arenisca – conglomerado, conglomerado, basalto y roca caliza, siendo el aluvial el que mayor coincidencia presentaba.
3. En el tercer paso, se determinó la densidad de pozos con la herramienta “densidad de puntos” con tamaño de píxel de 500 m x 500 m. con la cual se reconocieron las áreas que presentaron mayor densidad de pozos y que se localizan sobre las unidades geohidrológicas con posibilidades altas y medias, permitiera darles validez a las zonas potenciales de almacenamiento de agua subterránea, respetando los polígonos de la geología (principalmente aluvial y en menor medida el resto).

#### Limitaciones e incertidumbre

Las delimitaciones logradas son solo una aproximación, se requiere analizar más información que no estaba disponible al momento de este estudio para que los resultados sean más precisos. A continuación, se enlistan los factores de incertidumbre que incluye la metodología empleada:

- Ni los documentos de disponibilidad de CONAGUA, las cartas hidrológicas de aguas subterráneas ni sus diccionarios de datos mencionan profundidad o espesor de las unidades descritas. Asimismo, la capa de geología utilizada corresponde al tipo de roca que aflora en la superficie. Por lo tanto, los acuíferos propuestos, en todo caso, son solo someros y no es posible determinar, con el presente análisis, la existencia de acuíferos más profundos.
- Las delimitaciones propuestas no se han validado en campo y únicamente corresponden a las aproximaciones que se pueden obtener a partir de la cartografía disponible. Para tener resultados más confiables es necesario realizar sondeos, ensayos de bombeo, implementar una red de pozos de monitoreo, etc., para conocer la estratigrafía y las propiedades hidrogeológicas del área de estudio.

## Resultados

Se obtuvieron un total de 12 zonas potenciales de almacenamiento de agua subterránea para el área de estudio hidrológico.

En la figura 1 se presenta la propuesta de acuíferos potenciales. A los acuíferos se les asignó una letra o clave según su ubicación con los acuíferos de CONAGUA.

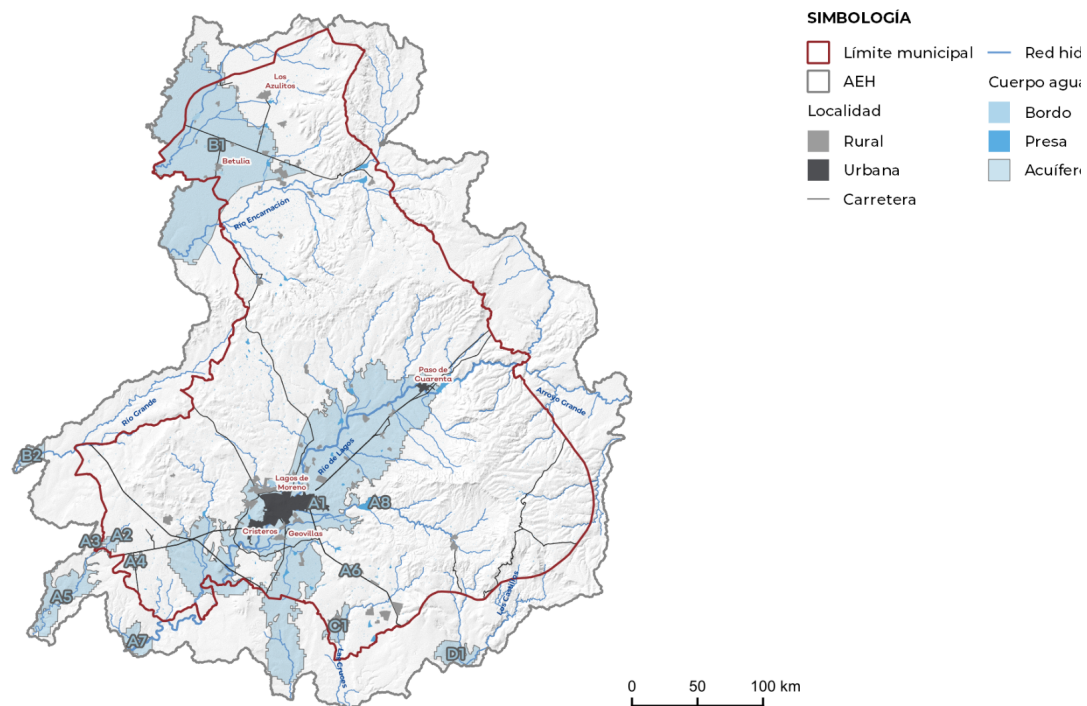


Figura 1. Acuíferos potenciales para el área de estudio hidrológico.  
Fuente: Elaboración propia

