

AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP) Proyecto TH-1822.1 Informe final

COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

Luis González Hita
Juan Carlos Aparicio González
Blanca de Jesús Carteño Martínez
Dustin Silverio Mañón Flores

México, 2018

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- ANTECEDENTES	1
3.- OBJETIVO	3
4.- MARCO FÍSICO	3
Provincias Fisiográficas.....	3
Provincias de la Precipitación Pluvial	4
Precipitación (mm) acumulada mensual.....	7
Temperatura (°C) media promedio mensual	17
5.- RED NACIONAL DE MONITOREO DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP).....	28
Colector de agua de lluvia	29
Selección del sitio	30
Instalación	31
Manual para el mantenimiento del colector de lluvia.....	48
Caracterización Isotópica	63
Análisis químicos	75
6.- METODOLOGÍAS DE RECIENTE DESARROLLO	81
Medición de isótopos estables por espectroscopía láser	81
Instalación del analizador láser modelo LIWA 45-EP en el laboratorio de espectrometría de masas del IMTA	88
Pruebas de medición con Deuterio ultra enriquecido.....	90
Unidad de enriquecimiento de Tritio ambiental (TEU).....	94
7.- CAPACITACIÓN.....	102
Capacitación del personal en laboratorios del extranjero.....	102
Curso Nacional de Isótopos estables en el estudio de las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas.....	103
8.- CONCLUSIONES	105
9.- BIBLIOGRAFÍA.....	106

FIGURAS

Figura 1	Provincias Fisiográficas	4
Figura 2	Provincias de la precipitación pluvial.....	5
Figura 3	Regiones geográficas de la precipitación.....	6
Figura 4	Distribución de la precipitación media mensual en México (Méndez et al., 2007) 6	
Figura 5	Precipitación (mm) acumulada mensual enero 2018	8
Figura 6	Precipitación (mm) acumulada mensual febrero 2018	9
Figura 7	Precipitación (mm) acumulada mensual marzo 2018	10
Figura 8	Precipitación (mm) acumulada mensual abril 2018.....	11
Figura 9	Precipitación (mm) acumulada mensual mayo 2018.....	12
Figura 10	Precipitación (mm) acumulada mensual junio 2018.....	13
Figura 11	Precipitación (mm) acumulada mensual julio 2018	14
Figura 12	Precipitación (mm) acumulada mensual agosto 2018.....	15
Figura 13	Precipitación (mm) acumulada mensual septiembre 2018.....	16
Figura 14	Precipitación (mm) acumulada mensual octubre 2018	17
Figura 15	Temperatura (°C) media mensual enero 2018.....	19
Figura 16	Temperatura (°C) media mensual febrero 2018.....	20
Figura 17	Temperatura (°C) media mensual marzo 2018	21
Figura 18	Temperatura (°C) media mensual abril 2018	22
Figura 19	Temperatura (°C) media mensual mayo 2018	23
Figura 20	Temperatura (°C) media mensual junio 2018	24
Figura 21	Temperatura (°C) media mensual julio 2018.....	25
Figura 22	Temperatura (°C) media mensual agosto 2018	26
Figura 23	Temperatura (°C) media mensual septiembre 2018	27
Figura 24	Temperatura (°C) media mensual octubre 2018	28
Figura 25.	Colector totalizador de la precipitación pluvial, Mod. RS2 PALMEX.....	29
Figura 26	Propuesta de sitios para la instalación de los nuevos colectores de lluvia.	32
Figura 27	Observatorio Piedras Negras. Coahuila	33
Figura 28	Colector de lluvia en el Observatorio Piedras Negras. Coahuila.....	33
Figura 29	Observatorio Cd. Juárez. Chihuahua	34
Figura 30	Colector de lluvia en el Observatorio Cd. Juárez. Chihuahua	34

Figura 31	Observatorio Pachuca. Hidalgo.....	35
Figura 32	Colector de lluvia en el Observatorio Pachuca. Hidalgo	35
Figura 33	Observatorio Tulancingo. Hidalgo	36
Figura 34	Colector de lluvia en el Observatorio Tulancingo. Hidalgo.....	36
Figura 35	Observatorio Cd. Victoria. Tamaulipas.....	37
Figura 36	Colector de lluvia en el Observatorio Cd. Victoria. Tamaulipas.....	37
Figura 37	Observatorio Hermosillo. Sonora	38
Figura 38	Colector de lluvia en el Observatorio Hermosillo. Sonora	38
Figura 39	Observatorio Chetumal. Quintana Roo	39
Figura 40	Colector de lluvia en el Observatorio Chetumal. Quintana Roo	39
Figura 41	Observatorio La Paz. BCS	40
Figura 42	Colector de lluvia en el Observatorio La Paz. BCS	40
Figura 43	Observatorio Torreón. Coahuila	41
Figura 44	Colector de lluvia en el Observatorio Torreón. Coahuila	41
Figura 45	Observatorio Guadalajara. Jalisco	42
Figura 46	Colector de lluvia en el Observatorio Guadalajara. Jalisco	42
Figura 47	Observatorio Tapachula. Chiapas.....	43
Figura 48	Colector de lluvia en el Observatorio Tapachula. Chiapas.....	43
Figura 49	Estación pluviométrica La Venta. CDMX	44
Figura 50	Colector de lluvia en la Estación pluviométrica La Venta. CDMX	44
Figura 51	Estación pluviométrica Chiconautla II. CDMX.....	45
Figura 52	Colector de lluvia en la Estación pluviométrica Chiconautla II. CDMX.....	45
Figura 53	Estación pluviométrica Tetelco. CDMX	46
Figura 54	Colector de lluvia en la Estación pluviométrica Tetelco. CDMX.....	46
Figura 55	IMTA. Morelos.....	47
Figura 56	Colector de lluvia en el IMTA. Morelos.....	47
Figura 57	Red Nacional de Monitoreo de la Isotopía de la Precipitación Pluvial (RENIP).	
	61	
Figura 58	Isotopía del ciclo hidrológico	64

Figura 59	Distribución de la composición isotópica estable de las aguas meteóricas a nivel global. Los valores δD y $\delta^{18}O$ se ajustan a una recta de pendiente ocho y ordenada al origen 10 denominada Línea Meteórica Global	68
Figura 60	Evolución isotópica de las aguas superficiales y subterráneas en el ciclo hidrológico	69
Figura 61	Evolución isotópica del agua subterránea en cuencas sedimentarias: 1. Hidratación de silicatos, 2. Intercambio con H_2S , 2H e hidrocarburos, 3. Reducción de sulfatos, oxidación de compuestos orgánicos e hidrógeno molecular, 4. Evaporación de agua dulce.	71
Figura 62	Composición isotópica estable.....	74
Figura 63	Analizador Láser de isótopos estables de agua Los Gatos Reseach Inc instalado en el laboratorio de espectrometría de masas del IMTA	82
Figura 64	Paquetes que incluyen el Analizador láser para su Instalación	89
Figura 65	Analizador Laser Modelo LIWA-45-EP Instalado en el laboratorio de espectrometría de masas del IMTA.....	90
Figura 66	Brazo Robótico de inyección Instalado, configurado y programado en el laboratorio de espectrometría de masas del IMTA	92
Figura 67	Proceso de neutralización de alcalinidad	99
Figura 68	Tríptico del Curso Nacional.....	104
Figura 69	Participantes del Curso Nacional.	104

TABLAS

Tabla 1	Precipitación (mm) acumulada mensual por entidad federativa	7
Tabla 2	Temperatura (°C) media promedio por entidad federativa	18
Tabla 3	Datos de los quince colectores de lluvia instalados	60
Tabla 4	Colectores de lluvia de la RENIP	62
Tabla 5	Resultados de oxígeno-18 y deuterio. Hoja 1/3.....	72
Tabla 6	Resultados de oxígeno-18 y deuterio. Hoja 2/3.....	73
Tabla 7	Resultados de oxígeno-18 y deuterio. Hoja 3/3.....	74
Tabla 8	Resultados químicos. Hoja 1/5.....	76
Tabla 9	Resultados químicos. Hoja 2/5.....	77
Tabla 10	Resultados químicos. Hoja 3/5.....	78
Tabla 11	Resultados químicos. Hoja 4/5.....	79
Tabla 12	Resultados químicos. Hoja 5/5.....	80

RESUMEN

Como parte de la ampliación de la cobertura de la Red Nacional de Monitoreo de la Precipitación Pluvial, se llevó a cabo la instalación de 15 colectores de lluvia, distribuidos en las Provincias Fisiográficas y en las Provincias de la Precipitación Pluvia. Los colectores de lluvia se colocaron en los observatorios meteorológicos del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua, así como, en las estaciones pluviométricas pertenecientes al Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Durante esta campaña se capacitó al personal que se encargará de tomar las muestras de lluvia y de darle mantenimiento al colector de lluvia. Se les dotó de suficiente material para el muestreo y envió al laboratorio de Hidrología Isotópica del Instituto.

La RENIP se encuentra operando con 28 colectores de la precipitación pluvial, obteniéndose resultados del análisis isotópico y químico de las muestras lluvia de cada uno de los sitios que conforman la RENIP.

Se presentan metodologías de reciente desarrollo en la medición de isótopos estables por espectroscopía láser y en tritio ambiental a través de una Unidad de Enriquecimiento Electrolítico (TEU).

Se llevó a cabo la capacitación del personal en el Organismo Internacional de Energía Atómica en el uso de la Unidad de Enriquecimiento Electrolítico (TEU), así como, en el manejo y procesamiento de datos de Tritio en el laboratorio de Hidrología Isotópica utilizando el software TRIMS (*Tritio Information Management System*).

En el Instituto se realizó el 1er. Curso Nacional de la Aplicación de Isótopos en el Estudio de las Aguas Atmosféricas, Superficiales y Subterráneas, con la participación de personal del Servicio Meteorológico Nacional, Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Comité Técnico de Aguas Subterráneas, Universidad Nacional Autónoma de México y del IMTA.

 	<p align="center">AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)</p>	 <p align="right">IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</p>
<p align="center">Página 1 de 107</p>	<p align="center">México, 2018</p>	<p align="right">Clave: F.CO.2.04.01</p>

1.- INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la composición isotópica de la precipitación pluvial, que es la fuente de recarga de los sistemas hidrológicos, permitirá fortalecer la evaluación nacional de los recursos hídricos, así como su administración y aprovechamiento sustentables del agua en cuencas y acuíferos.

Los resultados de las series de datos isotópicos generados, aportará información existente en la naturaleza para el estudio y entendimiento de las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas.

El conocimiento obtenido de datos isotópicos propios de cada región hidrológica, contribuirá a la administración y gestión eficiente de los recursos hídricos subterráneos, simulación del comportamiento hidrogeológico del funcionamiento de acuíferos, cuencas y componentes del ciclo hidrológico mediante modelación numérica y la caracterización de recursos hídricos profundos aplicados y/o asociados a la explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales.

2.- ANTECEDENTES

Los isótopos ambientales son trazadores gratuitos existentes en la naturaleza, que aportan información valiosa sobre el comportamiento de las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas. Para generar esta información, es necesario monitorear periódicamente la composición isotópica de la lluvia en las condiciones ambientales donde se precipita.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 2 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

En la parte inicial de planeación del monitoreo del contenido isotópico representativo de la lluvia a nivel nacional, se determinaron las condiciones y requerimientos para instrumentar una red de cobertura nacional, para el monitoreo de la composición isotópica de la precipitación pluvial, que integra las quince provincias fisiográficas y las trece provincias de lluvia de la República Mexicana.

La Red Nacional de Monitoreo de la Composición Isotópica de la Precipitación Pluvial (RENIP) cuenta en su primera etapa con trece colectores de lluvia acumulada, instalados en los espacios de los observatorios meteorológicos de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional.

El mantenimiento de los equipos, consumibles, piezas de repuesto y envío de muestras al laboratorio, mediante servicio de paquetería, son solventados por el IMTA.

La toma de muestras, medición de lluvia acumulada y preparación del lote de muestras se realiza con el apoyo del personal técnico de los observatorios meteorológicos de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN). El personal fue técnicamente capacitado durante la instalación de los equipos.

La composición del contenido de isótopos estables de deuterio y oxígeno-18 y de tritio ambiental de muestras de lluvia acumulada de la RENIP, se mide en el laboratorio de hidrología isotópica del IMTA, cuyas metodologías de análisis son evaluadas mediante ejercicio de intercomparación con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 3 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

3.- OBJETIVO

Generar herramientas isotópicas y químicas para determinar las variables que gobiernan el funcionamiento de los acuíferos y el comportamiento del agua en el ciclo hidrológico, bajo las condiciones climatológicas, orográficas y ambientales del territorio nacional.

4.- MARCO FÍSICO

La Fisiografía es una ciencia que tiene por objeto la descripción de la Tierra y de los fenómenos localizados en ella. Es una visión general de las formas del relieve, identificadas y definidas a partir del análisis integral de la información topográfica, geológica, hidrológica y edafológica, para formar unidades relativamente homogéneas, representado las diferentes provincias y subprovincias en las que se ha dividido al país, de acuerdo con su geología y topografía

Provincias Fisiográficas

Las provincias fisiográficas son regiones en las cuales el relieve es el resultado de la acción de un mismo conjunto de agentes modeladores del terreno, así como de un mismo origen geológico, lo mismo que un mismo o muy semejante tipo de suelo y de la vegetación que sustenta.

La gran variedad de formas que presenta el relieve de México, hace que sea uno de los países del mundo con mayor diversidad topográfica y geológica. Así, la diversidad topográfica influye en las características climáticas, el tipo de suelo y la vida silvestre que la sustenta, por lo tanto, una provincia fisiográfica es un conjunto estructural de origen geológico unitario, con morfología propia y distintiva. **(Figura 1)**.

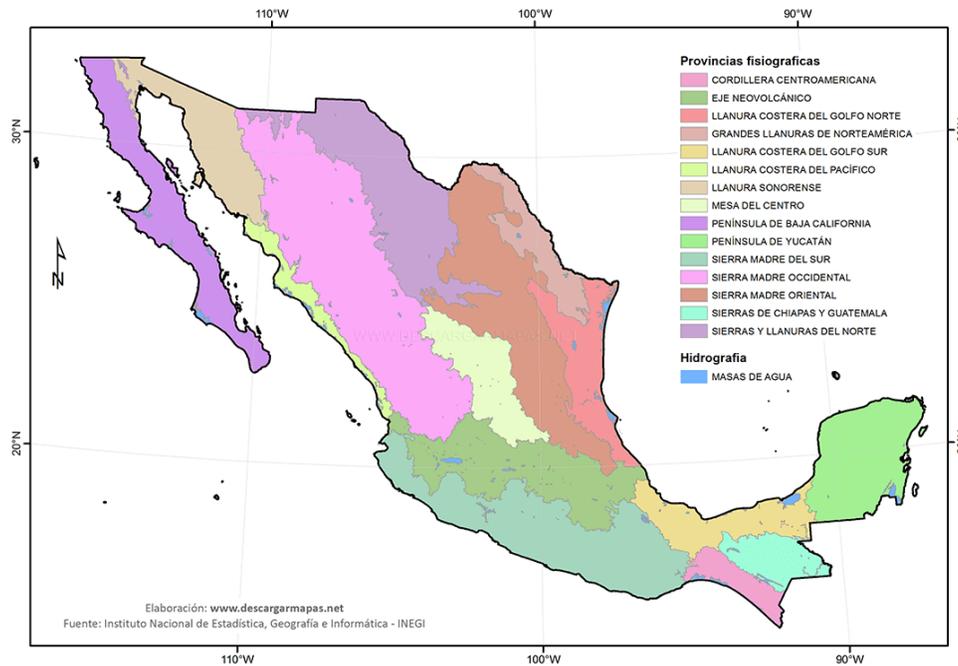


Figura 1 Provincias Fisiográficas

Provincias de la Precipitación Pluvial

Una provincia de la precipitación pluvial es una región clasificada en base a la distribución anual de la precipitación, y que toma en cuenta el tiempo y la cantidad de lluvia. Existen diversos autores, por ejemplo, Page 1929 (**Figura 2**) y Méndez et al. 2007 (**Figura 3** y **Figura 4**), que han estudiado este fenómeno natural en el territorio nacional.



Figura 2 Provincias de la precipitación pluvial

Méndez (et al., 2007) hace un análisis de tendencias de la precipitación (**Figura 3**) entre los años de 1920 a 2004, donde sus estudios revelan cambios significativos, especialmente durante el verano (**Figura 4**), ya que registra incrementos y decrementos de aproximadamente 30 milímetros (mm) por década, mientras que el invierno registra solamente 8 mm por década.



Figura 3 Regiones geográficas de la precipitación

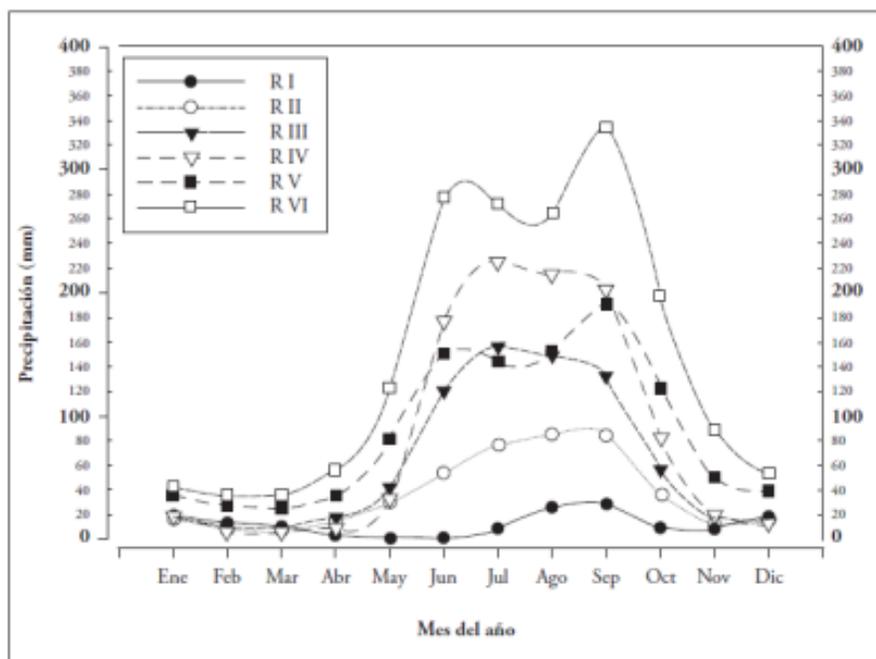


Figura 4 Distribución de la precipitación media mensual en México (Méndez et al., 2007)

Precipitación (mm) acumulada mensual

Según datos de la lluvia total acumulada mensual del 2018, de la Comisión Nacional del Agua, en el territorio nacional el mes de abril contiene la menor lamina (9.1 mm) y septiembre es el de mayor precipitación (166 mm). Durante el año, hasta el mes de noviembre Baja California es la entidad con menor precipitación (100.6 mm) y Tabasco el estado con mayor lluvia registrada (1,866.1 mm). **Tabla 1.**

Tabla 1 Precipitación (mm) acumulada mensual por entidad federativa

		Precipitación (mm) por Entidad Federativa y Nacional 2018												
Entidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	
Aguascalientes	35.5	28.6	0.0	10.6	44.7	226.2	77.7	97.3	123.1	83.3	40.5		767.5	
Baja California	14.4	12.8	4.8	0.3	0.4	0.6	3.9	5.5	7.5	40.7	9.9		100.6	
Baja California Sur	0.6	9.1	0.0	0.0	0.0	15.3	6.9	19.6	76.6	21.5	0.5		150.2	
Campeche	105.7	19.2	15.5	120.0	45.8	160.5	164.1	241.5	202.1	160.9	127.2		1,362.4	
Coahuila	0.7	7.0	2.4	7.2	11.7	30.8	29.0	41.0	172.8	67.4	7.7		377.4	
Colima	5.2	2.6	0.0	0.0	19.0	317.3	140.5	298.9	337.0	292.3	198.3		1,611.1	
Chiapas	99.6	20.0	30.1	101.7	165.2	237.8	117.8	257.0	301.0	224.9	118.4		1,673.5	
Chihuahua	0.1	19.2	1.8	0.9	4.4	45.9	97.1	122.4	110.4	52.0	3.3		457.6	
Ciudad de México	7.9	7.7	12.2	44.5	59.1	127.4	85.9	198.2	120.7	86.8	31.1		781.4	
Durango	2.4	12.2	0.1	1.7	8.3	72.1	63.9	89.8	168.8	70.8	8.8		498.9	
Guanajuato	3.5	13.8	0.8	12.6	52.1	268.6	70.3	146.3	165.2	65.5	50.4		849.1	
Guerrero	1.7	2.0	1.4	13.3	60.8	280.3	93.7	256.6	197.1	188.7	58.9		1,154.6	
Hidalgo	27.1	15.2	14.8	48.6	29.5	111.5	40.9	79.6	72.4	93.3	35.2		568.0	
Jalisco	14.8	16.2	0.1	2.2	57.7	201.4	147.8	206.9	201.6	149.8	75.9		1,074.3	
Estado de México	11.5	17.5	6.8	41.7	89.5	241.2	112.6	223.9	172.2	112.6	64.5		1,093.9	
Michoacán	15.4	16.2	0.4	6.6	80.1	246.8	118.8	215.0	161.9	147.4	100.9		1,109.3	
Morelos	1.6	2.6	4.0	58.3	166.6	565.0	104.9	459.3	312.8	213.6	74.4		1,963.1	
Nayarit	3.5	4.1	0.0	0.2	7.2	171.8	219.4	367.8	379.4	168.6	30.5		1,352.5	
Nuevo León	16.5	18.0	3.6	53.8	47.9	82.0	37.8	21.3	226.9	46.6	14.2		568.6	
Oaxaca	25.0	13.6	20.5	49.3	73.2	231.7	86.2	208.4	178.6	257.9	44.1		1,188.5	
Puebla	32.4	14.3	29.7	84.6	72.1	260.1	76.9	238.8	173.1	167.3	84.8		1,234.1	
Querétaro	9.2	10.0	2.8	24.1	39.5	161.8	31.4	71.7	110.2	58.6	31.1		550.4	
Quintana Roo	89.8	19.1	50.0	78.0	160.6	230.2	90.7	129.5	146.8	162.3	82.2		1,239.1	
San Luis Potosí	19.5	20.8	7.3	41.6	47.4	131.6	25.1	67.0	164.1	74.6	30.9		629.8	
Sinaloa	0.4	14.7	0.1	0.1	0.6	98.3	148.5	291.1	320.4	70.5	5.6		950.2	
Sonora	1.6	34.3	0.9	0.1	0.3	43.1	120.1	147.8	109.0	81.8	1.0		540.0	
Tabasco	323.9	58.3	49.3	109.5	59.5	129.9	109.5	195.7	218.1	253.7	358.8		1,866.1	
Tamaulipas	27.3	12.4	12.2	79.0	62.6	124.7	26.2	29.4	203.5	75.3	18.4		671.1	
Tlaxcala	5.6	10.3	5.7	65.8	45.7	149.4	52.1	124.6	88.4	64.2	46.9		658.6	
Veracruz	112.7	37.2	57.4	90.1	35.1	154.0	120.6	218.0	197.6	332.5	93.8		1,449.0	
Yucatán	55.2	5.8	15.1	57.1	118.8	170.0	97.3	159.2	137.3	87.0	67.4		970.2	
Zacatecas	24.3	22.8	0.2	6.9	27.4	126.4	55.6	82.6	179.4	60.1	23.8		609.5	
Nacional	25.7	17.6	9.1	28.3	39.0	121.5	83.8	139.1	166.0	110.7	39.6		780.3	

Valores preliminares en milímetros, pueden variar en el curso del año debido a actualización de la base de datos.
Se actualiza mensualmente.

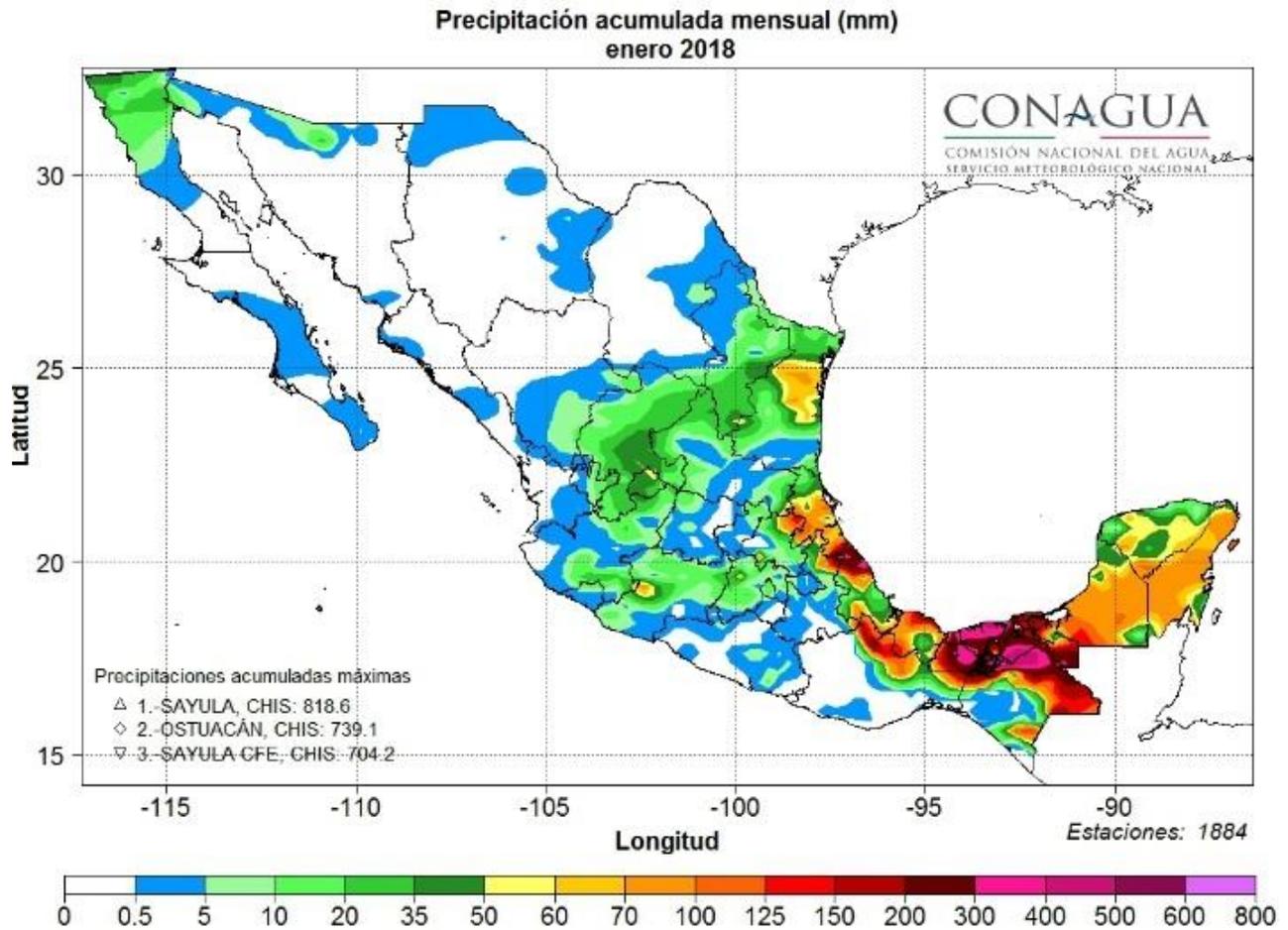


Figura 5 Precipitación (mm) acumulada mensual enero 2018

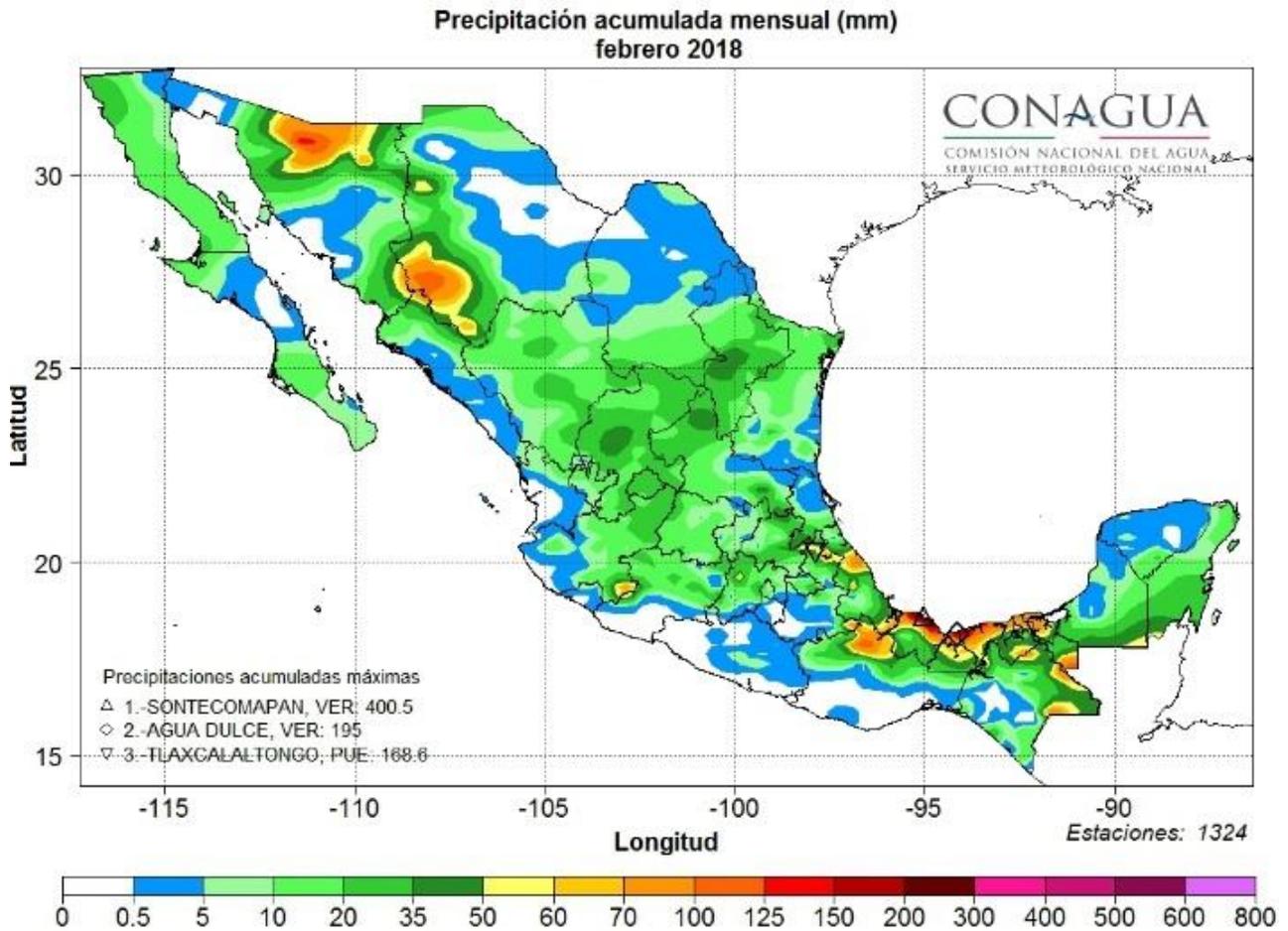


Figura 6 Precipitación (mm) acumulada mensual febrero 2018

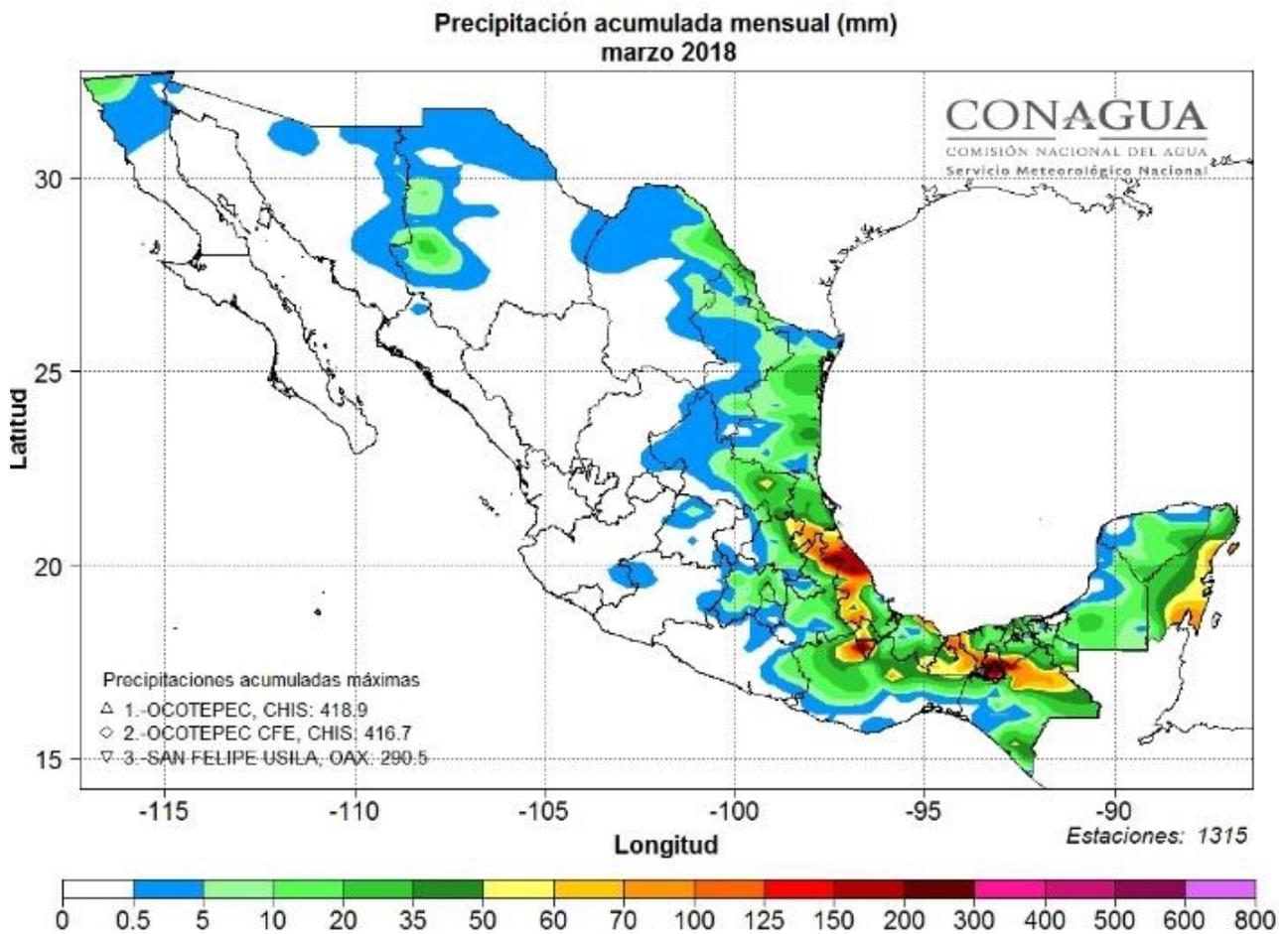


Figura 7 Precipitación (mm) acumulada mensual marzo 2018

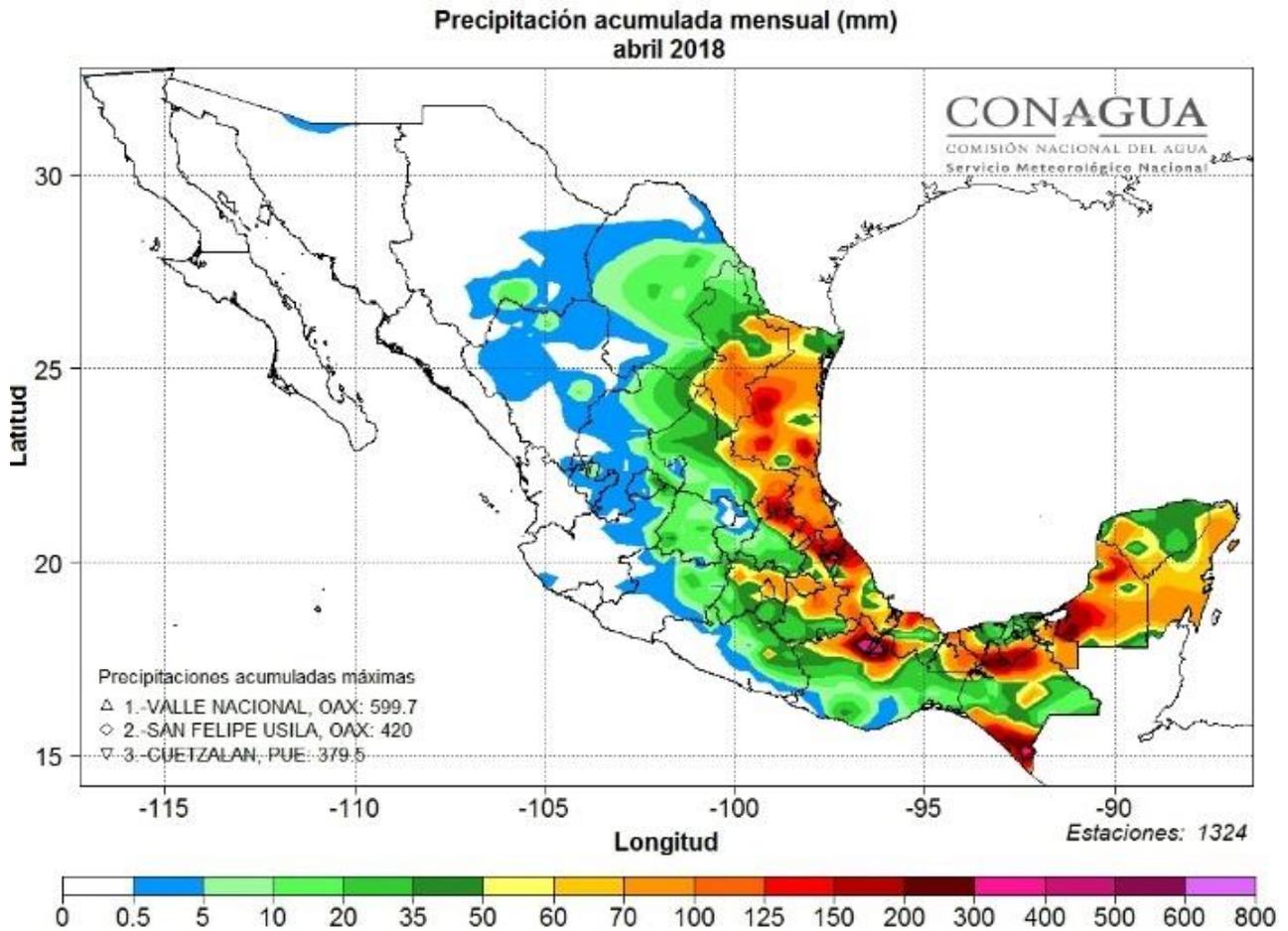


Figura 8 Precipitación (mm) acumulada mensual abril 2018

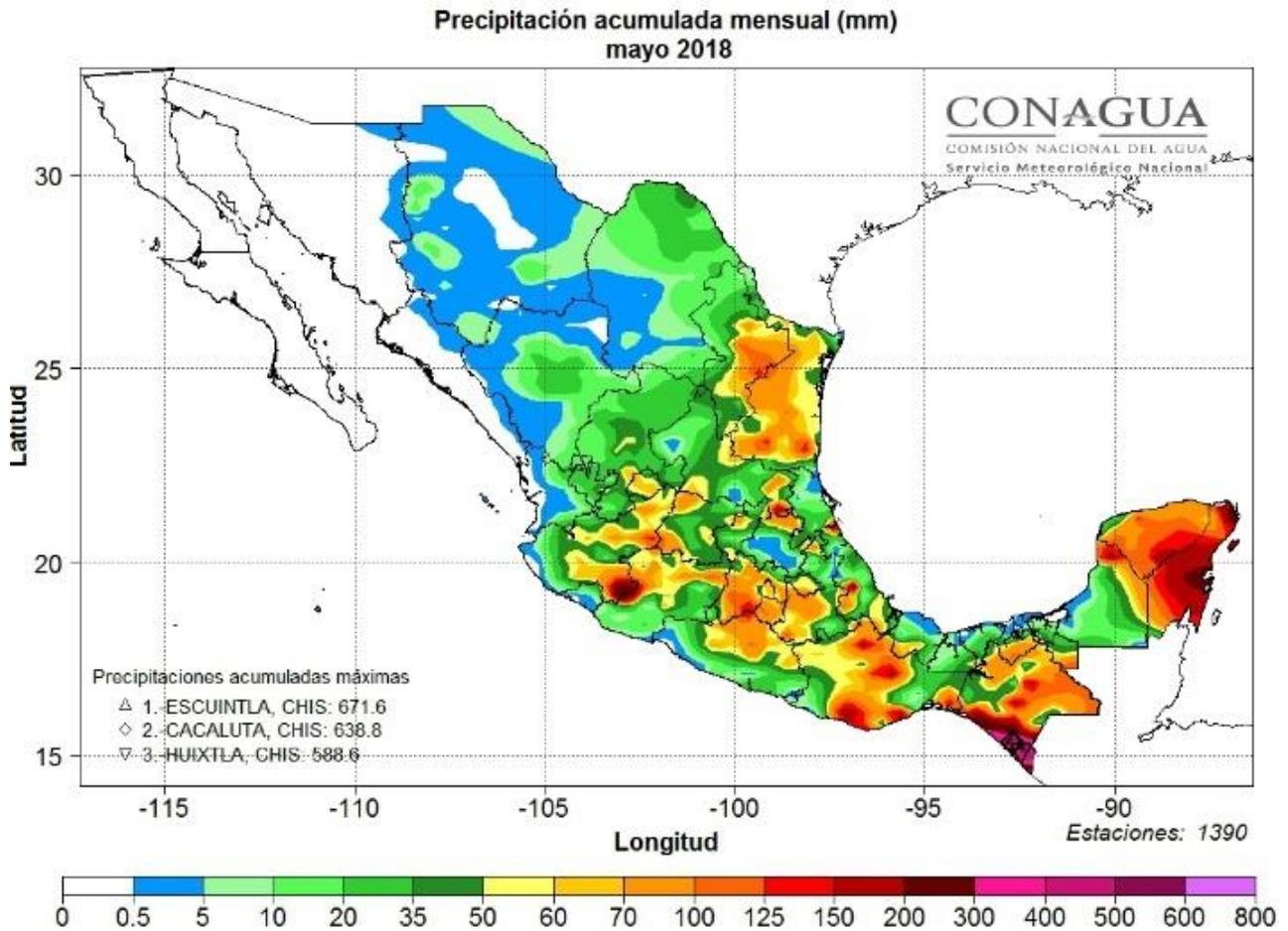


Figura 9 Precipitación (mm) acumulada mensual mayo 2018

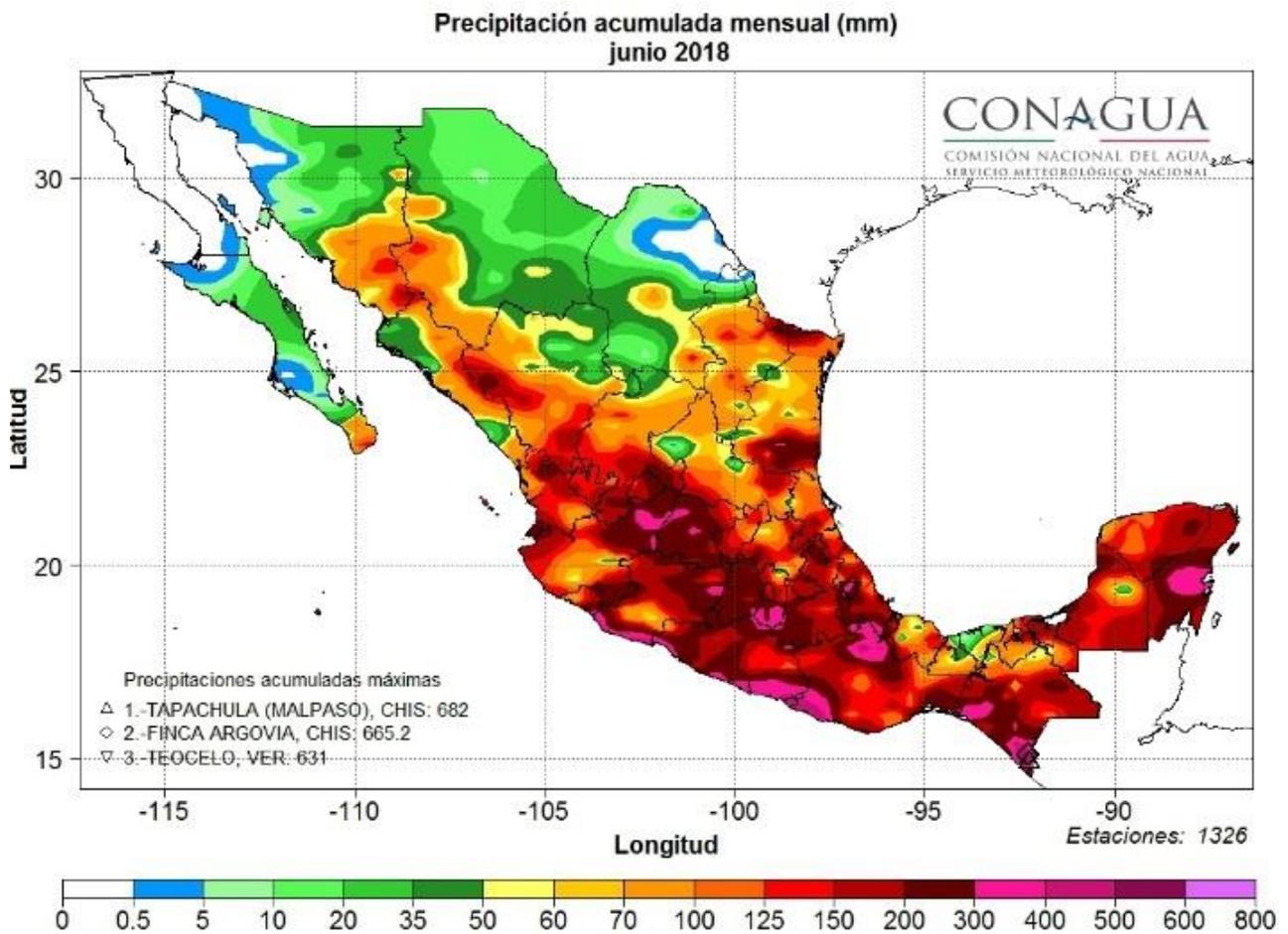


Figura 10 Precipitación (mm) acumulada mensual junio 2018

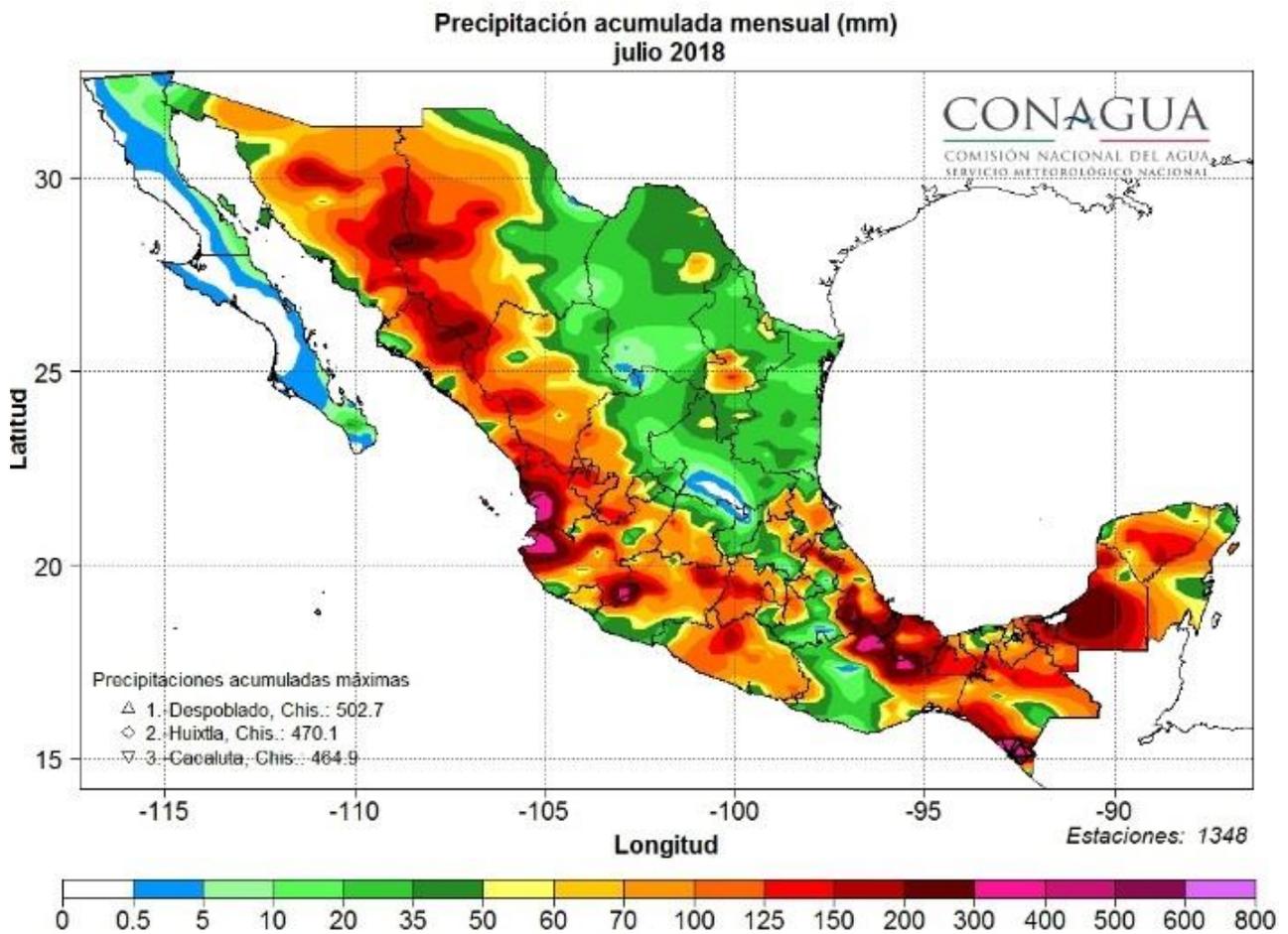


Figura 11 Precipitación (mm) acumulada mensual julio 2018

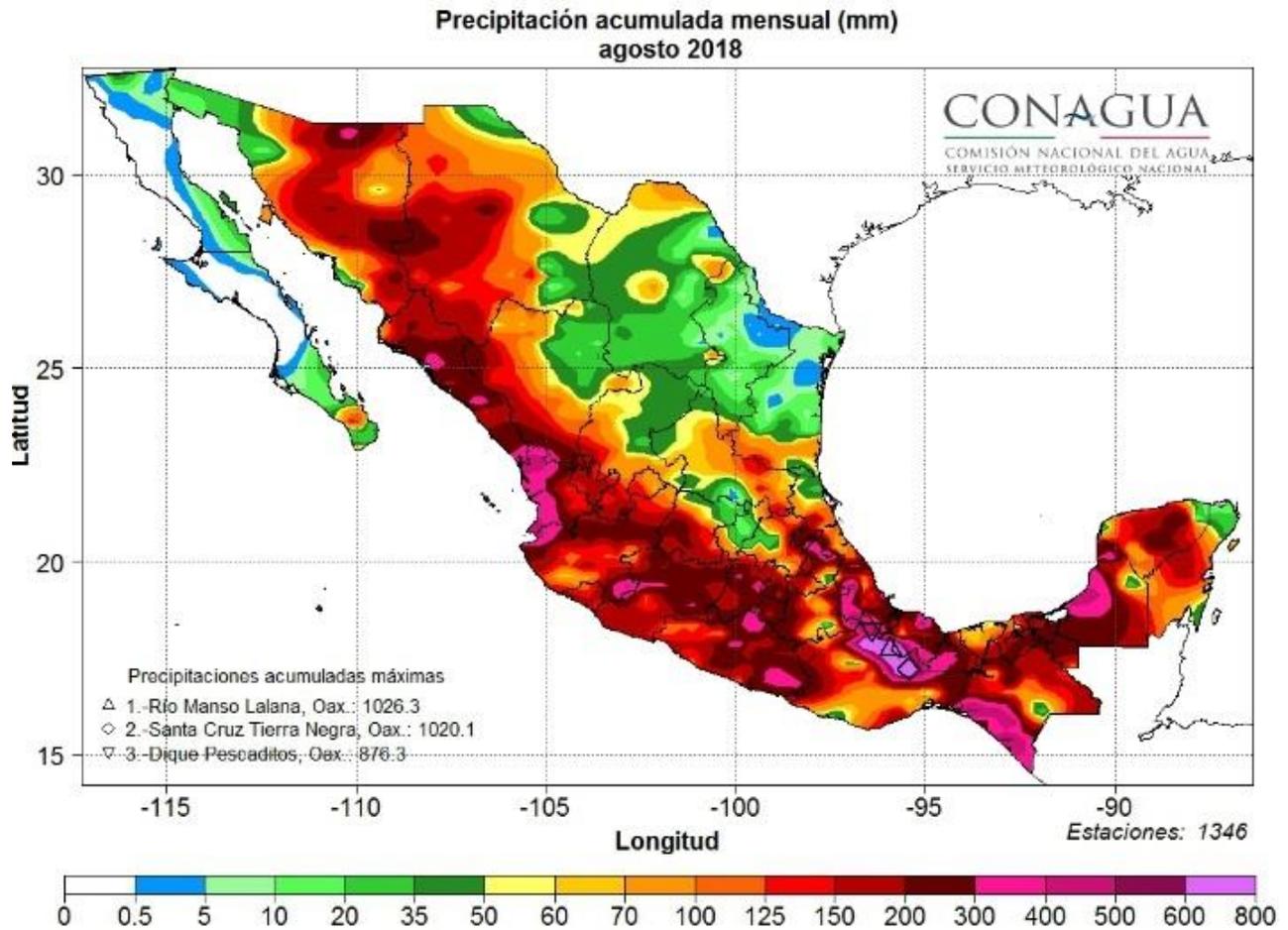


Figura 12 Precipitación (mm) acumulada mensual agosto 2018

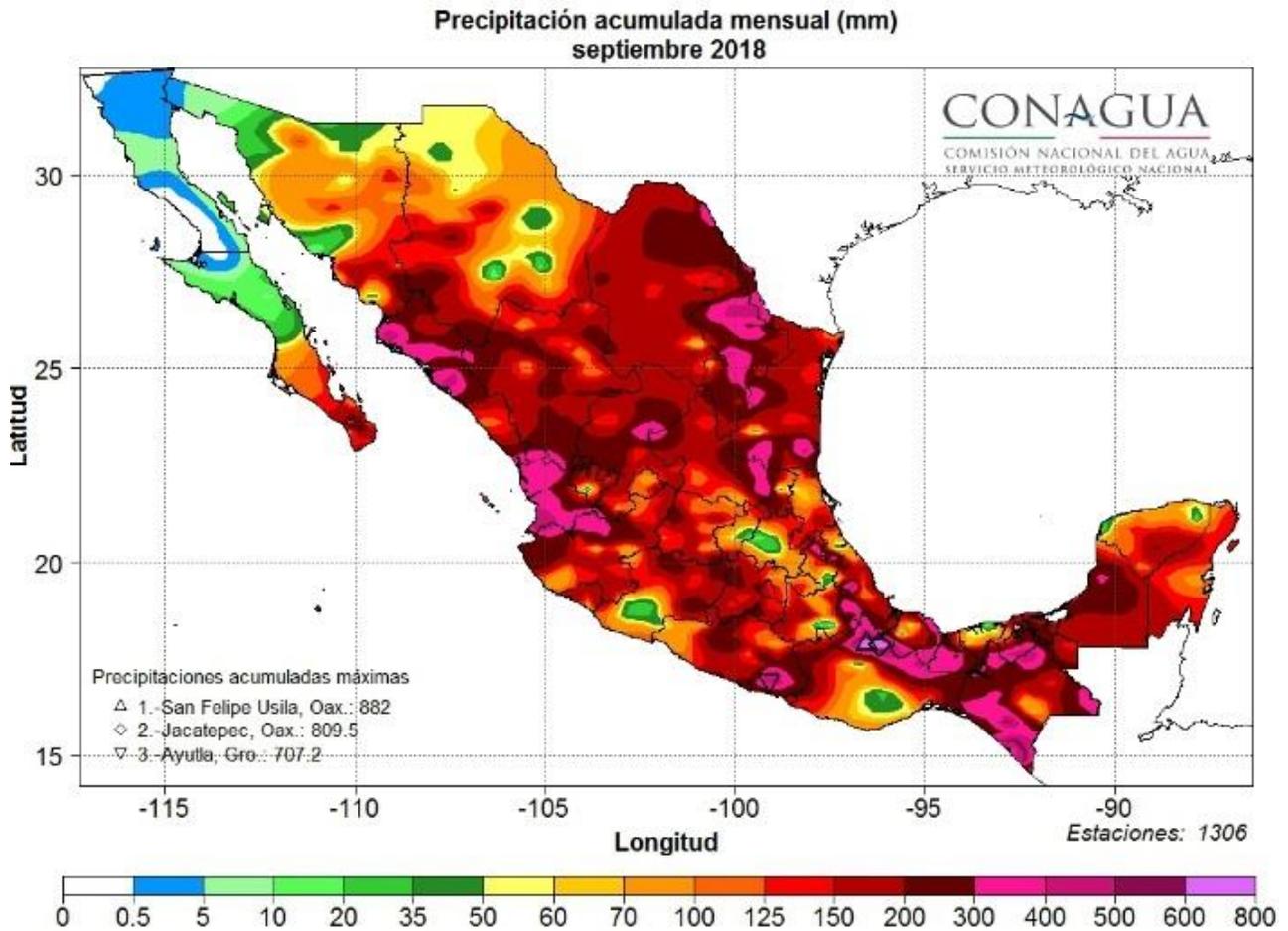
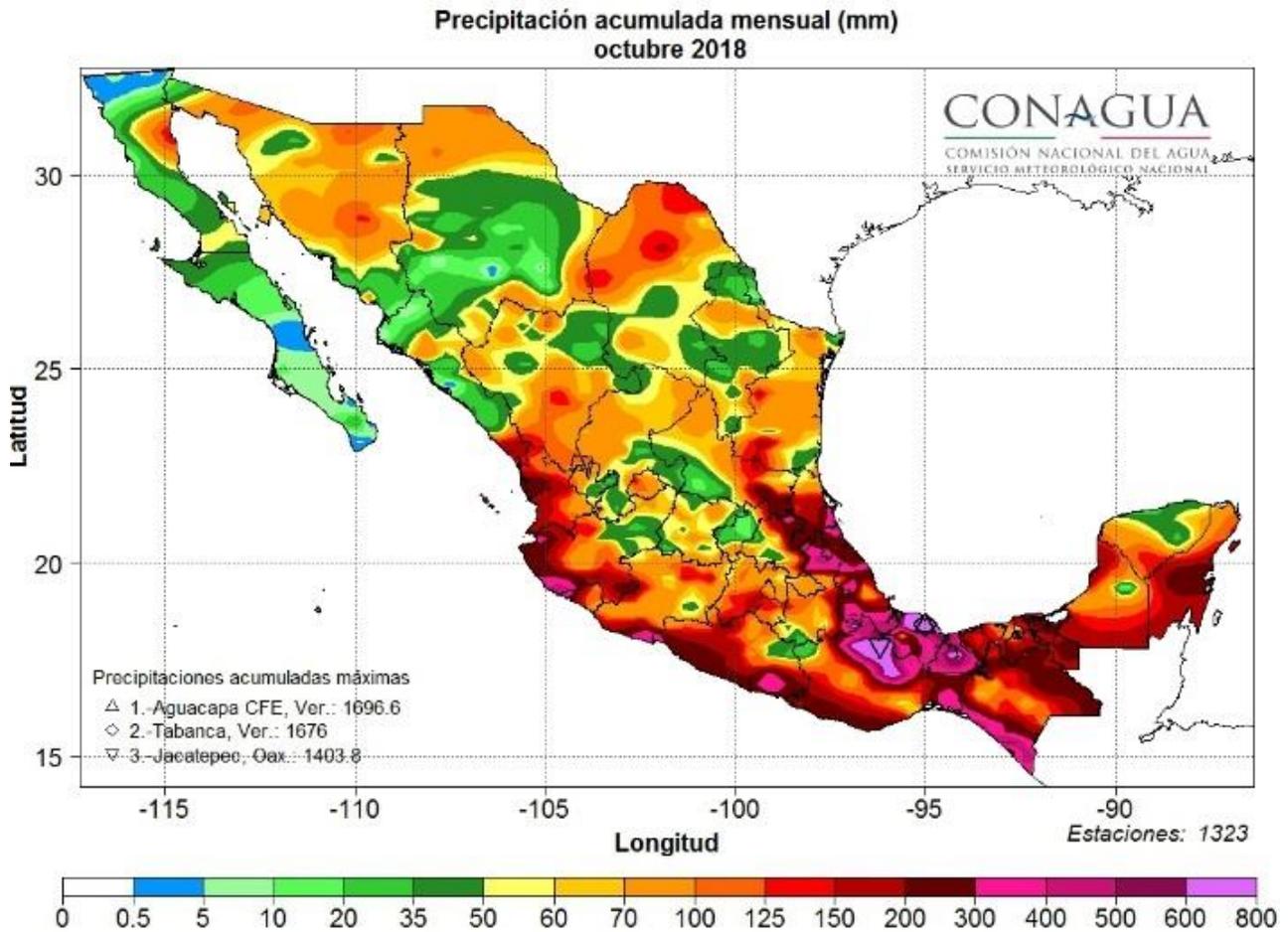


Figura 13 Precipitación (mm) acumulada mensual septiembre 2018



Temperatura (°C) media promedio mensual

En la base de datos hasta de la Comisión nacional del Agua, hasta noviembre, el mes con menor Temperatura (°C) media promedio es enero con 16 °C, mientras que con mayor Temperatura corresponde al mes de julio con 26.5 °C. **Tabla 2.**

Tabla 2 Temperatura (°C) media promedio por entidad federativa



Temperatura Media Promedio por Entidad Federativa y Nacional
2018

Entidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Aguascalientes	13.0	16.7	18.8	19.9	21.9	21.3	20.5	20.4	19.9	18.5	14.7		
Baja California	16.3	15.5	16.6	20.4	20.5	24.3	28.6	29.6	27.2	21.6	17.1		
Baja California Sur	19.7	19.9	20.7	22.9	24.8	26.9	29.9	29.9	29.3	25.7	22.1		
Campeche	22.3	26.1	27.5	28.5	28.9	28.8	29.0	28.4	28.4	27.4	26.0		
Coahuila	11.7	18.0	20.5	22.2	27.4	29.4	28.7	28.7	24.7	21.5	15.5		
Colima	25.2	26.2	25.8	25.8	28.7	28.4	29.5	28.4	28.4	27.8	26.5		