## Bibliografía

IIEG (2018). Conjunto de datos vectoriales geológicos 1:50000 Jalisco. Recuperado de: [https://iieg.gob.mx/ns/?page\\_id=1224](https://iieg.gob.mx/ns/?page_id=1224)

REPDA (2021) Concesiones de agua subterránea al 2021 según información proporcionada por la CONAGUA.

Rizo (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 (tesis doctoral). Universidad de Málaga, España. Recuperado de: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/16434>

INEGI (1999). Conjunto de datos vectoriales de la carta de aguas subterráneas escala 1:250 000 serie I.

# 7. Agua residual

## Introducción

Este apartado contiene el tren de pensamiento y la metodología que se llevó a cabo para analizar la infraestructura instalada para tratar agua residual frente la generación de agua residual (AR). A consideración se plantearon tres escenarios, el escenario actual y dos escenarios futuros, para el año 2040 y 2050.

## Datos de partida y preprocesado de información

Se trabajó con los datos establecidos dentro del Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado), además de cierta información de entrada:

- Puntos de aprovechamiento de agua superficial y subterránea para uso industrial con dato del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) (CONAGUA, 2021).
- Plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) con su dato de capacidad de tratamiento instalado.
- Datos poblacionales por localidad y municipal (elaborados en el apartado urbano).

## Metodología

El agua residual se determinó según lo descrito en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, de la Comisión Nacional del Agua (2007) donde recomienda tomar el 75 % del consumo total de agua, porcentaje estimado que terminará siendo agua residual.

Se adoptó un valor común para la dotación de agua en el área de estudio, conforme al clima de mayor distribución, en este caso de tipo semicálido subhúmedo, para este clima el consumo de agua por habitante al día es de 191 litros según CONAGUA (2015).

Lo primero que se realizó fue calcular la cantidad de agua residual que se genera en una localidad, para eso se multiplica la cantidad de litros de agua consumidos por habitante al día por el número de habitantes de la localidad, después se evalúa el volumen de tratamiento donde exista una PTAR de las identificadas en el apartado de Infraestructura hidráulica. A la dotación de agua para consumo por habitante se consideró el 75% el cual se estima terminará siendo agua residual. Posteriormente se completaron con los volúmenes reportados en el REPDA para las concesiones tanto de agua superficial como subterránea clasificada para uso industrial y diferentes usos, ver tabla 1 para conocer los volúmenes tratados y los volúmenes de agua residual.