Chiapas	21.8	24.7	26.1	26.5	26.9	25.8	26.0	25.7	25.8	25.3	24.7		
Chihuahua	11.0	14.8	17.0	20.4	24.7	26.7	25.6	24.7	22.6	18.7	13.3		
Ciudad de México	13.4	17.0	19.2	19.3	20.3	19.6	19.0	18.2	18.7	18.0	16.0		
Durango	12.1	15.9	18.8	20.4	23.4	24.5	23.6	23.3	21.0	18.7	14.0		
Guanajuato	13.9	17.4	20.3	21.3	22.8	21.4	20.7	20.4	20.2	19.7	16.4		
Guerrero	22.9	24.4	25.7	26.5	27.1	26.0	26.5	25.2	25.4	25.0	24.2		
Hidalgo	13.4	16.7	18.5	19.5	20.4	20.7	21.0	20.7	20.9	19.8	17.1		
Jalisco	16.8	19.5	21.1	22.4	24.8	23.8	23.3	22.8	22.6	21.6	18.6		
Estado de México	10.5	13.8	15.5	16.0	16.9	16.7	16.2	15.8	16.2	15.5	13.5		
Michoacán	16.5	19.2	21.8	22.9	24.1	22.7	22.2	21.9	21.9	21.3	18.6		
Morelos	18.4	22.1	24.6	25.0	24.0	23.2	23.1	21.9	21.8	21.8	20.6		
Nayarit	21.7	24.7	24.6	25.4	28.6	29.3	29.0	28.4	28.2	27.5	24.9		
Nuevo León	12.3	18.6	21.5	21.9	26.1	27.8	28.1	28.6	25.9	22.1	16.3		
Oaxaca	20.2	23.1	24.9	24.9	26.6	24.1	24.5	24.7	24.8	24.6	23.2		
Puebla	13.1	17.0	19.1	19.3	20.1	20.4	19.5	19.0	19.6	18.7	16.8		
Querétaro	13.5	18.5	21.0	22.3	23.7	22.0	22.0	22.0	21.6	20.3	17.6		
Quintana Roo	23.1	26.4	26.7	28.0	28.5	29.2	29.9	29.6	29.0	28.2	26.9		
San Luis Potosí	15.5	21.9	23.7	24.1	26.8	27.4	27.4	27.0	26.5	23.9	19.9		
Sinaloa	20.9	22.4	23.0	25.1	28.2	30.4	30.9	29.7	29.0	27.8	23.6		
Sonora	16.7	16.4	19.2	22.7	25.4	30.0	30.8	29.4	29.0	23.3	17.8		
Tabasco	22.1	25.8	27.5	28.3	29.3	29.0	29.4	28.5	28.6	27.9	26.2		
Tamaulipas	15.1	22.0	23.9	24.5	28.0	29.3	30.0	30.1	28.6	24.9	19.4		
Tlaxcala	11.1	14.4	16.4	16.4	17.6	17.0	16.6	16.6	17.1	16.5	14.4		
Veracruz	16.9	21.3	22.8	23.0	25.1	25.7	25.3	24.5	25.0	23.4	21.1		
Yucatán	21.7	25.5	26.3	27.7	28.1	28.2	28.8	28.3	28.2	27.3	25.4		
Zacatecas	12.5	15.8	18.1	19.3	21.9	21.0	20.5	19.9	19.3	17.8	14.3		
Nacional	16.0	19.3	21.2	22.9	25.4	26.4	26.5	26.1	25.0	22.5	18.7		

Valores en °C, pueden variar de acuerdo a actualización de la base de datos.
Se actualiza mensualmente.

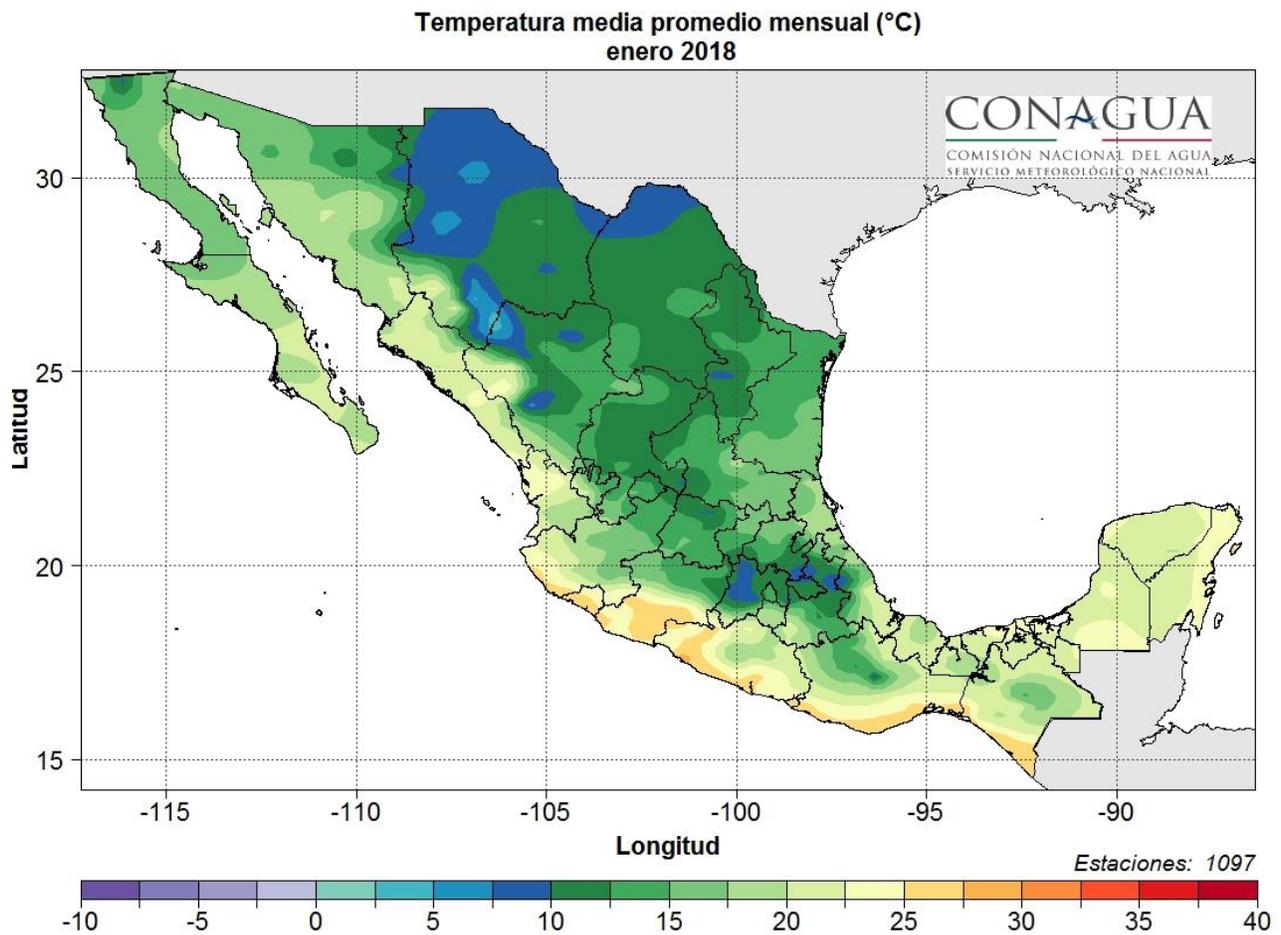


Figura 15 Temperatura (°C) media mensual enero 2018

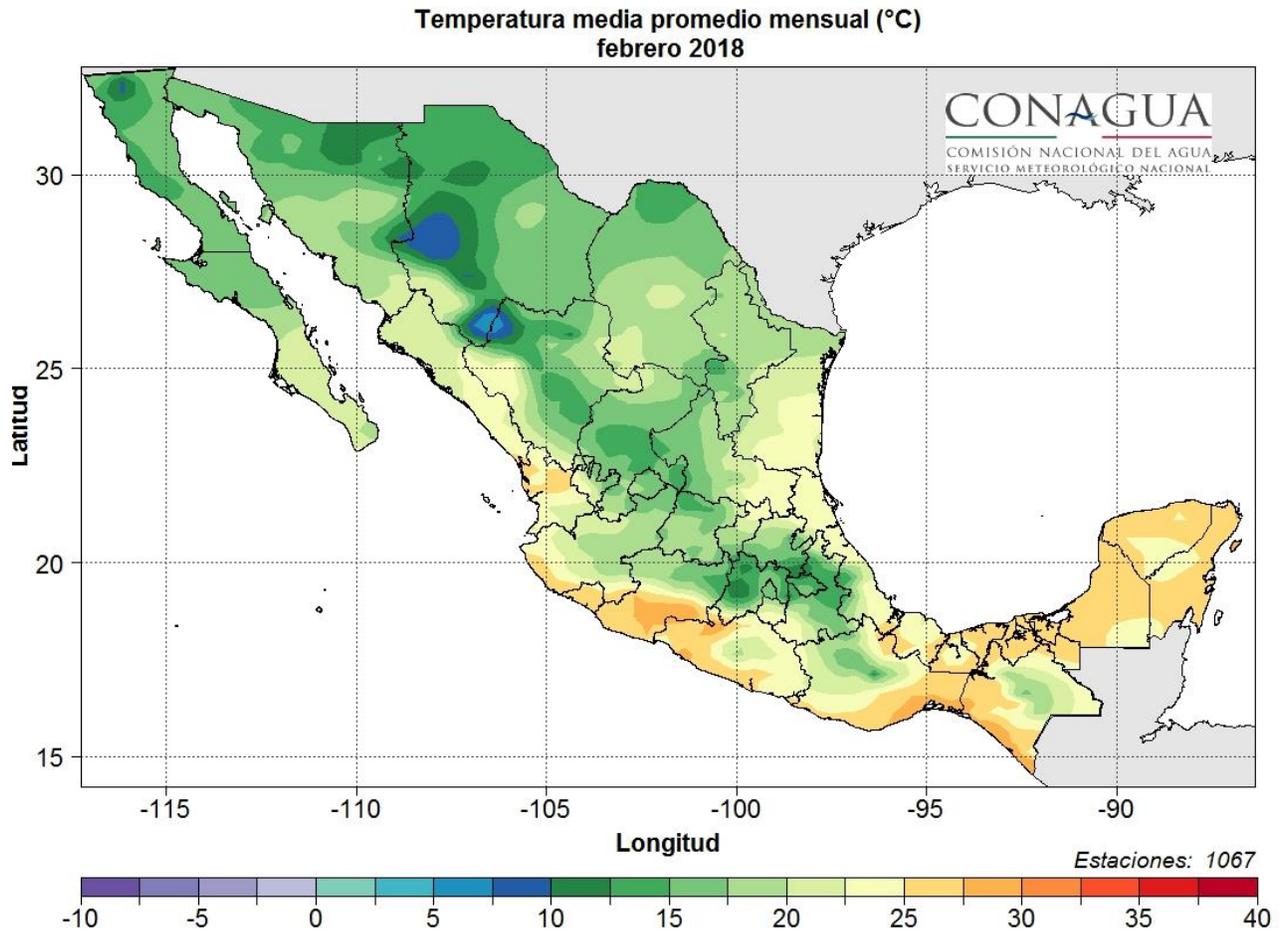


Figura 16 Temperatura (°C) media mensual febrero 2018

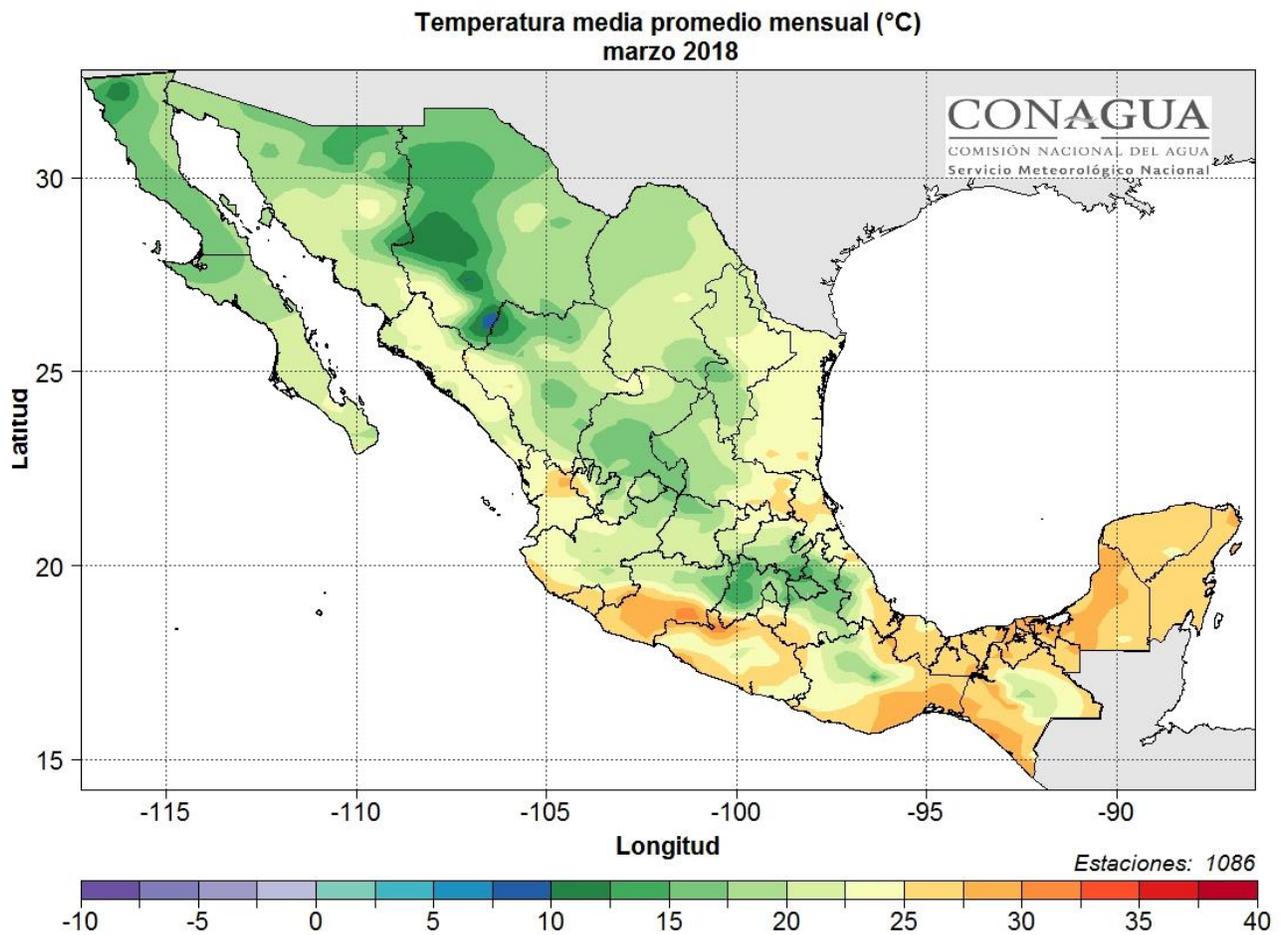


Figura 17 Temperatura (°C) media mensual marzo 2018

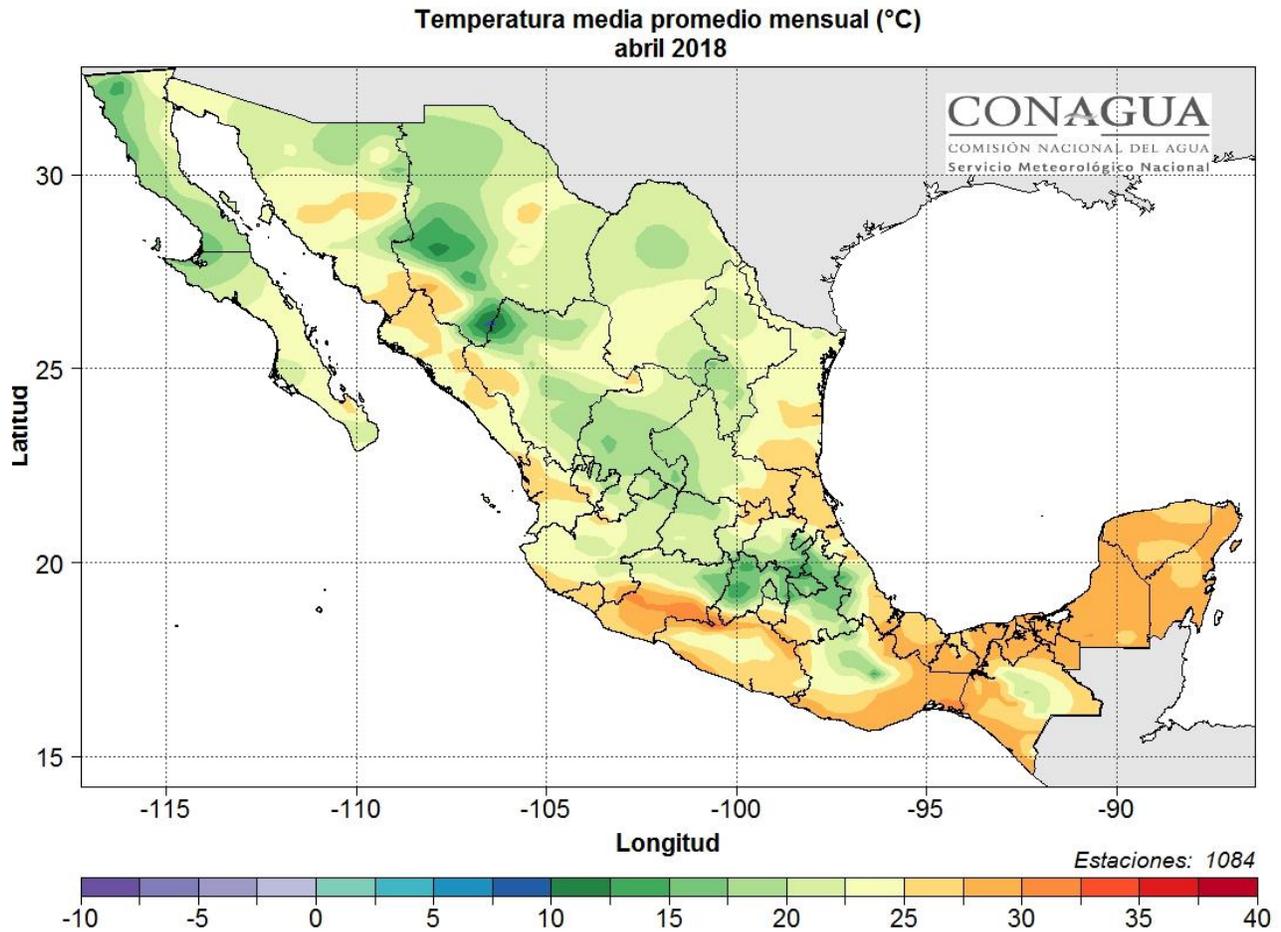


Figura 18 Temperatura (°C) media mensual abril 2018

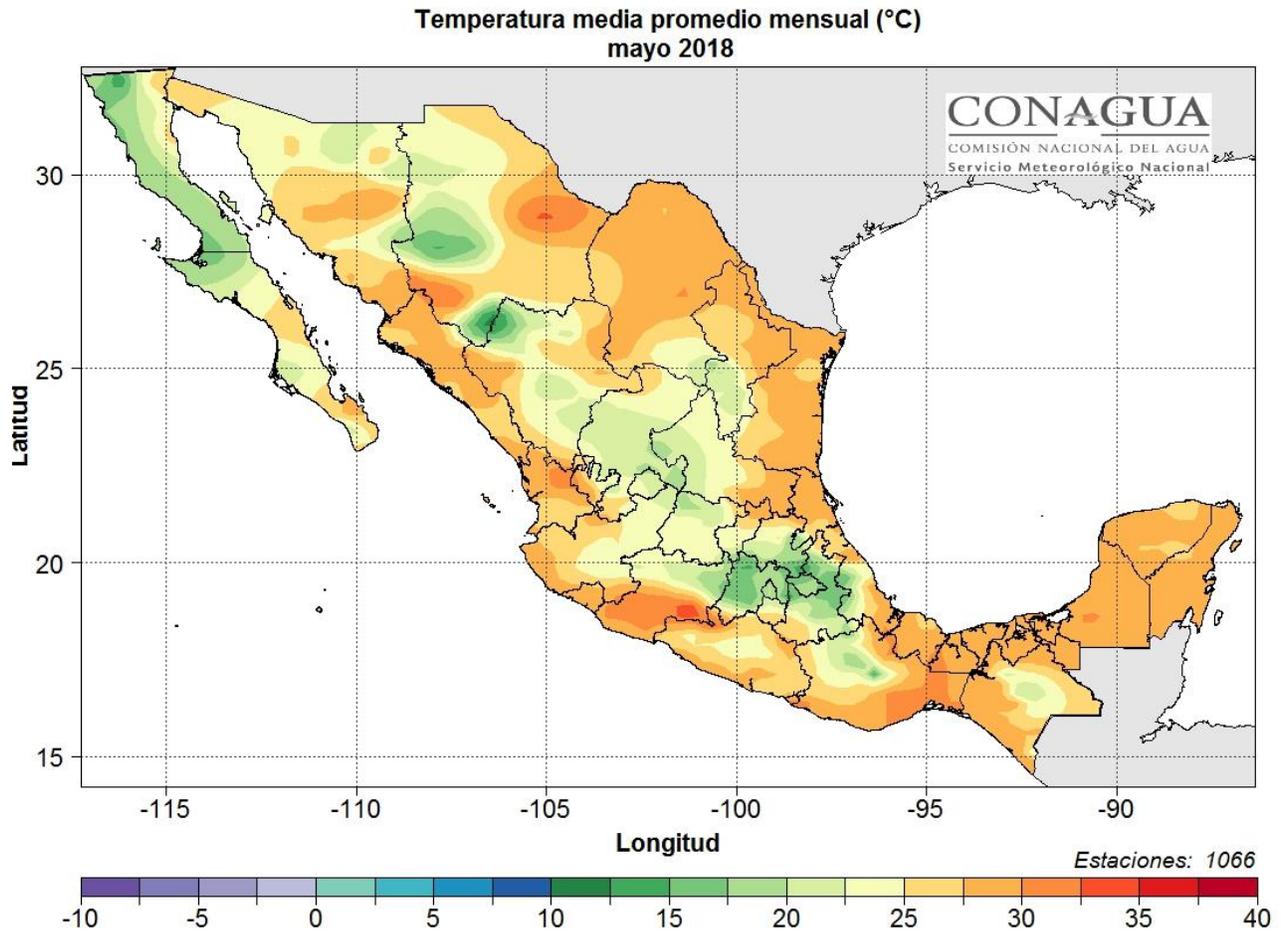


Figura 19 Temperatura (°C) media mensual mayo 2018

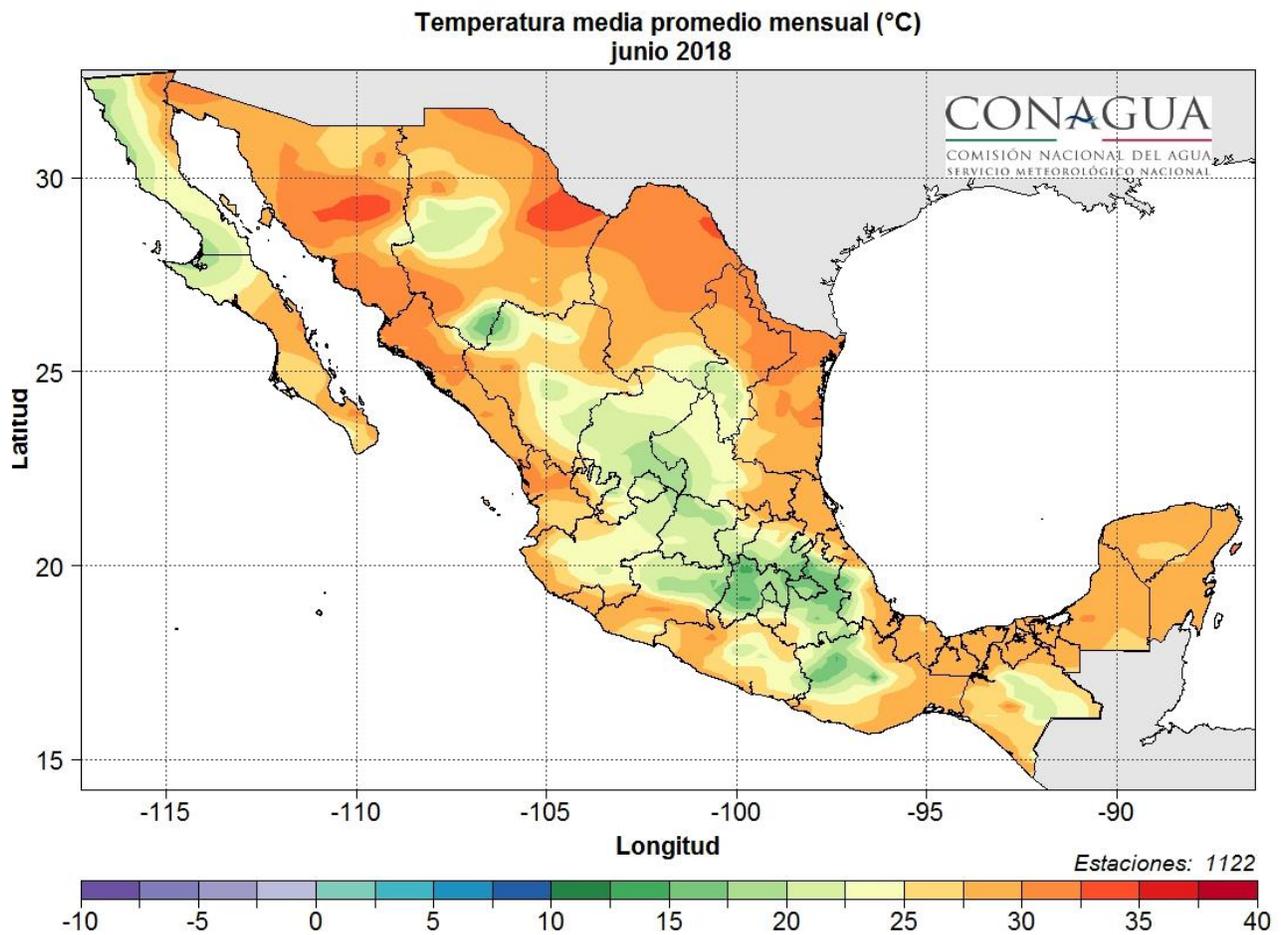


Figura 20 Temperatura (°C) media mensual junio 2018

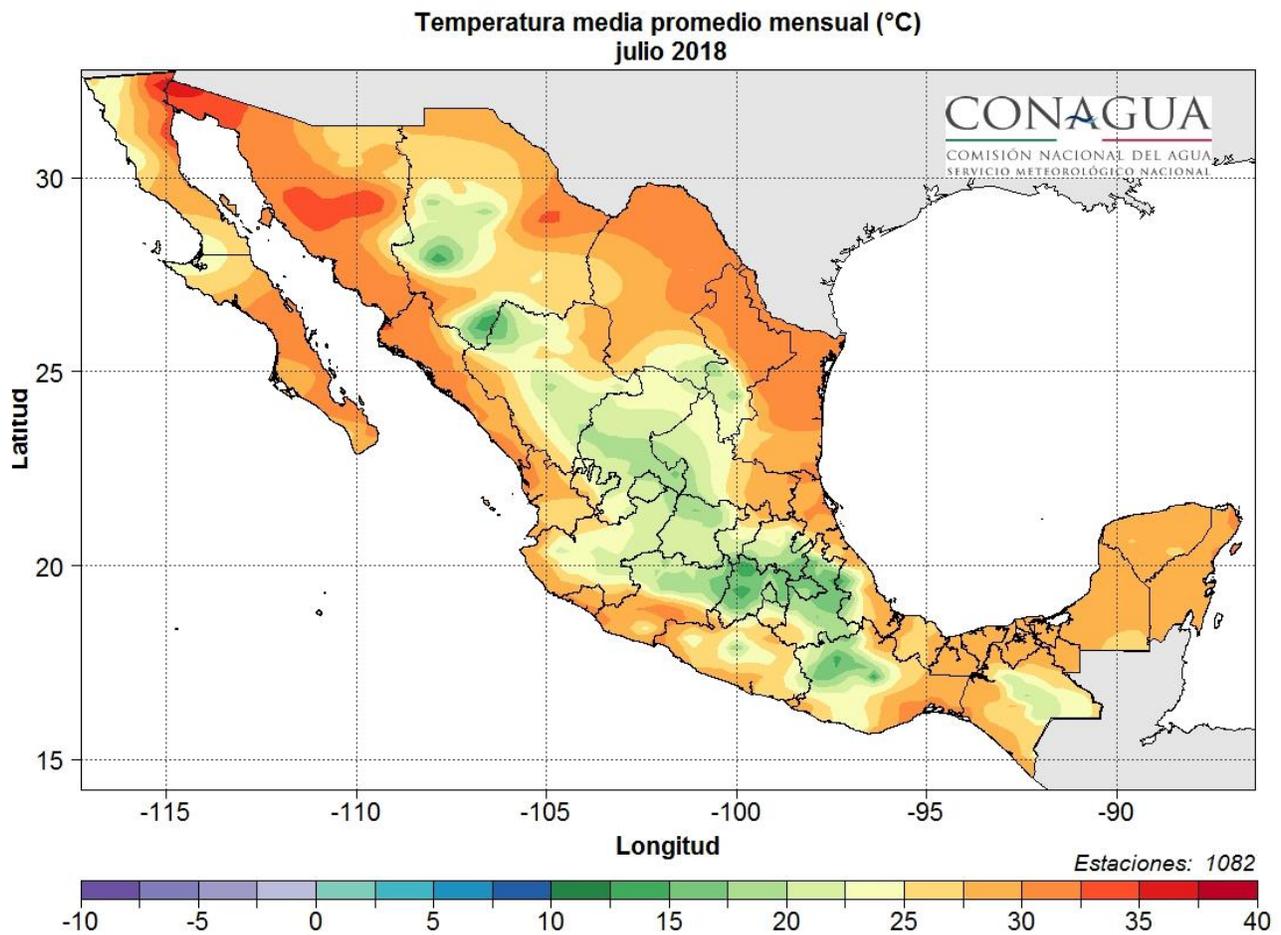


Figura 21 Temperatura (°C) media mensual julio 2018

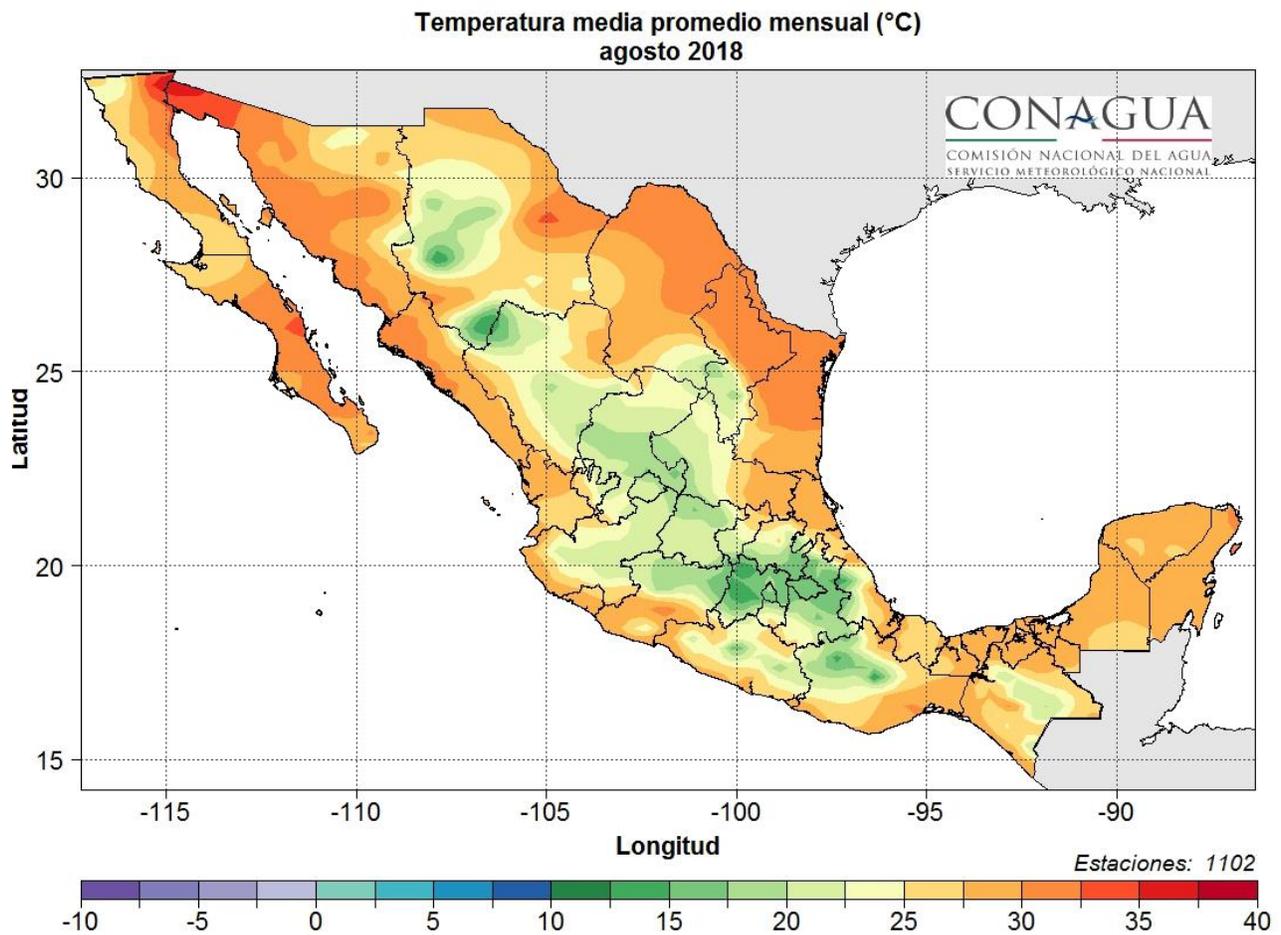


Figura 22 Temperatura (°C) media mensual agosto 2018

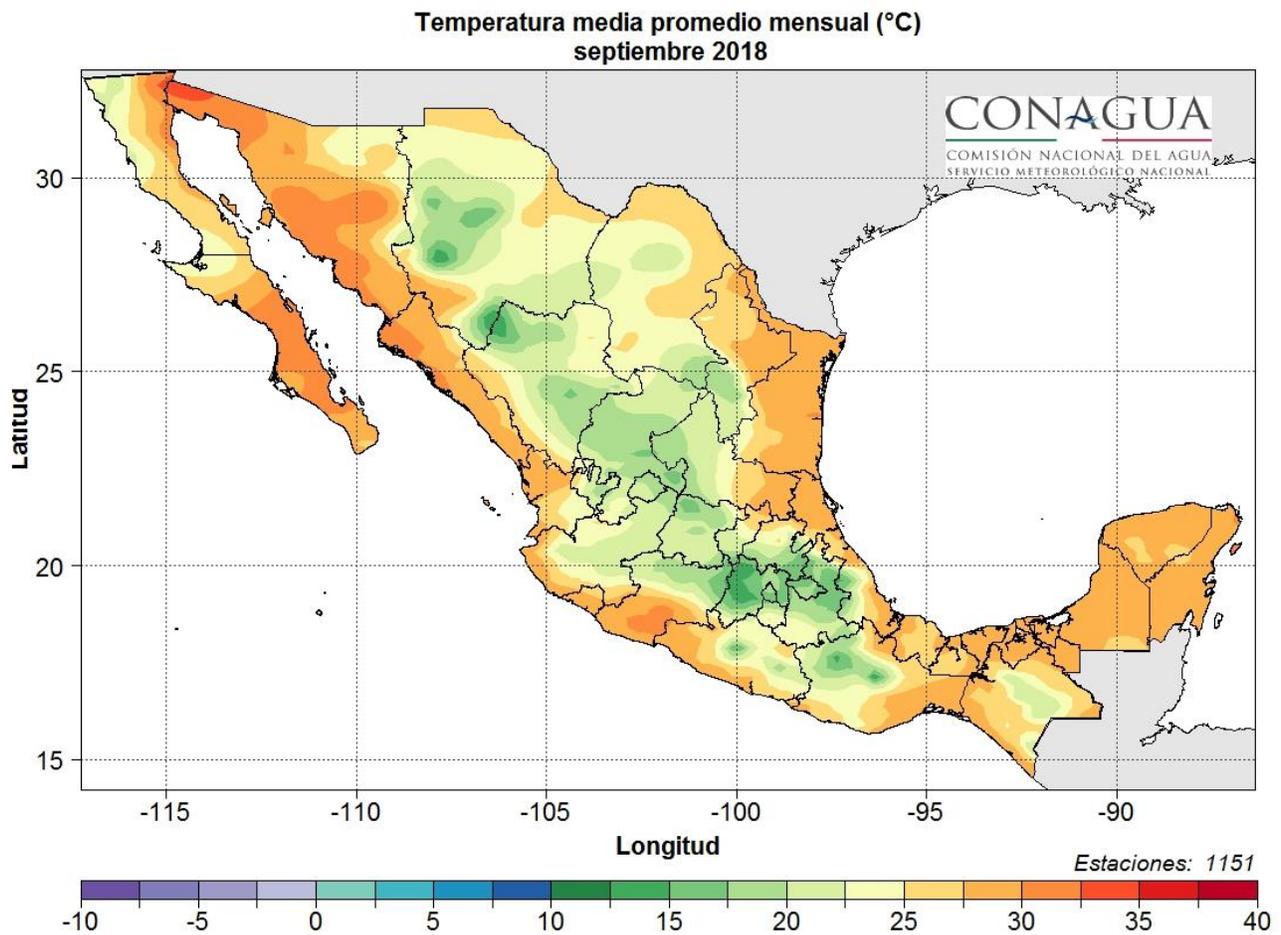
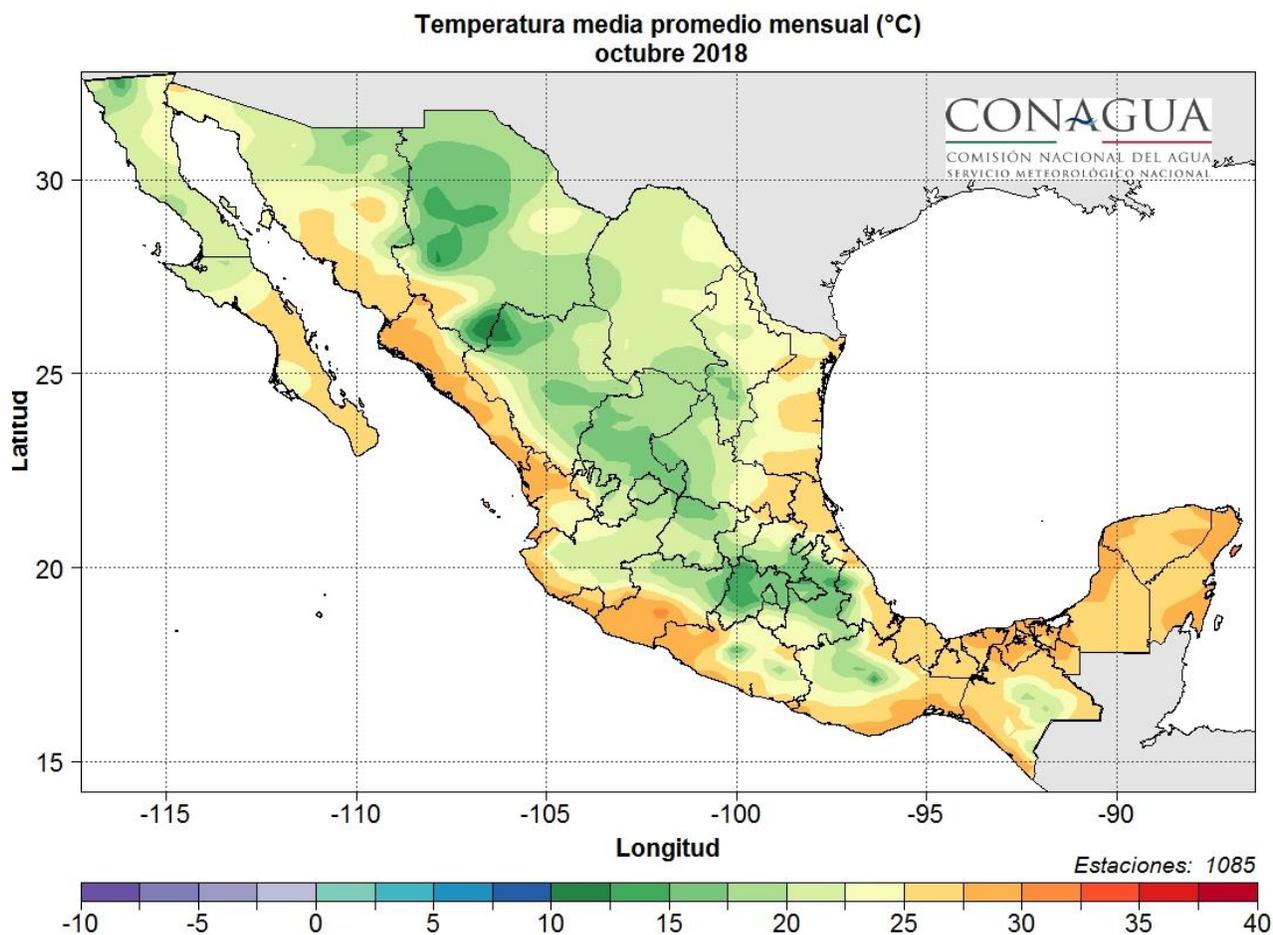


Figura 23 Temperatura (°C) media mensual septiembre 2018



5.- RED NACIONAL DE MONITOREO DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)

El conocimiento de la composición isotópica de la precipitación pluvial, que es la fuente de recarga de los sistemas hidrológicos, fortalece la evaluación nacional de los recursos hídricos, así como su administración y aprovechamiento sustentable en cuencas y acuíferos.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 29 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Colector de agua de lluvia

El colector de agua de lluvia RS2 PALMEX, Figura 25, es un dispositivo auto estable, diseñado específicamente para almacenar la precipitación recogida durante semanas o incluso meses, sin evaporación y sin el fraccionamiento asociado. Contienen un tubo que conduce el agua desde la salida del embudo hacia el fondo del recipiente, con el tubo sumergido en el agua ya recogida. Un sistema de equilibrio de presión asegura el flujo desde el embudo hacia el recipiente. Por lo tanto, es especialmente adecuado para determinar la composición isotópica del agua.



Figura 25. Colector totalizador de la precipitación pluvial, Mod. RS2 PALMEX

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 30 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Selección del sitio

Antes de establecer el colector para el muestreo de la precipitación, el Organismo Internacional de Energía Atómica recomienda evaluar el sitio y procedimientos operativos para asegurar que cumplen con los protocolos requeridos para obtener información isotópica confiable. Los principales aspectos a considerar son:

Prevención de la evaporación. Las muestras de precipitación expuestas a la atmósfera pueden ser afectadas por procesos de evaporación y, por ende, su composición isotópica se puede alterar, dando como resultado análisis isotópicos incorrectos. La evaporación de la muestra puede ocurrir durante la recolección del agua (recolector inadecuado), durante su almacenamiento (botellas con cierre no hermético) o durante su transporte o en el tiempo de espera para su análisis (evaporación a través de botellas con fisuras, tapas defectuosas o botellas mal cerradas).

Representatividad de la muestra. Una muestra de lluvia debería representar la precipitación natural integrada en la ventana de tiempo de interés. Para el programa de la Red Global de Isótopos de la Precipitación (GNIP por sus siglas en inglés), dicho periodo de tiempo es de un mes. El rebosamiento del colector (por eventos extremos de lluvia como huracanes, monzón, etc.) puede resultar en una pérdida importante de la lluvia mensual, particularmente en sitios equipados con colectores totalizadores mensuales. Un emplazamiento incorrecto del colector (por ejemplo, a la sombra de una estructura o expuesta a ventiladores de escape de edificios) dará lugar a muestras compuestas no representativas del sitio de interés.

Aspectos de logística y seguridad. La selección del equipo de muestreo está relacionada a menudo con la accesibilidad y disponibilidad de personal del sitio de muestreo. Para estaciones remotas o equipadas con equipos automáticos, se debe

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	
Página 31 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

considerar la instalación de pluviómetros totalizadores, los cuales requieren generalmente poco mantenimiento, así como realizar al menos una visita al mes. También se deben evaluar todas las condiciones de seguridad para el personal involucrado en el muestreo (amenazas naturales y humanas). Se debe indagar sobre la disponibilidad de equipos diseñados para muestrear nieve en sitios a altas altitudes o latitudes. Podría ser requerida la protección contra el viento para mantener el colector firmemente hincado en el sitio de muestreo. Finalmente, se debe proteger el colector de animales, vandalismo o contaminación por sistemas de riego de aspersion.

Instalación

Una vez que se visitaron los sitios propuestos, fue necesario descartar aquellos en los cuales no se cumplía con los requisitos establecidos, seleccionándose el sitio alternativo.