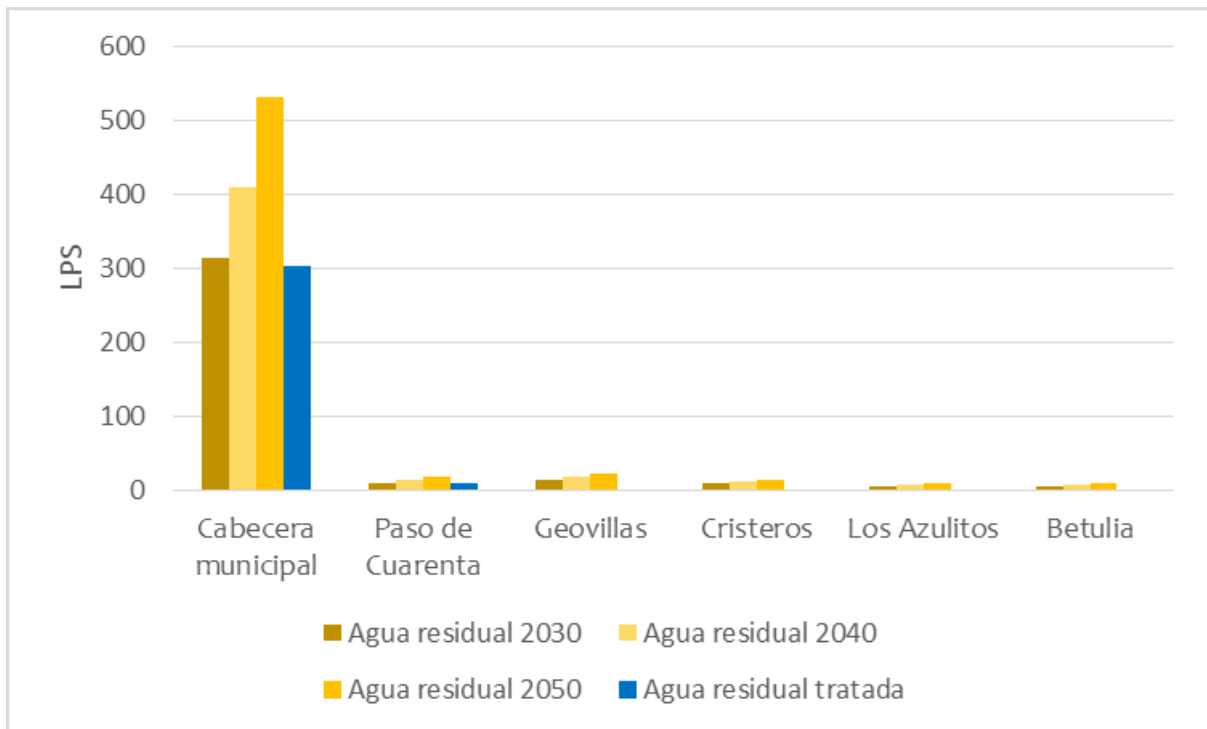
En la tabla 1, muestra las plantas de tratamiento de agua residual instaladas dentro de las localidades del área de estudio y los volúmenes de agua residual que se tratan de acuerdo con la capacidad con la que fueron diseñadas. Debido a la falta de información en ciertas fuentes donde se menciona la capacidad de diseño y no su capacidad de operación, motivo por el cual se utiliza esta última en el cálculo mencionado. La información sobre la capacidad de operación es importante para saber el funcionamiento y el porcentaje en el cual operan las plantas, sin embargo, debido a la falta de datos, para el análisis con el fin de determinar el déficit de tratamiento se utilizó solo la capacidad máxima con la cual se diseñaron, por lo que los datos aquí presentados sobre la capacidad de tratamiento pueden estar sobreestimado. El déficit quedó expresado con la diferencia entre los volúmenes de AR que se generan de acuerdo con el número de habitantes en la localidad y la dotación de agua que se estima que recibe cada habitante, respecto a los datos mencionados anteriormente.

Localidad	Población (2020)	Consumo (LPS)	AR doméstica generada (LPS)	Agua residual uso industrial/servicios/pecuario	PTAR	Tipo de proceso	Situación	Capacidad de diseño (LPS)	Gasto medio de operación (LPS)	AR tratada (LPS)	Déficit de tratamiento (LPS)	Información reportada en talleres
Lagos de Moreno	111,569	246.64	184.98	17.45	Parque Industrial	Lodos activados convencional	En operación	3	2	107	<b>-95.43</b>	No está operando
					Rastro	Sin datos	Fuera de operación	5	0			Sin información
					El Tepetate	Lodos activados aeración extendida	En operación	1	1			No está operando
					Lagos de Moreno	Lodos activados convencional	En operación	285	104			Es la única en operación
Paso del Cuarenta	3,78	8.36	6.27	0.04	Presá El Cuarenta	Lodos activados convencional	En operación	10	9	9	<b>2.69</b>	No está funcionando
Geovillas Laureles del Campanario	4,762	10.53	7.90	09.07	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	<b>-16.96</b>	Sin información
Cristeros (Fraccionamiento)	3,073	6.79	05.09	4.81	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	<b>-9.91</b>	Sin información
Los Azulitos	2,166	4.79	3.59	0.00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	<b>-3.59</b>	Sin información
Betulia	1,801	3.98	2.99	0.03	Betulia	Fosa séptica	Fuera de operación	5	0	0	<b>-3.02</b>	Sin información