Se instalaron quince colectores de lluvia y nieve, en regiones complementarias a la red Nacional de Monitoreo de la Composición Isotópica y Química de la Precipitación Pluvial (RENIP).



Figura 26 Propuesta de sitios para la instalación de los nuevos colectores de lluvia.



Figura 27 Observatorio Piedras Negras. Coahuila



Figura 28 Colector de lluvia en el Observatorio Piedras Negras. Coahuila

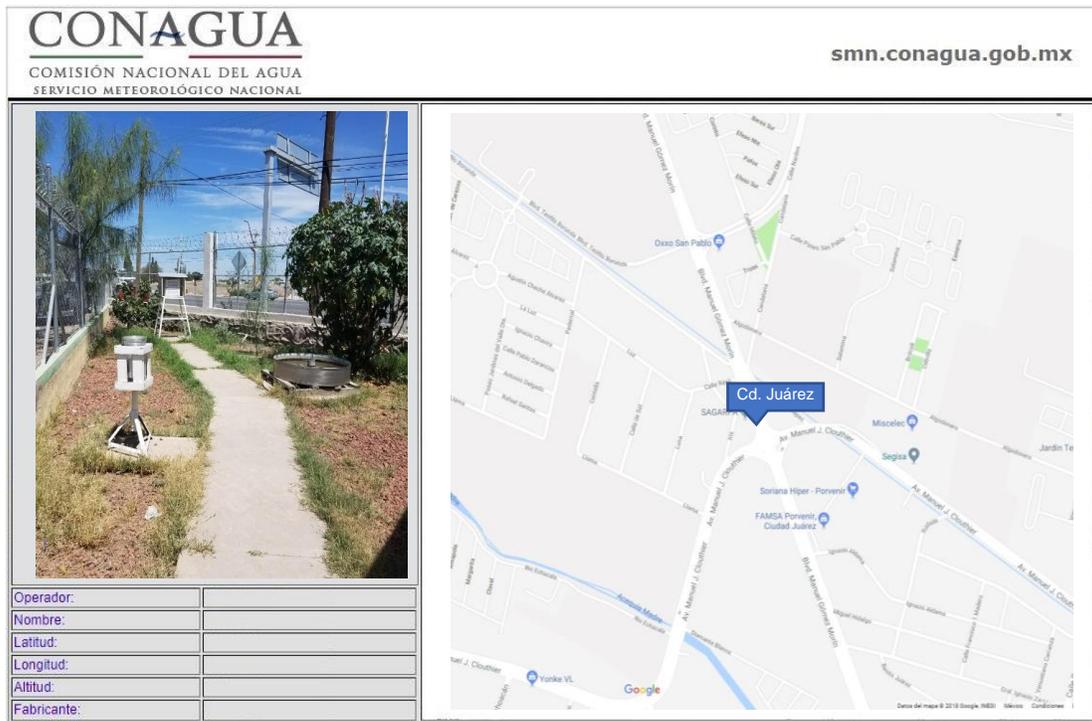


Figura 29 Observatorio Cd. Juárez. Chihuahua



Figura 30 Colector de lluvia en el Observatorio Cd. Juárez. Chihuahua



Figura 31 Observatorio Pachuca. Hidalgo



Figura 32 Colector de lluvia en el Observatorio Pachuca. Hidalgo



Figura 33 Observatorio Tulancingo. Hidalgo



Figura 34 Colector de lluvia en el Observatorio Tulancingo. Hidalgo



Figura 35 Observatorio Cd. Victoria. Tamaulipas



Figura 36 Colector de lluvia en el Observatorio Cd. Victoria. Tamaulipas



Figura 37 Observatorio Hermosillo. Sonora



Figura 38 Colector de lluvia en el Observatorio Hermosillo. Sonora



Figura 39 Observatorio Chetumal. Quintana Roo



Figura 40 Colector de lluvia en el Observatorio Chetumal. Quintana Roo



Figura 41 Observatorio La Paz. BCS



Figura 42 Colector de lluvia en el Observatorio La Paz. BCS



Figura 43 Observatorio Torreón. Coahuila



Figura 44 Colector de lluvia en el Observatorio Torreón. Coahuila



Figura 45 Observatorio Guadalajara. Jalisco



Figura 46 Colector de lluvia en el Observatorio Guadalajara. Jalisco



Figura 47 Observatorio Tapachula. Chiapas



Figura 48 Colector de lluvia en el Observatorio Tapachula. Chiapas

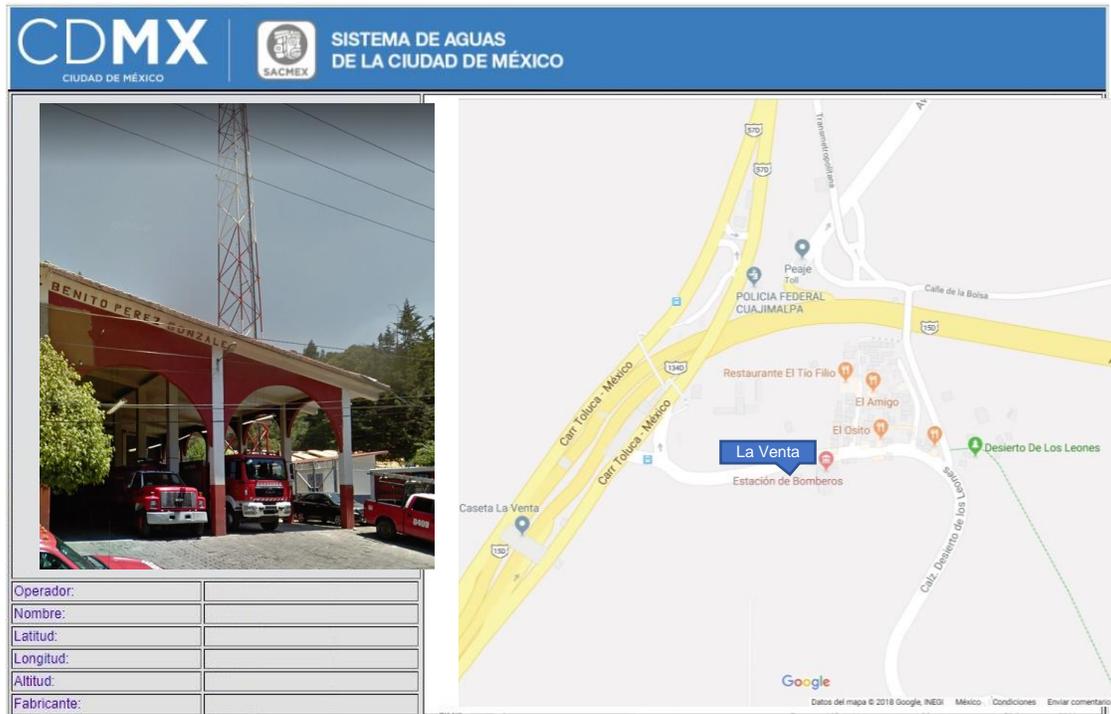


Figura 49 Estación pluviométrica La Venta. CDMX



Figura 50 Colector de lluvia en la Estación pluviométrica La Venta. CDMX

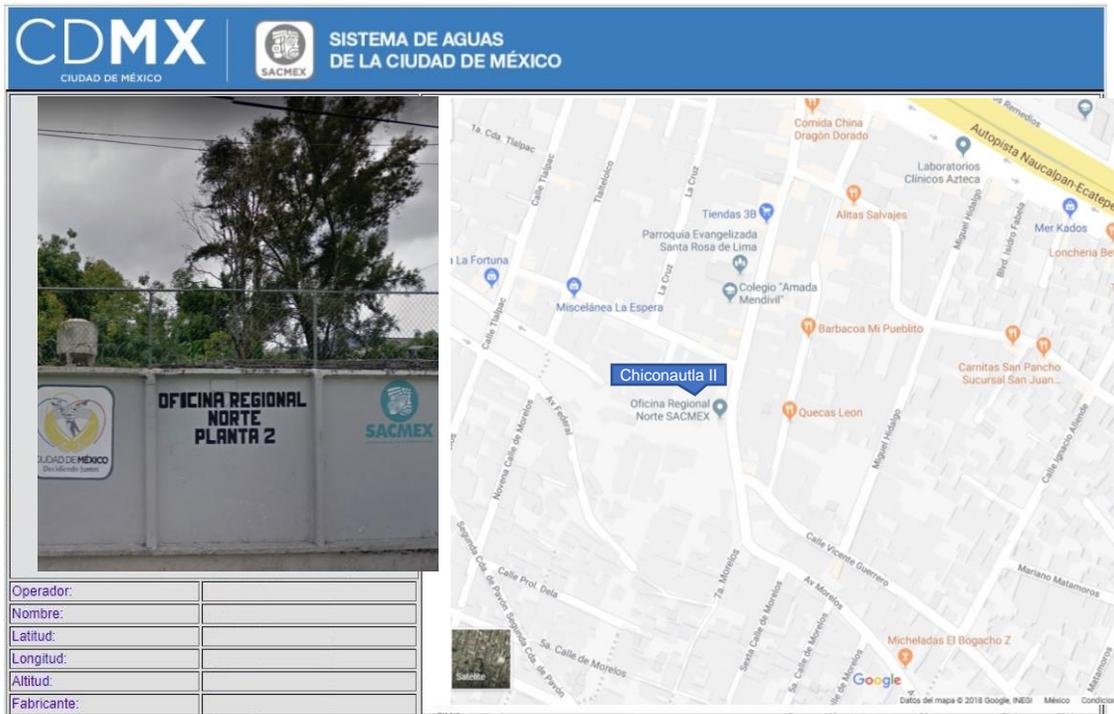


Figura 51 Estación pluviométrica Chiconautla II. CDMX



Figura 52 Colector de lluvia en la Estación pluviométrica Chiconautla II. CDMX



Figura 53 Estación pluviométrica Tetelco. CDMX



Figura 54 Colector de lluvia en la Estación pluviométrica Tetelco. CDMX

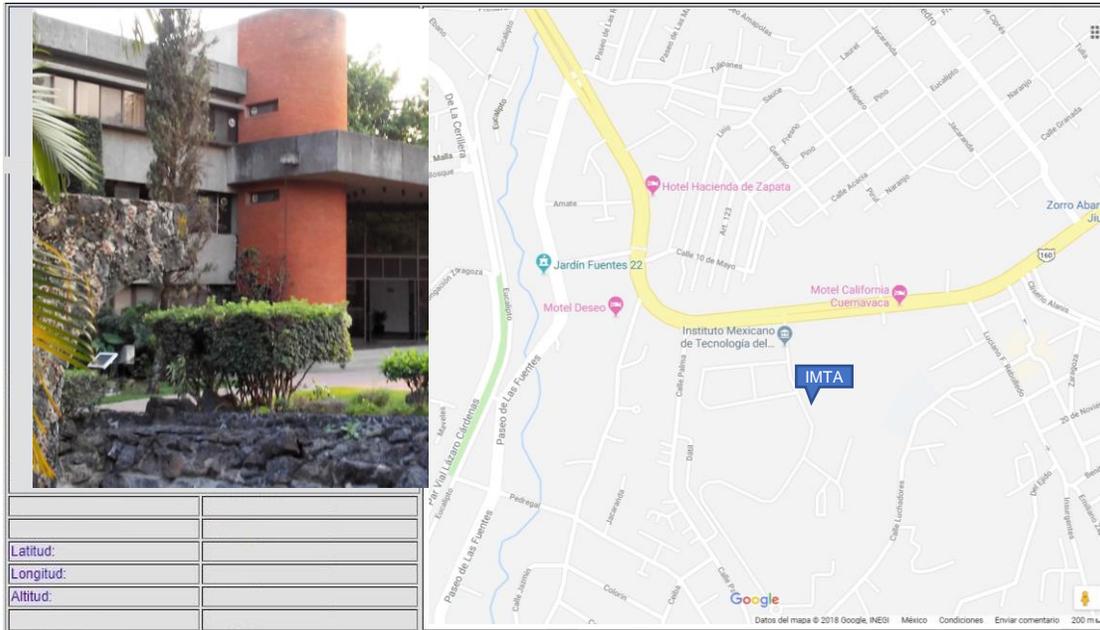


Figura 55 IMTA. Morelos



Figura 56 Colector de lluvia en el IMTA. Morelos

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 48 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Manual para el mantenimiento del colector de lluvia

Se inspecciona en sitio, las condiciones generales en las que se encuentra el equipo, en caso de algún desperfecto se realiza el reporte para el cambio de la parte afectada o del equipo,

- I. La parte exterior del equipo colector debe limpiarse agregando a un paño suave o papel absorbente agua limpia o agua sobrante colectada posterior a la toma de muestras, se deberá limpiar toda la superficie.



- II. Las mangueras deben limpiarse por dentro con el escobillón proporcionado en el kit de envió de muestras; después enjuagarlas por dentro y secarlas por aproximadamente 5 minutos, esto se realiza para evitar alteraciones en las nuevas muestras acumuladas.



- III. Los embudos deben enjuagarse con agua limpia y observar que los desagües no estén obstruidos, posteriormente debe secarse el embudo con papel absorbente.



- IV. Si los desagües están obstruidos, se deberá insertar por la parte superior el alambre de acero inoxidable o el escobillón limpia mangueras y liberar los

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 50 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

desagües enjuagando nuevamente con agua limpia, posteriormente secarlo con papel absorbente.



- V. El sistema de equilibrio de presión se debe verificar desconectando las mangueras y observar que no exista suciedad dentro de las mismas, para desconectar las mangueras se deberán oprimir los seguros azules de los conectores y jalar la manguera.



- VI. Los envases captadores de polietileno de alta densidad se deberán lavar después de obtener la muestra, para ello se debe verter agua limpia, realizar movimientos circulares desplazando el agua por todo el interior del depósito, tirar el agua y secarlo con papel absorbente hasta asegurarse que no exista nada de agua ni de suciedad dentro del envase.





- VII. El envase captador debe ser reemplazado dependiendo del período o cantidad de lluvia aproximada de la región, es decir si es temporada de lluvias o huracanes se debe colocar el depósito de 10 litros, en caso contrario se debe colocar el de 6 litros, en las regiones calurosas con lluvias escasas debe colocarse el depósito de 6 litros durante todo el año.

 	<p align="center">AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)</p>	 <p align="right">IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</p>
<p>Página 53 de 107</p>	<p align="center">México, 2018</p>	<p align="right">Clave: F.CO.2.04.01</p>

Verificación de conexiones y mangueras

Las conexiones deben estar en óptimas condiciones, debido a que una conexión deteriorada podría alterar la muestra y por ende los resultados isotópicos en el laboratorio, por ello es de suma importancia verificar las conexiones y las mangueras que no se encuentren rotas, rasgadas o quebradizas. Para la verificación se deberán desconectar todas las mangueras esto se realiza oprimiendo el seguro azul de los conectores y jalando las mangueras.



Una vez que se verificaron las mangueras y se realizó el mantenimiento mensual se deberán conectar nuevamente, insertando y empujando la manguera hacia el conector.

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 54 de 107	México, 2018	Clave: F.C0.2.04.01



En caso de alguna anomalía con el conector o con las mangueras se debe dar aviso al personal del IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) para sustituirlo a la brevedad.

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 55 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Cambio de embudo

Para realizar el cambio de embudo, se deben seguir los siguientes pasos:

- I. Extraer la coladera de acero inoxidable que se encuentra dentro del embudo.
- II. Girar el embudo en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta quitarlo de su base.
- III. Verificar que el oring se encuentre en buenas condiciones.
- IV. Colocar el nuevo embudo girando en sentido a las manecillas del reloj sobre su base.
- V. Apretar hasta observar que el oring se deforme un poco, (no apretar al límite).
- VI. Colocar la coladera de acero inoxidable dentro del embudo.



 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 56 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Limpieza de mangueras

Para realizar correctamente la limpieza de las mangueras se deberán seguir los siguientes pasos:

- I. Desconectar la manguera de admisión (la que tiene forro de plástico) de la parte superior dentro del colector presionar el conector azul colocado en la parte interna superior del colector y jalar la manguera hacia abajo.
- II. Desconectar la manguera de purga, presionar el conector azul colocado en la base de la tapa del depósito de almacenamiento de la lluvia, una vez presionado jalar la manguera



- III. Una vez desconectadas todas las mangueras, insertar en cada una de ellas el escobillón, jalar y volver a insertar.



- IV. Extraer el escobillón y verter agua dentro de las mangueras para que la suciedad sea expulsada del interior, repetir el paso anterior si se observan las mangueras sucias.



 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 58 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

- V. Secar las mangueras al sol, por 5 minutos o con papel absorbente.
- VI. Colocar el forro negro a la manguera de admisión.



- VII. Colocar la tapa para cerrar el depósito y volver a insertar las mangueras a sus respectivos conectores empujando las mangueras.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 59 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Cambio de depósito

El cambio de depósito se deberá realizar una vez que la temporada de lluvias o temporada de huracanes inicie (depósito de 10L) y en temporadas de secas (depósito de 6L), para realizarlo se deberá seguir los siguientes pasos:

- I. Se deberá quitar la tapa del depósito instalado en el colector y extraerlo.
- II. La base donde se coloca el depósito debe cambiarse a una posición más baja o alta dependiendo la temporada, se debe subir la base y voltearla 40 grados para poder desplazarla a su nueva posición dentro del colector.
- III. Se deberá verificar que el depósito a colocar se encuentre limpio, en caso contrario limpiarlo y secarlo con papel absorbente.
- IV. Colocar el depósito correspondiente ya sea el de 6L o 10L.
- V. Colocar la tapa del depósito.

Tabla 3 Datos de los quince colectores de lluvia instalados

No.	PROVINCIA DE PRECIPITACIÓN PLUVIAL	PROVINCIA FISIAGRÁFICA	SITIO	ORGANISMO DE CUENCA/DIRECCION LOCAL/DEPENDENCIA/OTRO	ENCARGADO DE LA RED DE ESTACIONES	TÉLFONO	LONG. W	LAT. N	ELEV (msnm)
1	C PACÍFICO NORTE	I PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA	LA PAZ	ORGANISMO DE CUENCA PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA	MANUEL ESGARDO COUMA SANCHEZ	6121236020 Ext.1542	-110.320422	24.128783	26
2	C PACÍFICO NORTE	II LLANURA SONORENSE	HERMOSILLO	ORGANISMO DE CUENCA NOROESTE	DIEGO MONTOYA MONTEL	642 425 8174, Ext. 1510	-110.930444	29.078419	209
3	D MESETA NORTE	IV SIERRAS Y LLANURAS DEL NORTE	CD. JUÁREZ	DIRECCION LOCAL	RICARDO VALDEZ MORALES	614 432 2400 Ext. 1015	-106.427222	31.6897222	1117
4	D MESETA NORTE	IV SIERRAS Y LLANURAS DEL NORTE	TORREÓN	ORGANISMO DE CUENCA CUENCAS CENTRALES DEL NORTE	JOSÉ LUIS ERNESTO MONTOYA MURILLO	871 299 1000 Ext. 1510	-103.416161	25.519972	1124
5	E BAJIO RÍO GRANDE	VI GRANDES LLANURAS DE NORTEAMÉRICA	PIEDRAS NEGRAS	ORGANISMO DE CUENCA RIO BRAVO	DOROTEO TREVIÑO PUENTE	818 126 0150 ext 1540	-100.551647	28.683769	251
6	H GOLFO CENTRO	VIII LLANURA COSTERA DEL GOLFO NORTE	CD. VICTORIA	ORGANISMO DE CUENCA GOLFO NORTE	ÓSCAR JOEL POSADA TORRES	834 315 0661 Ext. 1500 y 1516	-98.207828	23.764228	329
7	F PACÍFICO CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	GUADALAJARA	ORGANISMO DE CUENCA LERMA SANTIAGO PACIFICO	CARLOS ENRIQUE VITE CÁRDENAS	333 268 0200 Ext. 1560 y 1520	-103.392383	20.706569	1568
8	G MESETA CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	PACHUCA	DIRECCION LOCAL	SERGIO ALARCÓN MARTÍNEZ	771 71 72850 Ext. 1540	-98.749653	20.087644	2365
9	G MESETA CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	TULANCINGO	DIRECCION LOCAL	SERGIO ALARCÓN MARTÍNEZ	771 71 72850 Ext. 1540	-98.357719	20.084183	2205
10	G MESETA CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	IMTA	IMTA	LUIS GONZÁLEZ HITA	777 329 3600 Ext. 805	-99.158783	18.8838	1344
11	G MESETA CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	CHICONAUTLA II	SACMEX	ANTONIO RAMÍREZ BACA	55 5130 4444 Ext. 1546, 1547	-99.109005	19.515761	2277
12	J MESETA SUR	X EJE NEOVOLCÁNICO	LA VENTA	SACMEX	ANTONIO RAMÍREZ BACA	56 5130 4444 Ext. 1546, 1547	-99.310796	19.333336	2884
13	J MESETA SUR	X EJE NEOVOLCÁNICO	TETELCO	SACMEX	ANTONIO RAMÍREZ BACA	57 5130 4444 Ext. 1546, 1547	-98.97137	19.21117	2271
14	M PENÍNSULA DE YUCATÁN	XI PENÍNSULA DE YUCATÁN	CHETUMAL	DIRECCION LOCAL	ALFREDO ENRIQUE ALPUCHE CASTILLO	983 8328 098	-88.327533	18.500436	19
15	L GOLFO DE TEHUANTEPEC	XV CORDILLERA CENTROAMERICANA	TAPACHULA	ORGANISMO DE CUENCA FRONTERA SUR	RODRIGO GUADALUPE PAREDES	961 617 0460 Ext. 1540	-92.296311	14.887211	128

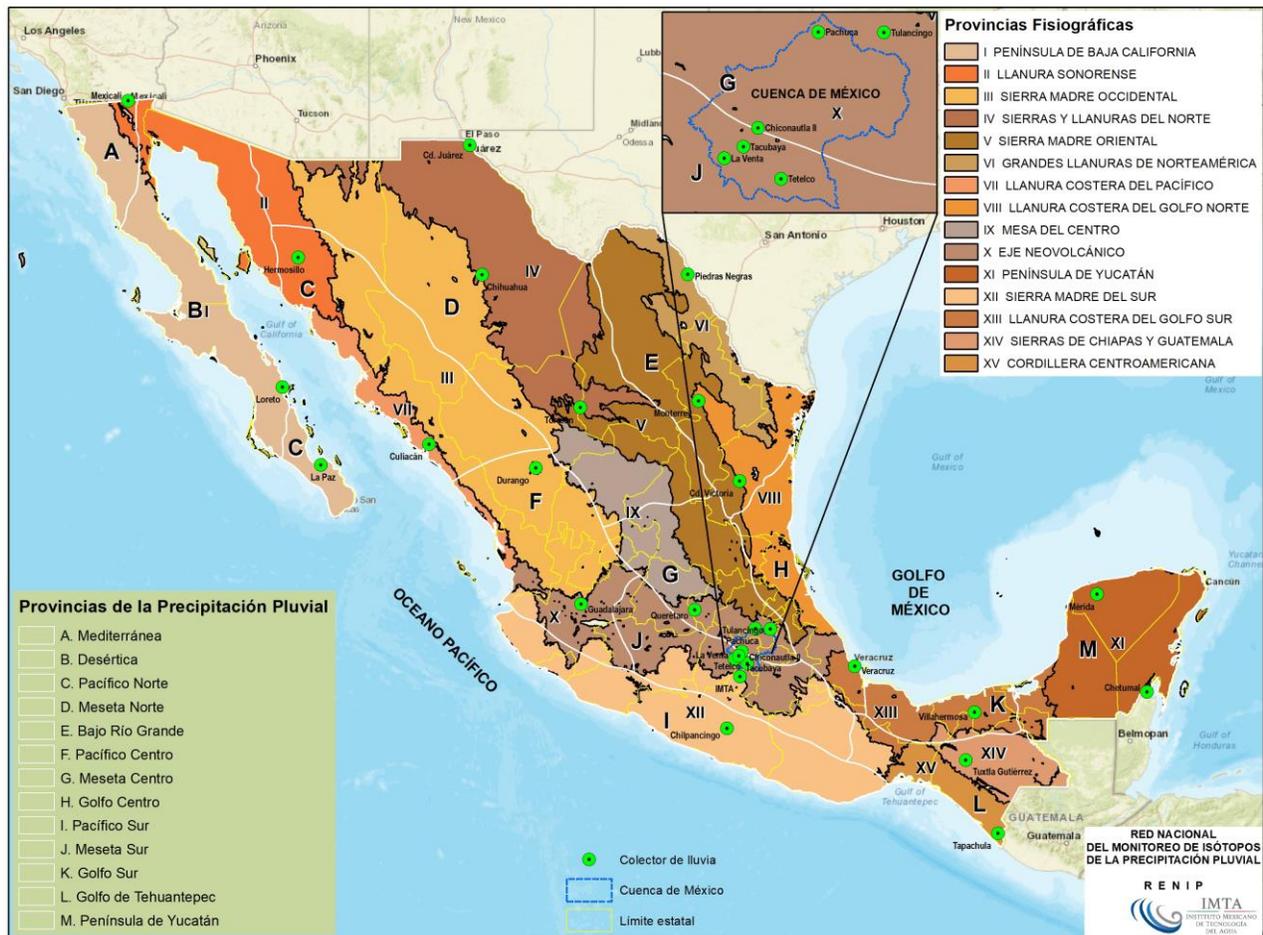


Figura 57 Red Nacional de Monitoreo de la Isotopía de la Precipitación Pluvial (RENIP).

Tabla 4 Colectores de lluvia de la RENIP

No.	PROVINCIA DE PRECIPITACIÓN PLUVIAL	PROVINCIA FISIGRÁFICA	SITIO	LONG. W	LAT. N	ELEV. (msnm)
1	D MESETA NORTE	IV SIERRAS Y LLANURAS DEL NORTE	CD. JUÁREZ	-106.4272222	31.68972222	1117
2	H GOLFO CENTRO	VIII LLANURA COSTERA DEL GOLFO NORTE	CD. VICTORIA	-98.207828	23.764228	329
3	M PENÍNSULA DE YUCATÁN	XI PENÍNSULA DE YUCATÁN	CHETUMAL	-88.327533	18.500436	19
4	G MESETA CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	CHICONAUTLA II	-99.109005	19.515761	2277
5	D MESETA NORTE	IV SIERRAS Y LLANURAS DEL NORTE	CHIHUAHUA	106°01'49.23"	28°40'14.48"	1405
6	I PACÍFICO SUR	XII SIERRA MADRE DEL SUR	CHILPANCINGO	099°30'50.42"	17°34'18.49"	1270
7	C PACÍFICO NORTE	VII LLANURA COSTERA DEL PACÍFICO	CULIACÁN	107°26'28.36"	24°38'05.86"	30
8	F PACÍFICO CENTRO	III SIERRA MADRE OCCIDENTAL	DURANGO	104°36'01.65"	24°03'41.30"	1882
9	F PACÍFICO CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	GUADALAJARA	-103.392383	20.706569	1568
10	C PACÍFICO NORTE	II LLANURA SONORENSE	HERMOSILLO	-110.930444	29.078419	209
11	G MESETA CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	IMTA	-99.158783	18.8838	1344
12	C PACÍFICO NORTE	I PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA	LA PAZ	-110.320422	24.128783	26
13	J MESETA SUR	X EJE NEOVOLCÁNICO	LA VENTA	-99.310796	19.333336	2884
14	B DESÉRTICA	I PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA	LORETO	111°21'00"	26°00'41.00"	6
15	M PENÍNSULA DE YUCATÁN	XI PENÍNSULA DE YUCATÁN	MÉRIDA	089°39'07.86"	20°56'48.60"	12
16	A MEDITERRÁNEA	II LLANURA SONORENSE	MEXICALI	115°27'29.90"	32°39'59.22"	7
17	E BAJO RÍO GRANDE	VIII LLANURA COSTERA DEL GOLFO NORTE	MONTERREY	100°16'18.04"	25°40'57.90"	494
18	G MESETA CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	PACHUCA	-98.749653	20.087644	2365
19	E BAJO RÍO GRANDE	VI GRANDES LLANURAS DE NORTEAMÉRICA	PIEDRAS NEGRAS	-100.551647	28.683769	251
20	G MESETA CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	QUERÉTARO	100°22'10.33"	20°33'48.69"	1092
21	J MESETA SUR	X EJE NEOVOLCÁNICO	TACUBAYA	099°11'48.03"	19°24'13.51"	2322
22	L GOLFO DE TEHUANTEPEC	XV CORDILLERA CENTROAMERICANA	TAPACHULA	-92.296311	14.887211	128
23	J MESETA SUR	X EJE NEOVOLCÁNICO	TETELCO	-98.97137	19.21117	2271
24	D MESETA NORTE	IV SIERRAS Y LLANURAS DEL NORTE	TORREÓN	-103.416161	25.519972	1124
25	G MESETA CENTRO	X EJE NEOVOLCÁNICO	TULANCINGO	-98.357719	20.084183	2205
26	L GOLFO DE TEHUANTEPEC	XIV SIERRAS DE CHIAPAS Y GUATEMALA	TUXTLA GUTIÉRREZ	093°08'50.76"	16°45'46.87"	577
27	H GOLFO CENTRO	XIII LLANURA COSTERA DEL GOLFO SUR	VERACRUZ	096°06'34.85"	19°08'03.85"	15
28	K GOLFO SUR	XIII LLANURA COSTERA DEL GOLFO SUR	VILLAHERMOSA	092°55'16.82"	17°58'51.54"	4.6

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 63 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Caracterización Isotópica

Una aplicación de la hidrología isotópica es la caracterización isotópica, la cual, consiste en utilizar los efectos producidos por el fraccionamiento isotópico en los diferentes tipos de agua existentes en una cuenca hidrológica, y que permiten identificar aspectos como el origen y evolución del agua subterránea en los sistemas hidrológicos. Estos efectos le dan un sello característico a las aguas que intervienen en el ciclo hidrológico de los sistemas y ayudan a explicar el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos.

El sello isotópico que adquieren las aguas se debe a que la composición isotópica de las precipitaciones pluviales que recargan los mantos acuíferos en cualquier parte de los continentes, depende de la historia del agua; la cual, se inicia en el momento de salir del mar y termina cuando se colecta la muestra. A medida que la nube avanza, va perdiendo agua por condensaciones sucesivas hasta que el frente nuboso pierde su actividad. Puesto que las moléculas pesadas $H_2^{16}O$ y $H_2^{18}O$ condensan de forma preferente, la nube se va empobreciendo en estas dos especies moleculares (Figura 58). Esto hace que las precipitaciones tengan valores más negativos o empobrecidos en isótopos pesados a medida que se alejan de la fuente de producción de vapor. La precipitación pluvial en las planicies costeras no difiere sustancialmente de la precipitación oceánica, pero a medida que la humedad es transportada hacia los continentes, se produce un empobrecimiento de los isótopos pesados. Este efecto se denomina continental.

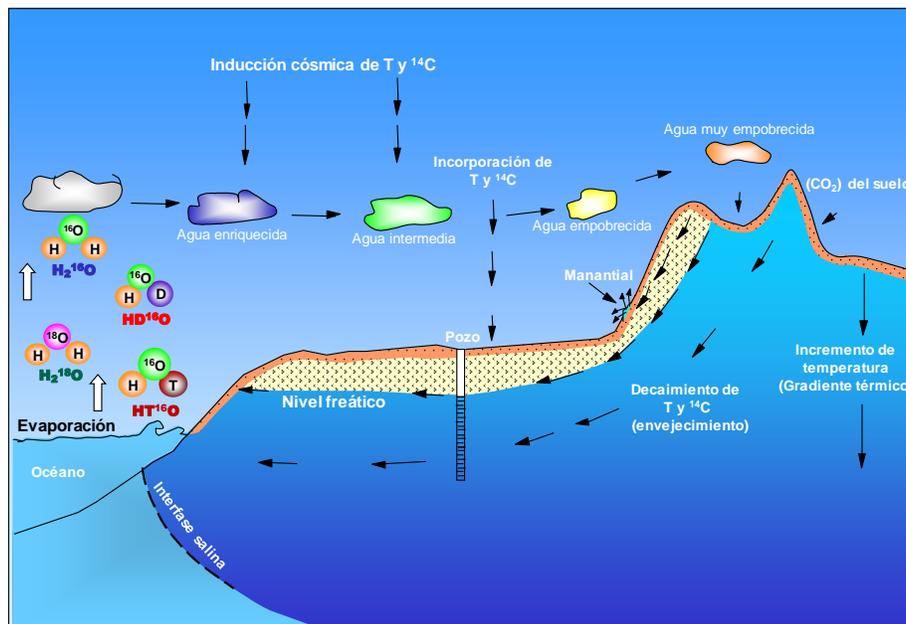


Figura 58 Isotopía del ciclo hidrológico

Los isótopos estables del hidrógeno y del oxígeno, intrínsecos de la molécula de agua, son trazadores gratuitos que permiten estudiar el origen y evolución de las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas. Existen de manera natural, razón por la cual se denominan isótopos ambientales.

En la naturaleza se conocen 3 isótopos del Hidrógeno, dos estables y uno radioactivo:

¹H o H: 99,98 % del hidrógeno total; estable

²H o D (Deuterio): 0,016 %; estable

³H o T (Tritio): $5 \cdot 10^{-6}$ %; radioactivo

De los diferentes isótopos de oxígeno, solo son de interés en hidrogeología:

¹⁶O: constituye el 99,76 % de todo el oxígeno

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 65 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

^{17}O : el 0,04 %

^{18}O : el 0,20 %

El ^{17}O es el menos abundante de los tres, por ello se mide con más incertidumbre que el ^{16}O . Por esta razón generalmente se usa la relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, que ofrece un mayor contraste y una mayor facilidad de medición.

La combinación de los diferentes isótopos existentes de hidrógeno y de oxígeno permite formar hasta 18 moléculas de agua diferentes. De ellas, las más usuales desde un punto de vista probabilístico son: H_2^{16}O , HD^{16}O y H_2^{18}O .

Las propiedades de los diferentes isótopos de un mismo elemento son muy similares, pero las pequeñas diferencias de movilidad iónica, tensión de vapor, difusividad, etc, hacen que el agua natural tenga ligeras diferencias de composición isotópica según su origen en el ciclo hidrológico. Así, el agua de mar es más pesada o enriquecida en HD^{16}O y HD^{18}O que el agua dulce, mientras que el vapor de agua de mar es más ligero o enriquecido en H_2^{16}O respecto al agua de mar de la que es originario. El vapor de agua de lago o embalse es más pesado o enriquecido en HD^{16}O y HD^{18}O que el agua de la que procede. Es decir, existe un fraccionamiento isotópico al pasar de un estado a otro, lo cual resulta útil para estudiar procesos ocurridos en el ciclo hidrológico.

El agua de lluvia constituye una de las principales fuentes de las aguas subterráneas y del agua de la zona de poro de la Zona No Saturada. La variación espacial y temporal del contenido isotópico de la lluvia puede usarse para estudiar tanto la zona de la recarga en los acuíferos, como la época en que tiene lugar ésta.

La aplicación de isótopos en hidrología es complementaria de los resultados derivados de otras metodologías, tales como geología, geofísica, geoquímica, hidrogeología, etc.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 66 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Permiten precisar el comportamiento del agua en la naturaleza, particularmente, el funcionamiento de los acuíferos y obtener conclusiones más confiables. En casos especiales aportan información única sobre la naturaleza de las aguas subterráneas (IAEA, 2005).

La manera precisa de expresar la composición isotópica de cualquier muestra de agua, se hace mediante un patrón de agua que sirve de referencia a los distintos laboratorios dedicados a la medición del contenido isotópico de muestras de agua. Para ello, se preparó el “Patrón Medio de Agua de Mar” conocido como *SMOW* (por sus siglas en inglés) (Craig, H., 1961). En la actualidad este patrón ha sido sustituido por el *VSMOW* (por sus siglas en inglés de *Vienna Standard Mean Ocean Water*), y es reproducido de manera regular por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA).

Las variaciones isotópicas para oxígeno-18 o deuterio, con respecto al patrón *VSMOW*, se expresan como desviaciones delta por mil (δ ‰), mediante la expresión:

$$\delta \text{ (‰)} = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \times 10^3$$

En donde R está definida por la expresión

$$R = \frac{\text{Núm. de moléculas del tipo } {}^1\text{H } {}^2\text{H } {}^{16}\text{O} \text{ (ó } {}^1\text{H}_2{}^{18}\text{O)}}{\text{Núm. de moléculas del tipo } {}^1\text{H}_2{}^{16}\text{O}}$$

El valor de la δ puede ser positivo o negativo, dependiendo de que la muestra esté más enriquecida o empobrecida que el *VSMOW*. Una δ positiva indica mayor concentración en el isótopo pesado que el *VSMOW*, según corresponda (${}^{18}\text{O}$ ó ${}^2\text{H}$).

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 67 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

La desviación δ en las aguas meteóricas varía entre límites amplios debido a diferentes causas. Una es el fraccionamiento producido durante los cambios de fase, el cual es motivado por la diferencia de presión de vapor de las tres especies moleculares. Si designamos por P a esta presión de vapor, se cumple:

$$P(^1\text{H}_2^{16}\text{O}) > P(^1\text{H}_2^{18}\text{O}) > P(^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O})$$

La presión de vapor determina la velocidad de evaporación o de condensación del agua. Por lo tanto, las moléculas ligeras ($^1\text{H}_2^{16}\text{O}$) que tienen mayor presión de vapor, se evaporan más rápido y se condensan más lentamente que las moléculas pesadas, es decir, presentan una tendencia mayor a permanecer en la fase de vapor durante el cambio de fase (Clark, I.D. and Fritz, P., 1997).

La lluvia a nivel global presenta una composición isotópica lineal que se ajusta a la ecuación:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$$

Esta ecuación es válida para todas las aguas meteóricas que se precipitan sobre la superficie de la tierra y describe a la denominada Línea Meteórica Global (GMWL por sus siglas en inglés). La ordenada al origen de valor 10 se denomina exceso de deuterio. La pendiente y el exceso de deuterio pueden variar ligeramente para cada región debido a las condiciones climatológicas locales. En algunos casos se cuenta con líneas meteóricas locales que permiten la interpretación de los resultados isotópicos estables (**Figura 59**)

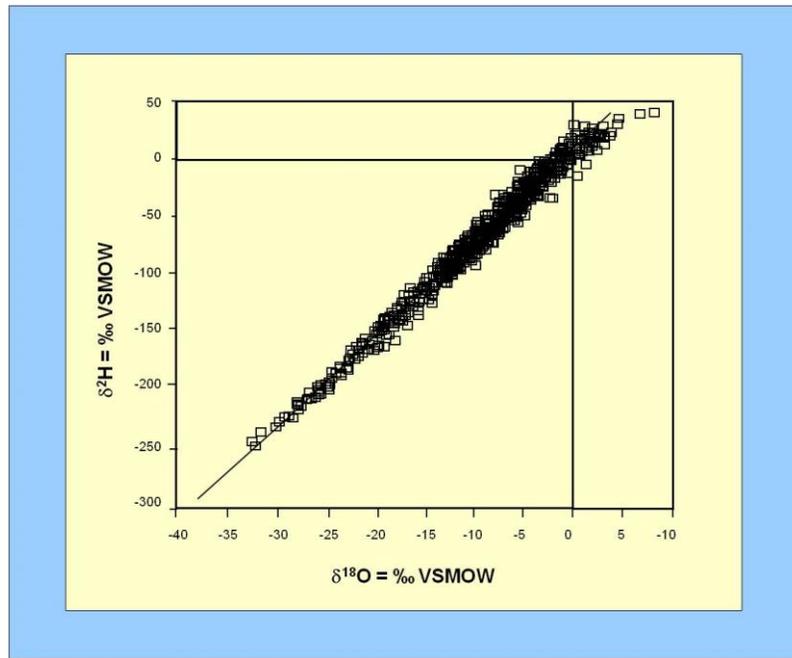


Figura 59 Distribución de la composición isotópica estable de las aguas meteóricas a nivel global. Los valores δD y $\delta^{18}O$ se ajustan a una recta de pendiente ocho y ordenada al origen 10 denominada Línea Meteórica Global

La composición isotópica de la lluvia depende de la génesis que experimenta, desde el momento de salir del mar en forma de vapor hasta que se incorpora en forma líquida en cualquiera de los componentes del ciclo hidrológico. A medida que la nube avanza, va perdiendo agua por condensaciones sucesivas hasta que el frente nuboso pierde su actividad. Debido a que las moléculas pesadas $^1H^2H^{16}O$ y $^1H_2^{18}O$ condensan de forma preferente, la nube se va empobreciendo en estas dos especies moleculares (Clark, I.D., and Fritz, P., 1997). Esto hace que las precipitaciones tengan valores más negativos a medida que se alejan de la fuente de producción de vapor, se denomina efecto continental; es decir, se produce un empobrecimiento de isótopos pesados de la lluvia en función de la distancia (**Figura 60**).

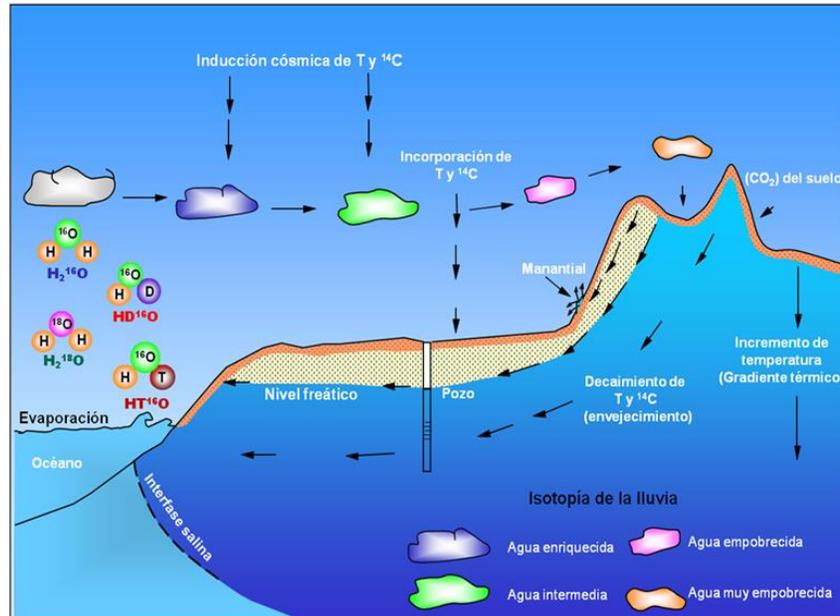


Figura 60 Evolución isotópica de las aguas superficiales y subterráneas en el ciclo hidrológico

Otro factor muy importante que influye en la composición isotópica de las precipitaciones pluviales de zonas montañosas, es el llamado efecto de altitud, derivado de la mayor velocidad de difusión de las moléculas ligeras en la atmósfera. Durante el desarrollo vertical de las nubes, hay un aumento de la condensación del vapor de agua a medida que disminuye la temperatura. Debido a que las moléculas pesadas condensan de manera preferencial con respecto a las ligeras, se tiene como resultado que las precipitaciones de cotas más elevadas sean más negativas o estén más empobrecidas en isótopos pesados (**Figura 60**). Por este efecto, la $\delta^{18}\text{O}$ varía entre -0.15 y -0.5‰ y la $\delta^2\text{H}$ entre -1 y -4‰ por cada 100 metros de diferencia de altitud.

Otro fenómeno que cambia la composición isotópica original de un tipo de agua, es el denominado efecto de evaporación. Cuando el agua experimenta procesos de

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 70 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

evaporación intensa sus deltas de deuterio y oxígeno-18 evolucionan a lo largo de una línea de evaporación de coeficiente angular menor al de la línea meteórica mundial (GMWL por sus siglas en inglés). Típicamente, esta situación se presenta cuando el agua es almacenada en una presa o cuando se aplica mediante riego en agricultura. Al estar sometida a evaporación intensa, el agua registra un fraccionamiento isotópico de su composición original (**Figura 61**). Al haber recarga proveniente de un embalse o por infiltración de retornos de riego, en el acuífero se genera una mezcla de agua con un sello característico de este proceso (Mazor, E., 1991).

Existen otros procesos que causan fraccionamiento isotópico del tipo de agua original, entre los cuales destaca la reducción del sulfato. En condiciones anaeróbicas del agua subterránea y alta concentración de sulfato, la acción bacteriana es la responsable de la oxidación de la materia orgánica. Durante este proceso, las bacterias transforman el sulfato (SO_4^{2-}) en sulfito (SO_3^{2-}) y posteriormente en sulfuro de hidrógeno (H_2S). Las bacterias preferentemente utilizan el ^{16}O durante la reducción del (SO_4^{2-}) a (SO_3^{2-}), por lo cual el sulfito se enriquece en ^{18}O . Diversos estudios (Fritz, Drimmie and Qureshi, 1989) han mostrado que cuando el sulfito es creado, rápidamente intercambia ^{18}O con el agua subterránea buscando un equilibrio isotópico. Debido a este intercambio, el agua subterránea se enriquece en ^{18}O . Como resultado de este proceso, el agua subterránea original evoluciona isotópicamente a lo largo de una recta de pendiente con coeficiente angular menor al de la GMWL (**Figura 61**) (Horita, J., 2005).

El registro de los efectos antes mencionados permite establecer el origen y la dinámica del agua subterránea, particularmente identificar las zonas de recarga efectiva y los procesos de mezcla de los flujos subterráneos.

EVOLUCIÓN ISOTÓPICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

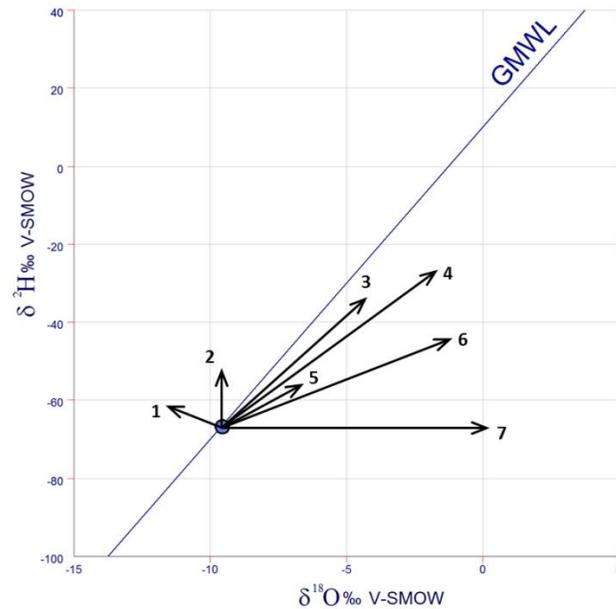


Figura 61 Evolución isotópica del agua subterránea en cuencas sedimentarias: 1. Hidratación de silicatos, 2. Intercambio con H_2S , ^2H e hidrocarburos, 3. Reducción de sulfatos, oxidación de compuestos orgánicos e hidrógeno molecular, 4. Evaporación de agua dulce.

Tabla 5 Resultados de oxígeno-18 y deuterio. Hoja 1/3

NÚM.	# LAB. IMTA	IDENTIFICACIÓN	ALTITUD (msnm)	FECHA DE MUESTREO	PERÍODO DE MUESTREO	VOLUMEN COLECTADO (ml)	PRECIPITACIÓN (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	1σ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	1σ (‰)
1	W-1498	CHIHUAHUA	1,405	03/01/2018	Diciembre	198.0	13.83	-15.00	±0.04	-106.7	±0.02
1	W-1540	CHIHUAHUA	1,405	02/03/2018	Febrero	2.5	0.17	1.68	±0.02	-36.1	±0.45
1	W-1620	CHIHUAHUA	1,405	01/07/2018	Junio	218.0	15.23	-7.58	±0.09	-62.0	±0.41
1	W-1649	CHIHUAHUA	1,405	01/08/2018	Julio	390.0	27.25	-4.28	±0.07	-26.6	±0.09
1	W-1661	CHIHUAHUA	1,405	01/09/2018	Agosto	1550.0	108.29	-4.01	±0.14	-24.8	±0.53
1	W-1735	CHIHUAHUA	1,405	01/10/2018	Septiembre	1450.0	101.31	-6.70	±0.06	-45.0	±0.40
1	W-1748	CHIHUAHUA	1,405	01/11/2018	Octubre	280.0	19.56	-8.42	±0.03	-56.7	±0.39
2	W-1516	CHILPANCINGO	1,270	01/02/2018	Enero	53.00	3.70	-3.66	±0.07	-19.5	±0.35
2	W-1529	CHILPANCINGO	1,270	01/03/2018	Febrero	25.00	1.75	-0.86	±0.12	-2.4	±0.27
2	W-1574	CHILPANCINGO	1,270	01/05/2018	Abril	118.00	8.24	-1.46	±0.06	-0.2	±0.35
2	W-1588	CHILPANCINGO	1,270	01/06/2018	Mayo	890.00	62.18	-4.42	±0.05	-21.0	±0.36
2	W-1621	CHILPANCINGO	1,270	04/07/2018	Junio	1774.80	124.00	-8.73	±0.08	-60.5	±0.28
2	W-1650	CHILPANCINGO	1,270	01/08/2018	Julio	1420.00	99.21	-4.70	±0.10	-28.4	±0.33
2	W-1662	CHILPANCINGO	1,270	03/09/2018	Agosto	3790.00	264.79	-6.57	±0.06	-42.5	±0.25
2	W-1736	CHILPANCINGO	1,270	01/10/2018	Septiembre	1860.00	129.95	-5.76	±0.05	-35.0	±0.62
2	W-1749	CHILPANCINGO	1,270	01/11/2018	Octubre	960.00	67.07	-10.86	±0.07	-76.0	±0.26
3	W-1539	CULIACÁN	30	02/03/2018	Febrero	32.00	2.24	-2.97	±0.01	-33.5	±0.04
3	W-1622	CULIACAN	30	02/07/2018	Junio	655.50	45.80	-11.06	±0.04	-79.0	±0.10
3	W-1651	CULIACÁN	30	01/08/2018	Julio	400.00	27.95	-3.36	±0.04	-19.8	±0.12
3	W-1737	CULIACAN	30	01/10/2018	Septiembre	4000.00	279.47	-6.64	±0.02	-40.7	±0.30
4	W-1501	DURANGO	1,882	31/12/2017	Diciembre	160.0	11.18	-15.48	±0.06	-112.0	±0.52
4	W-1517	DURANGO	1,882	06/02/2018	Enero	60.00	4.19	-6.70	±0.04	-43.7	±0.22
4	W-1534	DURANGO	1,882	02/03/2018	Febrero	75.00	5.24	-5.88	±0.00	-36.7	±0.30
4	W-1589	DURANGO	1,882	01/06/2018	Mayo	161.70	11.30	-4.68	±0.08	-29.2	±0.30
4	W-1623	DURANGO	1,882	02/07/2018	Junio	350.00	24.45	-3.75	±0.08	-34.8	±0.42
4	W-1664	DURANGO	1,882	01/08/2018	Julio	258.00	18.03	-0.38	±0.06	-4.1	±0.41
4	W-1653	DURANGO	1,882	31/08/2018	Agosto	1300.00	90.83	-4.77	±0.13	-30.4	±0.33
4	W-1738	DURANGO	1,882	01/10/2018	Septiembre	1288.00	89.99	-8.85	±0.08	-61.1	±0.37
4	W-1750	DURANGO	1,882	01/11/2018	Octubre	620.00	43.32	-12.57	±0.05	-89.1	±0.24
5	W-1536	LORETO	6	01/02/2018	Febrero	3.00	0.21	-3.71	±0.07	-29.5	±0.23
5	W-1544	LORETO	6	18/02/2018	Febrero	6.00	0.42	-1.20	±0.07	-17.1	±0.50
5	W-1624	LORETO	6	01/07/2018	Junio	560.00	39.13	-13.48	±0.05	-97.8	±0.22
5	W-1653	LORETO	6	03/08/2018	Julio	48.00	3.35	1.34	±0.07	-1.3	±0.10
5	W-1739	LORETO	6	01/10/2018	Septiembre	744.00	51.98	-12.13	±0.07	-86.9	±0.35
5	W-1751	LORETO	6	01/11/2018	Octubre	20.00	1.40	-0.45	±0.06	-12.0	±0.35
6	W-1537	MÉRIDA	12	02/03/2018	Febrero	2.50	0.17	6.35	±0.02	28.4	±0.31
6	W-1545	MÉRIDA	12	03/04/2018	Marzo	1.40	0.10	6.66	±0.04	38.5	±0.20
6	W-1573	MÉRIDA	12	03/05/2018	Abril	1655.00	115.63	-2.06	±0.03	-7.4	±0.39
6	W-1590	MÉRIDA	12	01/06/2018	Mayo	630.00	44.02	-2.78	±0.05	-15.5	±0.34
6	W-1625	MÉRIDA	12	02/07/2018	Junio	1560.00	108.99	-4.79	±0.05	-34.9	±0.57
6	W-1654	MÉRIDA	12	02/08/2018	Julio	2370.00	165.58	-1.55	±0.06	-5.2	±0.62
6	W-1665	MÉRIDA	12	04/09/2018	Agosto	2410.00	168.38	-1.91	±0.14	-5.8	±0.34
6	W-1740	MÉRIDA	12	01/10/2018	Septiembre	1440.00	100.61	-1.74	±0.08	-6.8	±0.64
6	W-1752	MÉRIDA	12	01/11/2018	Octubre	1300.00	90.83	-1.96	±0.05	-4.3	±0.60
7	W-1535	MEXICALI	7	01/03/2018	Febrero	1.50	0.10	5.98	±0.07	16.7	±0.47
7	W-1741	MEXICALI	7	01/10/2018	Septiembre	112.00	7.83	-4.96	±0.06	-38.3	±0.18
7	W-1753	MEXICALI	7	01/11/2018	Octubre	32.00	2.24	-10.00	±0.05	-84.5	±0.24
8	W-1500	MONTERREY	494	04/01/2018	Diciembre	552.0	38.57	-8.71	±0.03	-51.9	±0.41