Tabla 1. Volumen generado vs volumen tratado en PTARs del área de estudio

Fuente: Elaboración propia con datos de REPDA (2021)

La proyección de los escenarios futuros se realizó a partir de considerar la población municipal para el año 2040 y 2050 (obtenido del apartado **crecimiento poblacional en escenario tendencial**) y tomando en cuenta las PTARs instaladas dentro de las localidades del área de estudio, además de tener presente como supuesto que aún funciona a la máxima capacidad con la que fueron diseñadas. La gráfica 1 muestra la proyección de saneamiento de las aguas residuales domésticas para las localidades del área de estudio y su comparativa con los volúmenes producidos de agua residual doméstica.



Gráfica 1. Escenarios de agua residual generados para los años 2040 y 2050.  
Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Ahora bien, en las proyecciones de la capacidad de saneamiento de agua residual con la que cuenta cada localidad del área de estudio en contraposición con el volumen de agua residual que es entregado a la red de alcantarillado, se puede apreciar, como es de esperarse, a mayor población mayor aportación de agua residual. En esa misma línea, las localidades con mayor población son las mismas que muestran una capacidad limitada para tratar sus aguas residuales, el crecimiento poblacional rebasa a los proyectos involucrados en el tratamiento de agua residual.

Los modelos de gestión del agua están quedando obsoletos y son insostenibles debido al costo y mantenimiento de las PTARs, dificultando el tratar el agua residual que se genera en las ciudades. La gestión del agua debe seguir un modelo de reutilización del recurso hídrico al igual que contar con métodos alternativos de tratamiento de agua residual. Es fundamental recalcar la importancia de conservar los ecosistemas evitando la contaminación de los cuerpos receptores; con la intención de evitar el deterioro del medio ambiente y desabasto de agua como se ha mostrado en otros apartados del POEL.

## Bibliografía

REPDA (2021) Concesiones de agua subterránea al 2021 según información proporcionada por la CONAGUA.

REPDA (2021) Concesiones de agua superficial al 2021 según información proporcionada por la CONAGUA.

## 8. Susceptibilidad hídrica

### Introducción

Este apartado contiene la metodología empleada para definir el estado de las microcuencas del área de estudio hidrológico con respecto a su disponibilidad hídrica y la calidad del agua.

### Datos de partida y preprocesado de información

Una vez determinadas las variables asociadas al recurso hídrico, se procedió a determinar a partir de un análisis multicriterio el grado de susceptibilidad del mismo en las microcuencas que conforman el área de estudio. Este grado funge como indicador de la aptitud para poder llevar a cabo las actividades productivas dependientes en mayor o menor medida del agua.

Las variables se agruparon en 4 componentes: disponibilidad, vulnerabilidad al cambio climático, calidad del agua y presión por extracción. El peso otorgado a cada una de ellas se muestra en el gráfico siguiente:

VARIABLE	JERARQUÍA	PESO	FACTOR	JERARQUÍA	SUBPESO
Disponibilidad	1	0,4	Balance hídrico superficial por microcuencas	1	0,5
			Balance hídrico subterráneo por microcuencas	2	0,5
Vulnerabilidad al CC	4	0,15	Vulnerabilidad de la producción ganadera al estrés hídrico	2	0,2
			Vulnerabilidad de la producción forrajera al estrés hídrico	2	0,2
			Vulnerabilidad de estrés hídrico de las presas	1	0,6
Calidad	2	0,25	Cuerpos de agua contaminados	1	0,7
			Acuíferos contaminados	2	0,3
Presión por extracción	3	0,2	Extracciones superficiales y balance hídrico superficial por microcuenca	1	0,5
			Extracciones subterráneas y balance hídrico subterráneo por microcuenca	2	0,5

Tabla 1. Jerarquización de las variables del recurso hídrico.  
Fuente: Elaboración propia.