Tabla 6 Resultados de oxígeno-18 y deuterio. Hoja 2/3

NÚM.	# LAB. IMTA	IDENTIFICACIÓN	ALTITUD (msnm)	FECHA DE MUESTREO	PERIODO DE MUESTREO	VOLUMEN COLECTADO (ml)	PRECIPITACIÓN (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	1σ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	1σ (‰)
8	W-1513	MONTERREY	494	01/02/2018	Enero	46.00	3.21	-3.28	±0.03	-3.8	±0.24
8	W-1530	MONTERREY	494	01/03/2018	Febrero	112.00	7.83	0.70	±0.09	16.0	±0.17
8	W-1546	MONTERREY	494	01/04/2018	Marzo	14.00	0.98	1.05	±0.10	15.5	±0.55
8	W-1572	MONTERREY	494	02/05/2018	Abril	1000.00	69.87	-0.69	±0.07	11.4	±0.28
8	W-1591	MONTERREY	494	01/06/2018	Mayo	358.00	25.01	-1.20	±0.03	0.4	±0.68
8	W-1626	MONTERREY	494	02/07/2018	Junio	1355.00	94.67	-16.52	±0.09	-122.1	±0.55
8	W-1655	MONTERREY	494	01/08/2018	Julio	133.00	9.29	0.32	±0.05	0.8	±0.29
8	W-1742	MONTERREY	494	01/10/2018	Septiembre	4224.00	295.12	-6.04	±0.07	-35.9	±0.24
8	W-1754	MONTERREY	494	01/11/2018	Octubre	780.00	54.50	-3.83	±0.06	-16.8	±0.44
9	W-1520	QUERÉTARO	1,092	06/02/2018	Enero	8.00	0.56	-3.27	±0.04	-28.9	±0.27
9	W-1532	QUERÉTARO	1,092	01/03/2018	Febrero	60.00	4.19	-2.90	±0.04	-20.0	±0.40
9	W-1575	QUERÉTARO	1,092	01/05/2018	Abril	60.00	4.19	-1.35	±0.18	-6.9	±0.56
9	W-1592	QUERÉTARO	1,092	01/06/2018	Mayo	820.00	57.29	-3.16	±0.17	-12.3	±0.12
9	W-1627	QUERÉTARO	1,092	02/07/2018	Junio	3282.30	229.32	-12.33	±0.04	-89.0	±0.39
9	W-1656	QUERÉTARO	1,092	01/08/2018	Julio	590.00	41.22	-3.13	±0.04	-17.9	±0.73
9	W-1666	QUERÉTARO	1,092	03/09/2018	Agosto	1459.00	101.94	-7.42	±0.10	-52.3	±0.48
9	W-1743	QUERÉTARO	1,092	01/10/2018	Septiembre	1410.00	98.51	-7.80	±0.05	-51.3	±0.60
9	W-1755	QUERÉTARO	1,092	01/11/2018	Octubre	410.00	28.65	-7.61	±0.06	-49.7	±0.45
10	W-1514	TACUBAYA	2,322	01/02/2018	Enero	150.00	10.48	-7.60	±0.08	-46.3	±0.11
10	W-1533	TACUBAYA	2,322	01/03/2018	Febrero	80.00	5.59	-3.34	±0.07	-19.5	±0.08
10	W-1549	TACUBAYA	2,322	05/04/2018	Marzo	170.00	11.88	-3.45	±0.02	-19.7	±0.26
10	W-1570	TACUBAYA	2,322	02/05/2018	Abril	610.00	42.62	-1.28	±0.05	1.9	±0.43
10	W-1593	TACUBAYA	2,322	01/06/2018	Mayo	1200.00	83.84	-3.88	±0.08	-19.5	±0.30
10	W-1628	TACUBAYA	2,322	02/07/2018	Junio	2580.00	180.26	-15.67	±0.06	-115.3	±0.38
10	W-1657	TACUBAYA	2,322	02/08/2018	Julio	1400.00	97.81	-3.79	±0.04	-22.5	±0.20
10	W-1667	TACUBAYA	2,322	03/09/2018	Agosto	4540.00	317.19	-6.35	±0.15	-41.6	±0.26
10	W-1744	TACUBAYA	2,322	01/10/2018	Septiembre	2760.00	192.83	-6.69	±0.11	-40.5	±0.37
10	W-1756	TACUBAYA	2,322	01/11/2018	Octubre	1070.00	74.76	-6.12	±0.05	-36.4	±0.66
11	W-1512	TUXTLA GUTIÉRREZ	577	06/02/2018	Enero	6.00	0.42	-0.74	±0.02	-6.2	±0.43
11	W-1547	TUXTLA GUTIÉRREZ	577	02/04/2018	Marzo	45.00	3.14	-1.52	±0.20	-7.0	±0.36
11	W-1576	TUXTLA GUTIERREZ	577	01/05/2018	Abril	3.00	0.21	-2.71	±0.05	-20.3	±0.47
11	W-1594	TUXTLA GUTIÉRREZ	577	01/06/2018	Mayo	539.60	37.70	-0.53	±0.09	7.9	±0.25
11	W-1629	TUXTLA GUTIERREZ	577	01/07/2018	Junio	3237.60	226.20	-7.51	±0.06	-50.7	±0.24
11	W-1658	TUXTLA GUTIÉRREZ	577	01/08/2018	Julio	721.00	50.37	-1.81	±0.04	-9.9	±0.09
11	W-1668	TUXTLA GUTIERREZ	577	01/09/2018	Agosto	1492.00	104.24	-6.99	±0.20	-46.6	±0.86
11	W-1745	TUXTLA GUTIERREZ	577	01/10/2018	Septiembre	2240.00	156.50	-5.40	±0.05	-31.4	±0.49
12	W-1499	VERACRUZ	15	07/01/2018	Diciembre	760.0	53.10	-1.58	±0.06	5.0	±0.44
12	W-1518	VERACRUZ	15	06/02/2018	Enero	380.00	26.55	-2.76	±0.09	-9.0	±0.39
12	W-1531	VERACRUZ	15	01/03/2018	Febrero	650.00	45.41	-0.67	±0.04	6.1	±0.31
12	W-1571	VERACRUZ	15	02/05/2018	Abril	690.00	48.21	-3.47	±0.06	-15.3	±0.32
12	W-1595	VERACRUZ	15	01/06/2018	Mayo	1037.70	72.50	-1.16	±0.04	3.0	±0.21
12	W-1630	VERACRUZ	15	04/07/2018	Junio	4079.20	285.00	-7.35	±0.03	-49.7	±0.40
12	W-1659	VERACRUZ	15	01/08/2018	Julio	4420.00	308.81	-4.16	±0.08	-21.4	±0.32
12	W-1669	VERACRUZ	15	01/09/2018	Agosto	5940.00	415.01	-4.21	±0.18	-22.9	±0.50
12	W-1746	VERACRUZ	15	01/10/2018	Septiembre	3350.00	234.05	-3.61	±0.10	-17.0	±0.44
12	W-1758	VERACRUZ	15	01/11/2018	Octubre	2480.00	173.27	-4.25	±0.08	-22.3	±0.34
13	W-1497	VILLAHERMOSA	5	02/01/2018	Diciembre	460.0	32.14	-1.74	±0.07	3.1	±0.50
13	W-1515	VILLAHERMOSA	5	02/02/2018	Enero	1000.0	69.87	-3.06	±0.03	-8.7	±0.28

Tabla 7 Resultados de oxígeno-18 y deuterio. Hoja 3/3

NÚM.	# LAB. IMTA	IDENTIFICACIÓN	ALTITUD (msnm)	FECHA DE MUESTREO	PERIODO DE MUESTREO	VOLUMEN COLECTADO (ml)	PRECIPITACIÓN (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	1σ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	1σ (‰)
13	W-1538	VILLAHERMOSA	5	02/03/2018	Febrero	600.0	41.92	-1.16	±0.09	2.9	±0.72
13	W-1548	VILLAHERMOSA	5	03/04/2018	Marzo	260.0	18.17	-0.13	±0.06	3.1	±0.28
13	W-1596	VILLAHERMOSA	5	01/06/2018	Mayo	480.0	33.54	-3.57	±0.03	-19.9	±0.38
13	W-1631	VILLAHERMOSA	5	02/07/2018	Junio	2250.0	157.20	-6.82	±0.09	-46.3	±0.32
13	W-1660	VILLAHERMOSA	5	01/08/2018	Julio	1192.0	83.28	-3.11	±0.02	-16.1	±0.25
13	W-1670	VILLAHERMOSA	5	03/09/2018	Agosto	248.0	17.33	-4.31	±0.20	-29.5	±0.92
13	W-1747	VILLAHERMOSA	5	01/10/2018	Septiembre	96.0	6.71	-2.71	±0.08	-12.1	±0.51
13	W-1759	VILLAHERMOSA	5	01/11/2018	Octubre	117.1	8.18	-4.76	±0.02	-25.7	±0.37

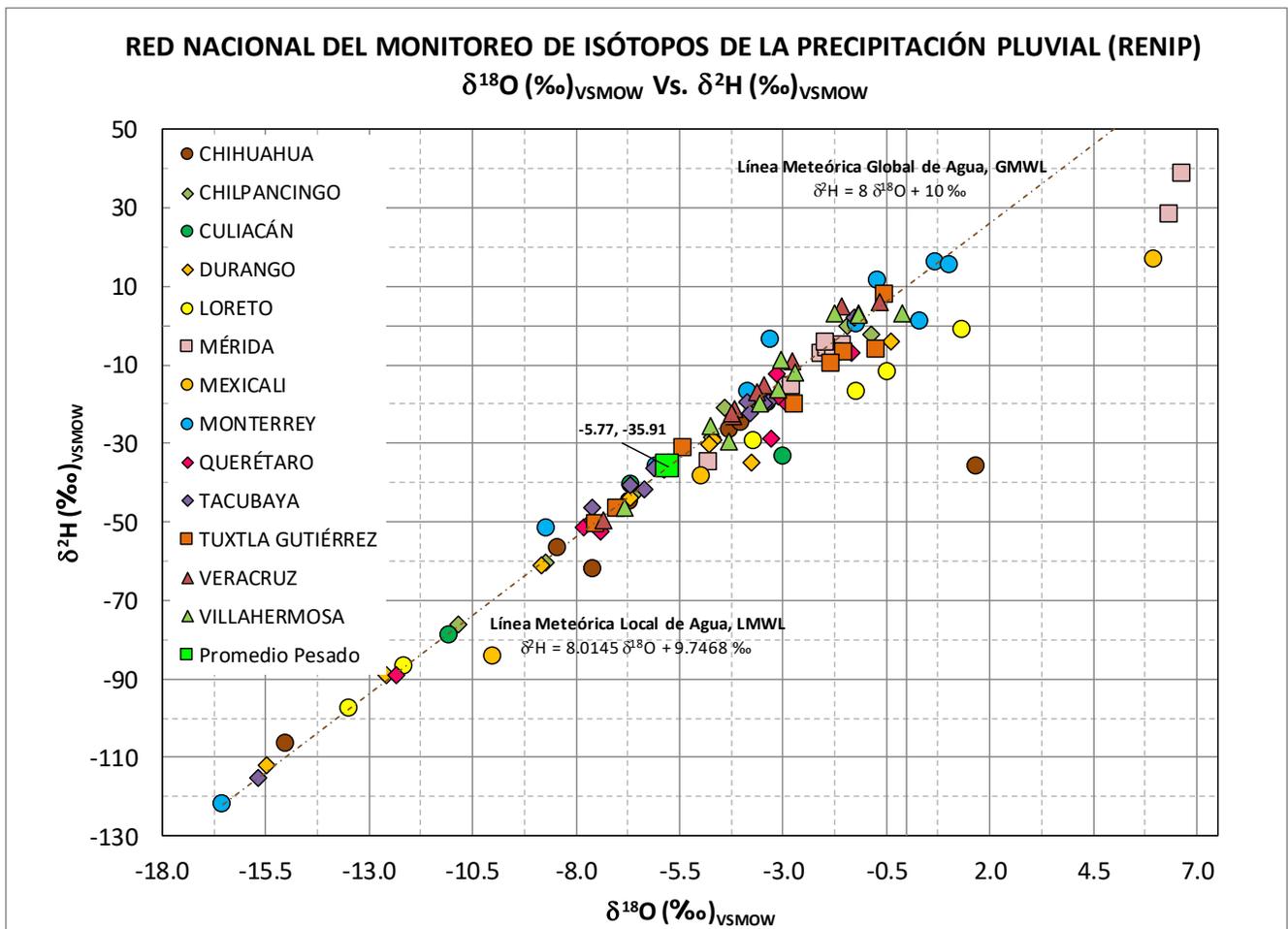


Figura 62 Composición isotópica estable

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 75 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Análisis químicos

El análisis de la composición y concentración de especies químicas disueltas presentes en la lluvia, nos permite conocer la calidad de la precipitación pluvial de las regiones integrantes de la RENIP, así como el funcionamiento de los acuíferos y el comportamiento del agua en el ciclo hidrológico, bajo las condiciones climatológicas, orográficas y ambientales del territorio nacional.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos (de la **Tabla 8** a la **Tabla 10**) de las muestras procesadas en los laboratorios de Canadá. A esta relación, se integran los datos obtenidos de las muestras de lluvia que integran la red de monitoreo de la precipitación pluvial del acuífero de Cuernavaca (**Tabla 11** y **Tabla 12**), para una inter comparación de sus constituyentes químicos presentes.

Tabla 8 Resultados químicos. Hoja 1/5

IDENTIFICACIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	F (mg/L)	Cl (mg/L)	N-NO ₂ (mg/L)	Br (mg/L)	N-NO ₃ (mg/L)	P-PO ₄ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Na (ug/L)	Li (ug/L)	Be (ug/L)	Mg (ug/L)	Al (ug/L)	Si (ug/L)	K (ug/L)
CHIHUAHUA	0.05	0.4	< 0.01	< 0.03	0.45	< 0.02	1.8	595	< 1	< 0.1	86	7	< 200	180
CHILPANCINGO	< 0.01	0.24	< 0.01	< 0.03	0.13	< 0.02	0.61	173	< 1	< 0.1	360	7	< 200	80
CHILPANCINGO	0.01	0.58	< 0.01	< 0.03	0.14	0.03	1.95	767	< 1	< 0.1	306	13	200	400
CULIACÁN	0.01	1.71	< 0.01	< 0.03	0.32	< 0.02	2.18	1370	< 1	< 0.1	143	5	< 200	240
DURANGO	0.06	1.15	< 0.01	0.04	0.39	< 0.02	4.22	1180	< 1	< 0.1	114	10	< 200	380
DURANGO	0.05	0.55	0.01	< 0.03	0.13	0.05	1.68	345	< 1	< 0.1	99	8	300	400
GUADALAJARA	< 0.01	0.19	< 0.01	< 0.03	0.09	< 0.02	0.85	260	< 1	< 0.1	37	5	< 200	160
MÉRIDA	0.01	0.71	< 0.01	< 0.03	0.04	< 0.02	1.23	623	< 1	< 0.1	88	6	< 200	50
MÉRIDA	0.15	7.93	< 0.01	< 0.03	< 0.01	< 0.02	3.46	5020	< 1	< 0.1	678	13	< 200	310
MONTERREY	1	3.17	0.23	< 0.03	2.43	< 0.02	26.3	2570	2	< 0.1	981	38	2000	1510
QUERÉTARO	0.44	25.6	< 0.02	< 0.06	0.55	< 0.04	99.3	29700	24	< 0.1	9480	16	8500	4030
QUERÉTARO	0.05	1.05	< 0.01	< 0.03	0.51	< 0.02	5.87	1540	< 1	< 0.1	431	25	500	410
TACUBAYA	0.04	0.34	0.04	< 0.03	0.53	< 0.02	2.86	211	< 1	< 0.1	87	6	< 200	80
TACUBAYA	0.04	0.47	0.05	< 0.03	0.93	< 0.02	6.62	647	< 1	< 0.1	372	13	500	250
TAPACHULA	0.02	1.74	< 0.01	< 0.03	0.2	0.06	1.96	1160	< 1	< 0.1	238	12	< 200	490
TUXTLA GUTIÉRREZ	< 0.01	0.3	< 0.01	< 0.03	0.06	< 0.02	1.46	340	< 1	< 0.1	110	6	< 200	60
TUXTLA GUTIERREZ	0.09	1.25	< 0.01	< 0.03	< 0.01	0.5	3.86	2120	< 1	< 0.1	213	19	400	370
VERACRUZ	< 0.01	1.27	< 0.01	< 0.03	0.06	< 0.02	1.49	685	< 1	< 0.1	119	3	< 200	70
VERACRUZ	0.11	41	0.12	0.1	0.31	0.69	15.5	21200	< 1	< 0.1	3160	66	1500	3230
VILLAHERMOSA	< 0.01	0.68	< 0.01	< 0.03	0.06	< 0.02	2.99	517	< 1	< 0.1	192	5	< 200	120
VILLAHERMOSA	< 0.01	1.34	< 0.01	< 0.03	0.03	0.05	2.18	878	< 1	< 0.1	140	3	< 200	100

IDENTIFICACIÓN	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
	Ca (ug/L)	Sc (ug/L)	Ti (ug/L)	V (ug/L)	Cr (ug/L)	Mn (ug/L)	Fe (ug/L)	Co (ug/L)	Ni (ug/L)	Cu (ug/L)	Zn (ug/L)	Ga (ug/L)	Ge (ug/L)	As (ug/L)	Se (ug/L)
CHIHUAHUA	4800	< 1	< 0.1	0.5	< 0.5	1.2	< 10	0.033	6.1	1.7	196	0.01	< 0.01	0.22	< 0.2
CHILPANCINGO	3000	< 1	0.1	0.2	< 0.5	1.9	< 10	0.085	30.3	0.8	235	< 0.01	< 0.01	0.09	< 0.2
CHILPANCINGO	8500	< 1	0.2	0.5	< 0.5	0.4	< 10	0.015	6.5	2	178	0.67	< 0.01	0.25	< 0.2
CULIACÁN	3400	< 1	0.2	1.7	0.8	5.6	< 10	0.07	33.2	1.4	202	< 0.01	< 0.01	0.17	< 0.2
DURANGO	3000	< 1	< 0.1	0.6	< 0.5	2.7	< 10	0.038	21.7	3.5	196	< 0.01	< 0.01	0.34	< 0.2
DURANGO	2800	< 1	0.1	0.8	< 0.5	3.3	< 10	0.035	16.1	2.2	181	1.23	< 0.01	0.37	< 0.2
GUADALAJARA	< 700	< 1	< 0.1	0.2	< 0.5	3	< 10	0.093	10.3	2.7	258	4.67	< 0.01	0.04	< 0.2
MÉRIDA	4200	< 1	< 0.1	0.4	< 0.5	1.4	< 10	0.029	8.3	0.8	113	< 0.01	< 0.01	< 0.03	< 0.2
MÉRIDA	10700	< 1	0.2	0.6	0.7	0.7	< 10	0.071	35.9	1.9	306	1.33	< 0.01	0.04	< 0.2
MONTERREY	35100	< 1	1.1	4.1	1.1	12.7	40	0.336	35.5	9.9	870	5.05	0.04	0.42	0.9
QUERÉTARO	41500	< 1	< 0.1	1.7	< 0.5	0.9	< 10	0.025	16.2	7.1	102	0.01	0.19	2.28	0.4
QUERÉTARO	6200	< 1	0.5	1.2	< 0.5	5.2	10	0.116	35.6	3.1	456	1.46	< 0.01	0.23	0.3
TACUBAYA	1200	< 1	< 0.1	0.7	< 0.5	3.5	< 10	0.079	20	1.8	328	0.01	< 0.01	0.18	0.4
TACUBAYA	3200	< 1	0.4	2.4	< 0.5	4	< 10	0.131	37.9	10.3	969	0.77	< 0.01	0.28	0.5
TAPACHULA	1200	< 1	0.2	0.7	0.7	9.8	< 10	0.209	36.7	3.9	585	3.82	< 0.01	0.13	< 0.2
TUXTLA GUTIÉRREZ	4300	< 1	< 0.1	0.2	< 0.5	1.2	< 10	0.063	35.1	0.9	173	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.2
TUXTLA GUTIERREZ	8300	< 1	< 0.1	0.6	< 0.5	1.5	< 10	0.092	13.6	4.3	246	1.28	< 0.01	0.13	< 0.2
VERACRUZ	1000	< 1	< 0.1	0.2	< 0.5	2	< 10	0.078	27.9	0.8	380	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.2
VERACRUZ	12700	< 1	0.7	1.9	1	8.1	50	0.207	16.9	22.7	839	3.43	< 0.01	0.29	0.7
VILLAHERMOSA	2600	< 1	< 0.1	0.2	< 0.5	4	< 10	0.066	25	1.0	175	< 0.01	< 0.01	0.04	< 0.2
VILLAHERMOSA	1400	< 1	< 0.1	0.2	< 0.5	2.4	< 10	0.073	15.8	1.2	246	0.38	< 0.01	0.04	< 0.2

Tabla 10 Resultados químicos. Hoja 3/5

IDENTIFICACIÓN	60	61	62	63	64	65	66
	W (ug/L)	Hg (ug/L)	Tl (ug/L)	Pb (ug/L)	Bi (ug/L)	Th (ug/L)	U (ug/L)
CHIHUAHUA	0.14	< 0.2	0.01	0.33	< 0.3	0.005	0.004
CHILPANCINGO	0.07	< 0.2	0.002	0.42	< 0.3	0.002	0.002
CHILPANCINGO	< 0.02	< 0.2	0.003	0.18	< 0.3	< 0.001	0.004
CULIACÁN	0.05	< 0.2	0.002	0.17	< 0.3	0.004	< 0.001
DURANGO	0.07	< 0.2	0.007	0.19	< 0.3	0.003	0.002
DURANGO	< 0.02	< 0.2	0.006	0.23	< 0.3	< 0.001	0.004
GUADALAJARA	< 0.02	< 0.2	0.005	0.43	< 0.3	< 0.001	0.001
MÉRIDA	< 0.02	< 0.2	< 0.001	0.07	< 0.3	0.001	0.002
MÉRIDA	< 0.02	< 0.2	0.002	0.3	< 0.3	< 0.001	0.006
MONTERREY	< 0.02	< 0.2	0.119	1.08	< 0.3	0.003	0.08
QUERÉTARO	0.41	< 0.2	0.078	0.09	< 0.3	0.005	0.896
QUERÉTARO	< 0.02	< 0.2	0.021	0.3	< 0.3	< 0.001	0.008
TACUBAYA	< 0.02	< 0.2	0.011	0.19	< 0.3	< 0.001	0.002
TACUBAYA	< 0.02	< 0.2	0.01	0.5	< 0.3	< 0.001	0.005
TAPACHULA	< 0.02	< 0.2	0.011	1.98	< 0.3	< 0.001	0.002
TUXTLA GUTIÉRREZ	< 0.02	< 0.2	< 0.001	0.16	< 0.3	< 0.001	0.002
TUXTLA GUTIERREZ	< 0.02	< 0.2	0.002	0.86	< 0.3	< 0.001	0.006
VERACRUZ	< 0.02	< 0.2	< 0.001	0.48	< 0.3	< 0.001	< 0.001
VERACRUZ	< 0.02	< 0.2	0.007	2.07	< 0.3	0.003	0.017
VILLAHERMOSA	< 0.02	< 0.2	< 0.001	0.18	< 0.3	< 0.001	< 0.001
VILLAHERMOSA	< 0.02	< 0.2	< 0.001	0.36	< 0.3	< 0.001	< 0.001

Tabla 11 Resultados químicos. Hoja 4/5

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	F mg/L	Cl mg/L	N-NO2 mg/L	NO2 mg/L	Br mg/L	N-NO3 mg/L	P-PO4 mg/L	SO4 mg/L	Na ug/L
TRES MARIAS/AGO 2018	0.07	0.46	< 0.01	0.0164	< 0.03	0.38	< 0.02	2.09	42
TRES CUMBRES COLECTOR/AGO 2018	0.07	0.46	< 0.01	0.0164	< 0.03	0.4	< 0.02	2.41	80
HUITZILAC/AGO 2018	0.06	0.37	0.01	0.0328	< 0.03	0.31	< 0.02	1.92	46
OBSERVATORIO COLECTOR/AGO 2018	0.07	0.35	< 0.01	0.0164	< 0.03	0.34	< 0.02	1.89	43
FIRA/AGO 2018	0.05	0.3	< 0.01	0.0164	< 0.03	0.31	< 0.02	1.78	50
TETLAMA/AGO 2018	0.04	0.26	< 0.01	0.0164	< 0.03	0.25	< 0.02	1.35	38
TEMIXCO/AGO 2018	0.06	0.31	< 0.01	0.0164	< 0.03	0.28	< 0.02	1.44	94
IMTA/AGO 2018	0.05	0.33	< 0.01	0.0164	< 0.03	0.36	< 0.02	3.04	43

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	Li ug/L	Be ug/L	Mg ug/L	Al ug/L	Si ug/L	K ug/L	Ca ug/L	Sc ug/L	Ti ug/L	V ug/L	Cr ug/L
TRES MARIAS/AGO 2018	< 1	< 0.1	61	22	< 200	270	< 700	< 1	< 0.1	0.3	< 0.5
TRES CUMBRES COLECTOR/AGO 2018	< 1	< 0.1	35	19	< 200	130	< 700	< 1	< 0.1	0.3	< 0.5
HUITZILAC/AGO 2018	< 1	< 0.1	29	16	< 200	< 30	< 700	< 1	< 0.1	0.2	< 0.5
OBSERVATORIO COLECTOR/AGO 2018	< 1	< 0.1	36	10	< 200	70	< 700	< 1	< 0.1	0.3	< 0.5
FIRA/AGO 2018	< 1	< 0.1	81	4	< 200	70	1200	< 1	< 0.1	0.3	< 0.5
TETLAMA/AGO 2018	< 1	< 0.1	32	6	< 200	40	< 700	< 1	< 0.1	0.2	< 0.5
TEMIXCO/AGO 2018	< 1	< 0.1	88	5	< 200	60	1300	< 1	< 0.1	0.3	< 0.5
IMTA/AGO 2018	< 1	< 0.1	81	6	< 200	140	1400	< 1	0.1	0.4	< 0.5

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	Mn ug/L	Fe ug/L	Co ug/L	Ni ug/L	Cu ug/L	Zn ug/L	Ga ug/L	Ge ug/L	As ug/L	Se ug/L	Rb ug/L
TRES MARIAS/AGO 2018	2.7	< 10	0.072	51.7	21.9	238	< 0.01	< 0.01	0.12	< 0.2	0.695
TRES CUMBRES COLECTOR/AGO 2018	3.1	< 10	0.106	10.4	16.3	369	< 0.01	< 0.01	0.14	< 0.2	0.228
HUITZILAC/AGO 2018	2	< 10	0.047	25.6	38.1	342	< 0.01	< 0.01	0.17	< 0.2	0.084
OBSERVATORIO COLECTOR/AGO 2018	2	< 10	0.049	11.7	35.3	383	< 0.01	< 0.01	0.16	< 0.2	0.116
FIRA/AGO 2018	2.4	< 10	0.031	13.5	7.1	315	< 0.01	< 0.01	0.22	< 0.2	0.203
TETLAMA/AGO 2018	1.6	< 10	0.033	9.1	31.3	277	< 0.01	< 0.01	0.11	< 0.2	0.074
TEMIXCO/AGO 2018	2.2	< 10	0.06	46.5	5.4	208	< 0.01	< 0.01	0.13	< 0.2	0.135
IMTA/AGO 2018	2.7	< 10	0.041	< 0.3	1.5	204	< 0.01	< 0.01	0.17	< 0.2	0.159