## Metodología

Se utilizaron las siguientes ponderaciones para calcular la aptitud hídrica por microcuenca, a partir del análisis generado previamente en el apartado de hidrología:

Variable	Unidad	Alta - 4	Moderada - 3	Poca - 2	Nula - 1
Disponibilidad hídrica superficial	hm <sup>3</sup>	>10	2 a 10	0 a 2	<0
Disponibilidad hídrica subterránea	hm <sup>3</sup>	>10	2 a 10	0 a 2	<0
Vulnerabilidad de la producción ganadera al estrés hídrico	categoría	Baja	Moderadamente baja	Media	Alta
Vulnerabilidad de la producción forrajera al estrés hídrico	categoría	Baja	Moderadamente baja	Media	Alta
Vulnerabilidad de estrés hídrico de las presas	categoría	Moderadamente baja	Moderadamente alta	Alta	Muy alta
Cuerpos de agua contaminados	binario	No contaminado	No data	No data	Contaminado
Acuíferos contaminados	binario	No contaminado	No data	Contaminado	No data
Presión por extracción superficial	%	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
Presión por extracción subterránea	%	Baja	Moderada	Alta	Muy alta

Tabla 2. Ponderaciones de las variables del recurso hídrico.

Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Se presenta el mapa de susceptibilidad hídrica por microcuenca. La susceptibilidad hídrica es inversamente proporcional a la aptitud hídrica. De las 25 microcuencas, 2 presentan susceptibilidad muy alta, 17 tienen susceptibilidad alta y 6 moderada. Ninguna presentó ni susceptibilidad baja, ni muy baja. En el mapa se muestra en verde las que tienen susceptibilidad moderada, y en tonos rojos, las que tienen susceptibilidad alta, resaltando en un color más intenso aquellas que dieron valores mayores de susceptibilidad.

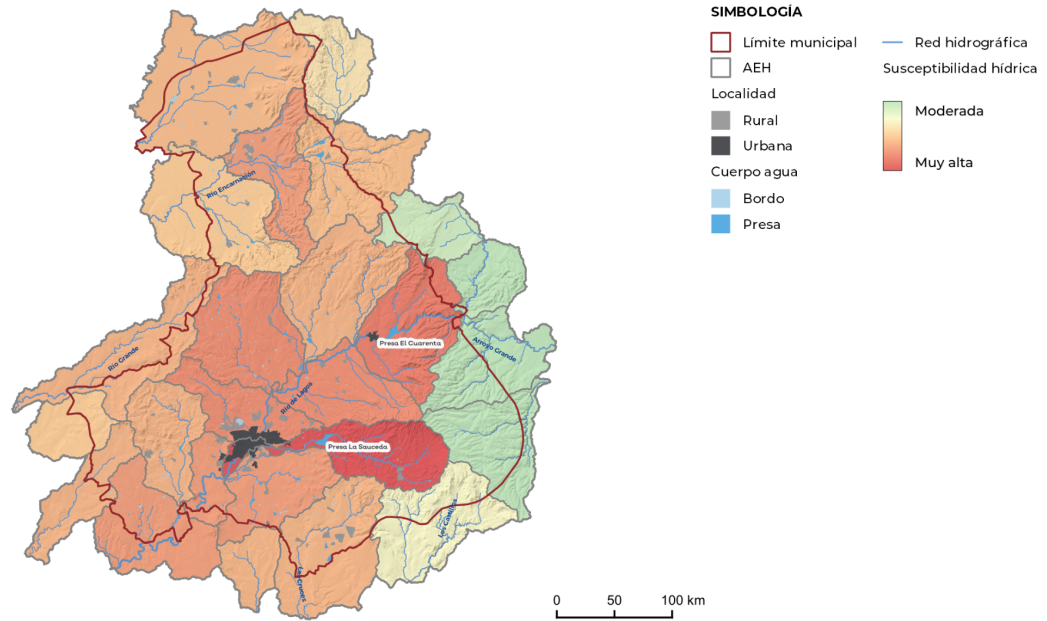


Figura 1. Mapa de la susceptibilidad hídrica en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

## Bibliografía

INECC. (2021). ¿Qué es el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático o ANVCC?. Recuperado de:  
<https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/#:~:text=De%20acuerdo%20con%20la%20Ley,incluyendo%20la%20variabilidad%20clim%C3%Altica%20y>

INECC. (2019). Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático. Recuperado de:  
<https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/index.html#zoom=6&lat=20.8503&lon=-103.6039&layers=1>