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	Sr ug/L	Y ug/L	Zr ug/L	Nb ug/L	Mo ug/L	Ag ug/L	Cd ug/L	In ug/L	Sn ug/L	Sb ug/L	Te ug/L
TRES MARIAS/AGO 2018	1.35	0.011	< 0.01	< 0.005	< 0.1	< 0.2	0.04	< 0.001	< 0.1	0.24	< 0.1
TRES CUMBRES COLECTOR/AGO 2018	1.68	0.007	< 0.01	< 0.005	0.1	< 0.2	0.06	< 0.001	< 0.1	0.36	< 0.1
HUITZILAC/AGO 2018	1.14	0.006	< 0.01	< 0.005	< 0.1	< 0.2	0.05	< 0.001	< 0.1	0.28	< 0.1
OBSERVATORIO COLECTOR/AGO 2018	1.33	0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.1	< 0.2	0.06	< 0.001	< 0.1	0.21	< 0.1
FIRA/AGO 2018	2.06	0.004	< 0.01	< 0.005	< 0.1	< 0.2	0.04	< 0.001	< 0.1	0.14	< 0.1
TETLAMA/AGO 2018	1.67	0.005	< 0.01	< 0.005	< 0.1	< 0.2	0.04	< 0.001	< 0.1	0.16	< 0.1
TEMIXCO/AGO 2018	2.02	0.004	0.01	< 0.005	< 0.1	< 0.2	0.04	< 0.001	< 0.1	0.18	< 0.1
IMTA/AGO 2018	1.95	0.008	< 0.01	< 0.005	< 0.1	< 0.2	0.04	< 0.001	< 0.1	0.18	< 0.1

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	Cs ug/L	Ba ug/L	La ug/L	Ce ug/L	Pr ug/L	Nd ug/L	Sm ug/L	Eu ug/L	Gd ug/L	Tb ug/L	Dy ug/L
TRES MARIAS/AGO 2018	0.005	2.7	0.013	0.018	0.003	0.01	0.003	< 0.001	0.002	< 0.001	0.002
TRES CUMBRES COLECTOR/AGO 2018	0.004	17.5	0.004	0.008	0.001	0.004	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001
HUITZILAC/AGO 2018	0.004	2.5	0.008	0.009	0.001	0.007	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	0.001
OBSERVATORIO COLECTOR/AGO 2018	0.004	2.6	0.007	0.008	0.001	0.003	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
FIRA/AGO 2018	0.008	2.1	0.002	0.004	< 0.001	0.002	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
TETLAMA/AGO 2018	0.004	2.2	0.005	0.007	< 0.001	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
TEMIXCO/AGO 2018	0.005	9.2	0.003	0.004	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
IMTA/AGO 2018	0.006	2.8	0.006	0.011	0.002	0.007	0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	0.001

Tabla 12 Resultados químicos. Hoja 5/5

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	Ho ug/L	Er ug/L	Tm ug/L	Yb ug/L	Lu ug/L	Hf ug/L	Ta ug/L	W ug/L	Hg ug/L	Tl ug/L	Pb ug/L
TRES MARIAS/AGO 2018	< 0.001	0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.02	< 0.2	0.018	1.94
TRES CUMBRES COLECTOR/AGO 2018	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.02	< 0.2	0.023	8.32
HUITZILAC/AGO 2018	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.02	< 0.2	0.022	3.94
OBSERVATORIO COLECTOR/AGO 2018	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.02	< 0.2	0.017	3.07
FIRA/AGO 2018	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.02	< 0.2	0.013	0.44
TETLAMA/AGO 2018	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.02	< 0.2	0.011	1.71
TEMIXCO/AGO 2018	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.02	< 0.2	0.013	0.41
IMTA/AGO 2018	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.02	< 0.2	0.019	0.93

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	Bi ug/L	Th ug/L	U ug/L
TRES MARIAS/AGO 2018	< 0.3	0.002	< 0.001
TRES CUMBRES COLECTOR/AGO 2018	< 0.3	< 0.001	< 0.001
HUITZILAC/AGO 2018	< 0.3	< 0.001	< 0.001
OBSERVATORIO COLECTOR/AGO 2018	< 0.3	< 0.001	< 0.001
FIRA/AGO 2018	< 0.3	< 0.001	< 0.001
TETLAMA/AGO 2018	< 0.3	< 0.001	< 0.001
TEMIXCO/AGO 2018	< 0.3	< 0.001	< 0.001
IMTA/AGO 2018	< 0.3	0.001	0.001

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 81 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

6.- METODOLOGÍAS DE RECIENTE DESARROLLO

Medición de isótopos estables por espectroscopía láser

Analizador láser Los Gatos Research Inc. Modelo LIWA-45-EP

Las proporciones de isótopos estables de deuterio y oxígeno-18 en las aguas naturales ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) son marcadores efectivos del ciclo hidrológico y proporcionan una perspectiva única sobre los procesos hidrológicos, climáticos y ecológicos a escala local, regional y continental, así como la relación del agua subterránea en los ríos y lagos, la recarga de acuíferos, las fuentes de humedad en las precipitaciones, el reciclaje y transporte de la humedad atmosférica y la absorción de agua por parte de las plantas.

La invención de un espectrómetro de masas de isótopos (IRMS) a finales de 1940 fue el factor propicio para la aplicación de los isótopos en ciencias de la tierra. Por otro lado, el costo relativamente alto y las habilidades operacionales requeridas para un IRMS, han limitado el amplio uso de los isótopos por los investigadores en general.

El equipo espectroscópico, desarrollado por Los Gatos Research Inc. para analizar las proporciones de isótopos en el agua líquida (Figura 63), mide la absorción láser dentro de una cavidad con espejos de alta reflectividad, que generan trayectorias de longitudes de varios kilómetros, dando como resultado una clara separación de las líneas de absorción láser de diferentes moléculas de agua.

El analizador laser mide las relaciones isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) y δD ($^2\text{H}/^1\text{H}$) en muestras de agua líquida, los tipos de mediciones proporcionan una herramienta útil para investigar procesos hidrológicos en superficies y sistemas de agua subterránea, así como para estudios de agua doblemente etiquetados

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 82 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

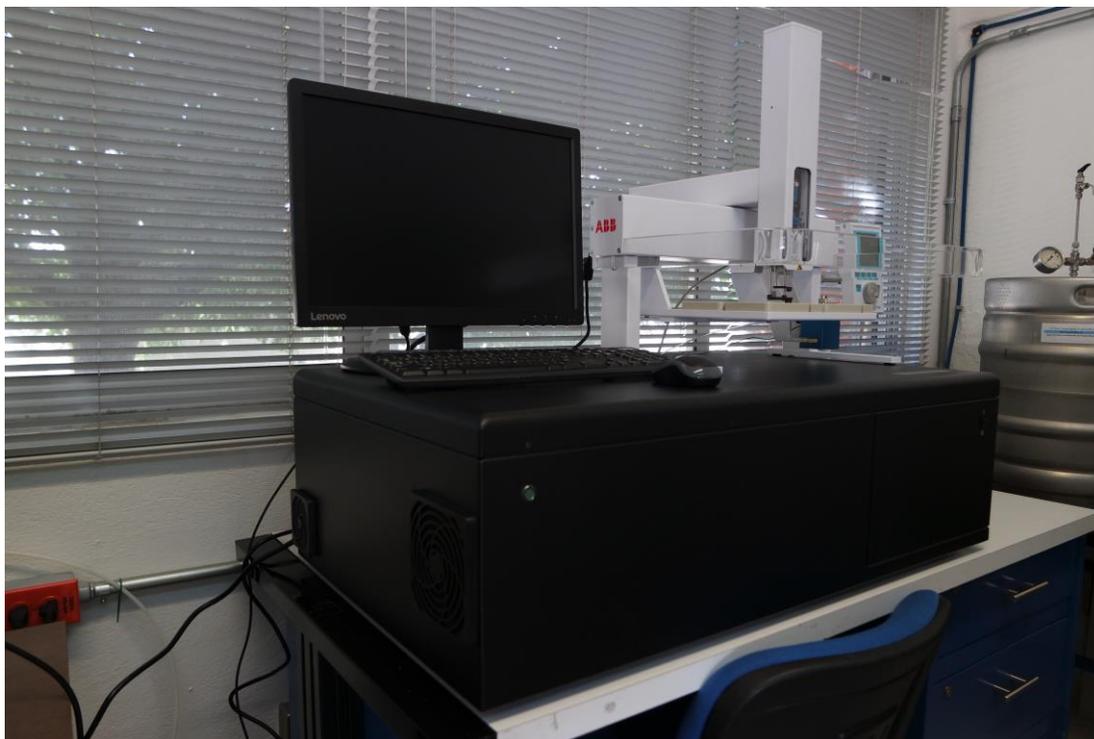


Figura 63 Analizador Láser de isótopos estables de agua Los Gatos Reseach Inc instalado en el laboratorio de espectrometría de masas del IMTA

Los beneficios de usar el analizador laser de isotopos estables LGR son:

- Velocidad: cuando se configura con el autocargador opcional puede medir al menos 800 inyecciones por día. Esto es significativamente más rápido que los instrumentos competitivos y se logra sin sacrificar datos de calidad.
- Modo de alta precisión: el LGR se puede ejecutar en un modo de alta precisión para aplicaciones que requieren la más alta precisión y exactitud.
- Consumo de energía: el LGR y el autoinyector requieren solo 150 vatios. El bajo consumo de energía es particularmente importante en lugares de campo con suministro de energía limitado.
- Confiabilidad: la tecnología de LGR es fácil de usar, operar y fabricar. Como resultado, muchos LGR han estado en uso por más de 4 años sin problemas reportados.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 
Página 83 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

El analizador LGR (Los Gatos Research Inc.) mide la absorción alrededor de una longitud de onda de 1,390 nm (nanómetros) para calcular las concentraciones moleculares de $^2\text{H}_2\text{O}$, H_2^{18}O y H_2O . Las concentraciones moleculares se convierten en relaciones atómicas $^2\text{H}/\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Se utiliza un procedimiento de post-procesamiento para calcular los valores en escala-delta (δ) con respecto al VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water):

$$\delta = \frac{R_{\text{medido}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}}$$

Donde R es $^2\text{H}/\text{H}$ o $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

El analizador de isótopos de agua líquida de Los Gatos Research (LGR) proporciona mediciones de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de agua en líquidos (incluidos los vinos) y muestras de vapor discretas con un rendimiento insuperable. Las mediciones pueden informarse a la velocidad incomparable de (al menos) 800 inyecciones por día. Y, con el aclamado paquete de rendimiento mejorado de LGR, las mediciones se pueden registrar con una precisión y una estabilidad sin igual.

El analizador LGR incorpora control térmico patentado para mediciones ultra estables con una precisión, una precisión y una velocidad insuperables, validadas en laboratorios líderes en todo el mundo.

Para mediciones de "alto rendimiento" de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ prácticamente en cualquier lugar, el analizador ultraportátil de LGR y el autoinyector ultracompacto requieren una potencia promedio de menos de 70 vatios y pesan 19 kg (excluyendo la bomba de vacío externa).

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 
Página 84 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

El Analizador de Isótopos de Agua Líquida (LWIA por sus siglas en inglés) es ideal para una amplia variedad de aplicaciones hidrológicas, analíticas y biológicas que involucran mediciones de agua dulce, agua de mar y otros líquidos. La facilidad de uso, la durabilidad en el campo y el alto rendimiento del analizador lo convierten en el analizador estándar de la industria para este tipo de mediciones. El analizador de isótopos de agua líquida de LGR es utilizado por investigadores, científicos, agencias gubernamentales y organizaciones intergubernamentales en los 7 continentes.

La tecnología patentada de LGR, una técnica de absorción mejorada por cavidad de cuarta generación, tiene muchas ventajas (más simple, más fácil de construir, robusta) sobre las técnicas más antiguas y convencionales de espectroscopía de reducción de cavidades (CRDS). Como resultado, los analizadores LGR ofrecen un mayor rendimiento a un menor costo.

Todos los analizadores LGR tienen una computadora interna (sistema operativo Linux) que puede almacenar datos prácticamente indefinidamente en un disco duro interno y enviar datos en tiempo real a un registrador de datos a través de las salidas digital (RS232) o Ethernet. Además, el analizador incluye el aclamado software de análisis de LGR, que realiza automáticamente muchos procedimientos de análisis en mediciones de líquidos que los investigadores realizaron previamente una vez que se recopilaron los datos. Entre las capacidades del software de LGR se incluyen la aplicación automática de las mediciones estándar de calibración realizadas durante la ejecución de la muestra, mostrar gráficamente todos los resultados y diagnosticar el funcionamiento del instrumento. Además, el software de análisis posterior incluye la tecnología de identificación espectral de contaminación espectral (SCI) de LGR, el único software que ha demostrado cuantificar y corregir con precisión la presencia de contaminantes orgánicos en las muestras de agua. Finalmente, los analizadores de agua isotópicos de LGR (incluidos los modelos que reportan $\delta^{17}\text{O}$) son totalmente compatibles con LIMS para

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 
Página 85 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

láseres utilizado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés).

Al igual que con todos los analizadores LGR, el LWIA puede controlarse completamente de forma remota a través de Internet. Esta capacidad le permite al usuario operar el analizador usando un navegador web prácticamente en cualquier lugar donde haya acceso a Internet. Además, el acceso remoto permite el control total del instrumento y la oportunidad de obtener y compartir datos y diagnosticar el funcionamiento del instrumento sin estar en el sitio.

Todos los analizadores LGR utilizan una tecnología única de absorción láser llamada espectroscopia de salida de cavidad integrada fuera del eje (OA-ICOS). Esta técnica patentada por LGR ofrece un rendimiento, valor y confiabilidad superiores en comparación con la espectroscopia de reducción de cavidades (CRDS).

La absorción mejorada de la cavidad fue desarrollada por primera vez como un método de detección ultra sensible por el fundador de LGR Anthony O'Keefe en 1988 (Review of Scientific Instruments [ISSN 0034-6748], vol. 59, diciembre de 1988, p. 2544-2551) en el Forma de la cavidad de reducción de la espectroscopia (CRDS). Aunque es innovadora, esta técnica de primera generación requiere una alineación sub-nanométrica de sus ópticas internas, lo que se traduce directamente en limitaciones en términos de alto costo, confiabilidad y vulnerabilidad a las vibraciones y los cambios de temperatura/presión.

Para superar estos inconvenientes, los científicos de LGR desarrollaron, y posteriormente patentaron, una tecnología de absorción de láser mejorada por cavidad de cuarta generación llamada OA-ICOS. Este enfoque ofrece un rendimiento superior, sin embargo, los órdenes de magnitud son menos sensibles a la alineación interna de los componentes y a las variaciones en la temperatura y presión locales. Como resultado, OA-ICOS es

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 
Página 86 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

ideal para uso en instrumentos comerciales incluso para las aplicaciones más exigentes en ubicaciones remotas.

Rango dinámico más amplio: OA-ICOS mide directamente la absorción en lugar de solo un tiempo de descomposición de la cavidad. Por lo tanto, ofrece una respuesta lineal en un rango dinámico significativamente más amplio que la CRDS convencional.

Servicio de campo: el desempeño de OA-ICOS es de una magnitud menos sensible a la alineación interna, porque el instrumento es robusto y confiable. Está diseñado de forma simple y cualquier persona puede reparar fácilmente los instrumentos LGR en sitio.

Menor costo de fabricación: el rendimiento del analizador OA-ICOS no depende de la alineación óptica hiper-crítica, mientras que las técnicas CRDS más antiguas y convencionales requieren la alineación de componentes ópticos sub-nanométricos. Esto requiere el uso de componentes electromecánicos costosos y circuitos de retroalimentación complejos, así como un ensamble de sala limpia que consume mucho tiempo y pruebas elaboradas.

Mejor valor: el rendimiento del analizador OA-ICOS no se ve afectado por cambios menores en la alineación óptica. Esto permite el uso de componentes más simples, de menor costo y menos sistemas de control de retroalimentación, además de simplificar el proceso de ensamblaje.

Mínimo tiempo de inactividad: la tecnología OA-ICOS no requiere una alineación óptica ultra precisa. Esto significa que un usuario mínimamente capacitado puede quitar fácilmente un espejo de cavidad, si es necesario, y luego limpiarlo y reemplazarlo en solo minutos, sin afectar el rendimiento o los costosos retornos a la fábrica.

El analizador laser LGR está diseñado para ser utilizado en campo debido a que cuenta con las siguientes características para ese tipo de trabajos:

- **Bajo consumo:** en aplicaciones de campo, minimizar el consumo de energía que suele ser crítico.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 
Página 87 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

- **Resistente:** la tecnología patentada de ICOS fuera de eje es insensible a la alineación, por lo que es relativamente inmune a los efectos de vibración y manejo brusco que pueden ocurrir durante las implementaciones de campo.
- **Características opcionales:** hay varias opciones disponibles para mediciones de campo, que incluyen: Muestreador continuo de agua que permite el muestreo directo de lagos, ríos, arroyos, precipitaciones, etc.
- **Acceso y control remoto desde cualquier parte del mundo a través de internet.**
- **Experiencia de campo:** los instrumentos LGR están en uso en los 7 continentes en algunos de los entornos más difíciles.

El analizador laser LGR puede ser utilizado para medir de forma rápida y precisa las muestras de agua extremadamente enriquecida en ^2H , y con valores de $\delta^2\text{H}$ al menos hasta 57,000 ‰ (~90,000 ppm), y posiblemente incluso más alto.

La capacidad de medida de ^2H en concentraciones extremas por espectrometría láser, proporciona una nueva forma de determinar rápidamente el rendimiento de las celdas electrolíticas de la TEU y 3 factores de enriquecimiento de H, sin tener que esperar semanas la determinación de resultados por la técnica de recuento de picos de LSC (conteo por centelleo líquido).

La tasa de procesamiento de un LGR de última generación es de 60 muestras altamente enriquecidas en ^2H por día proporcionando de este modo información casi inmediata sobre el lote. Para la descontaminación del analizador laser se requieren aproximadamente 50 inyecciones secuenciales (aproximadamente 1 h en total) de agua limpia, inclusive el agua del grifo es suficiente para eliminar la memoria residual de las muestras de agua enriquecidas en ^2H .

El uso de espectrometría láser de salida de cavidad integrada fuera del eje, para medir de forma precisa y directa el ^2H ultra enriquecido, en un rango de hasta 57,000 ‰ (~9000

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 88 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

ppm de deuterio) a una tasa de 60 muestras/día, facilitan el uso de ^2H como marcador en aplicaciones ambientales e hidrológicas.

La incorporación del láser basado en el método de enriquecimiento de ^2H en las operaciones de tritio de bajo nivel, pueden facilitar un aumento del 10-20% en el rendimiento de la muestra por la eliminación de Spikes, y gravimetría laboriosa, además de proporcionar una retroalimentación inmediata sobre la calidad del rendimiento de las celdas electrolíticas de la TEU.

Instalación del analizador láser modelo LIWA 45-EP en el laboratorio de espectrometría de masas del IMTA

La instalación del analizador láser se realizó siguiendo el manual de instrucciones y utilizando las herramientas sugeridas por el fabricante debido a que la garantía del equipo se encuentra vigente. Se realizaron las adecuaciones de espacio necesarias para la seguridad del equipo y del personal que labora en el laboratorio, las conexiones eléctricas se realizaron a una fuente de alimentación con respaldo de energía y supresor de picos para proteger el equipo de las variaciones eléctricas que pudiera sufrir además que se asegura un uso continuo sin interrupciones por índole eléctrico del equipo, una vez terminada la instalación se realizaron pruebas a cada componente para verificar su correcto funcionamiento, pruebas de calibración del brazo robótico en sus tres ejes, pruebas de conexión de la drierita (desecante), pruebas en la bomba de vacío, pruebas de respaldo eléctrico para el uso continuó e ininterrumpido del equipo, pruebas y verificación de conexiones de los puertos de comunicación del equipo, además se realizaron los ajustes en conexiones de gases y programación necesarios para el uso correcto del analizador.



Figura 64 Paquetes que incluyen el Analizador láser para su
Instalación

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 90 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Pruebas de medición con Deuterio ultra enriquecido

Para realizar las pruebas de medición de muestras con deuterio ultra enriquecido en muestras de agua natural se deben utilizar los estándares 152H (VSMOW)~18,000‰ y 62H (VSMOW)~57,000‰ como valor de referencia se deben medir mediante espectrometría láser, para las pruebas preliminares se debe emplear o programar un Protocolo de análisis de 8 inyecciones, ignorando las 4 primeras, a una velocidad de 11 min/muestra en ^2H la escala de calibración es VSMOW-SLAP.



Figura 65 Analizador Laser Modelo LIWA-45-EP Instalado en el laboratorio de espectrometría de masas del IMTA

Las muestras de agua previamente se deben procesar en la unidad de enriquecimiento de tritio (TEU), posteriormente y una vez terminadas las diferentes etapas del proceso de la TEU, se deben introducir las alícuotas resultantes al analizador laser y tomando en cuenta

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 91 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

el grado esperado de enriquecimiento de ^2H que es de alrededor de 12,000, se debe utilizar una calibración de dos puntos utilizando los estándares de laboratorio 152H (estándar bajo) y 62H (estándar alto), se debe utilizar un estándar de control IHL W-63.

Para las pruebas finales se utiliza un protocolo o programación del equipo laser diferente a las preliminares, siempre y cuando se determine que los niveles de ^2H son altamente enriquecidos, dicho protocolo se programa para el análisis de 12 inyecciones, ignorando las primeras 4, siendo suficientes para obtener resultados precisos y minimizar las correcciones de memoria entre muestras cuantificadas por el software LIMS para Láseres en su última versión utilizado en el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) . Este protocolo da como resultado una tasa de análisis de 16 min/muestra enriquecida.

Para un análisis completo de muestras de agua se deben procesar lotes de 24 muestras en la unidad de electrolisis (TEU), pasar por los diferentes procesos hasta obtener alícuotas de muestra ultra enriquecida, posteriormente se analizaran todas las alícuotas en el instrumento laser LGR esto se traduce que en un solo día se podría analizar todo el lote de 24 muestras de agua ultra enriquecida, la capacidad del analizador laser LGR es de 504 inyecciones por día es decir la tasa de procesamiento límite del equipo es de 60 muestras por día, Incluyendo los estándares y controles internos de laboratorio.

Si posteriormente se requiere utilizar el instrumento láser LGR para analizar muestras o lotes diferentes, bastará con programar un protocolo de 50 inyecciones secuenciales (aproximadamente 1 h) con viales con agua del grifo para eliminar la memoria residual de las muestras de agua enriquecida en ^2H , lo que se traduce a un menor tiempo comparado con otros analizadores laser.

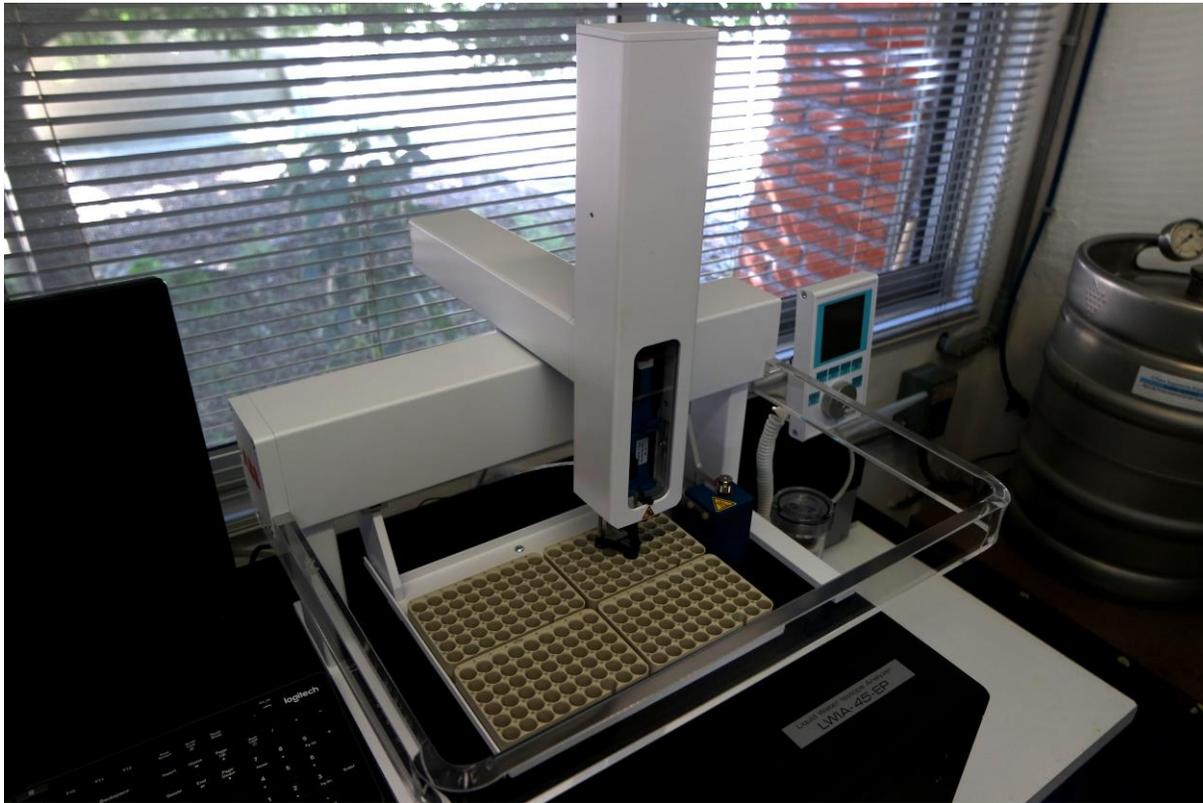


Figura 66 Brazo Robótico de inyección Instalado, configurado y programado en el laboratorio de espectrometría de masas del IMTA

La capacidad del analizador laser LGR es suficiente como para analizar lotes completos de muestras de agua antes y después del proceso de electrólisis en la TEU, todo esto en menos de 48 h, teniendo una respuesta casi inmediata sobre el rendimiento del enriquecimiento electrolítico de la TEU. Todos los resultados de deuterio basados en láser (^2H VSMOW-SLAP) se deben procesar y reportar con relación relativa al estándar VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), además que deben ser procesados con la última versión del software LIMS para láseres. Los datos de los valores de δ se transforman en fracciones de masa de deuterio (ppm) aplicando la siguiente formula:

$$D_{ppm} = \frac{\delta^2 HVSMOW - SLAP + 1000}{\delta^2 HVSMOW - SLAP + 1000 + \frac{1000}{0.00015576}} * 1000000$$

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 93 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

En resumen, el uso del analizador láser LGR de salida de cavidad integrada fuera del eje tiene la cualidad para medir directamente y con precisión las aguas extremadamente enriquecidas en ^2H con valores de hasta 57,000 ‰ (~ 9,000 ppm de deuterio) a una tasa de análisis de 60 muestras/día, facilitando el uso de ^2H como trazador en el medio ambiente y aplicaciones hidrológicas. La incorporación del método de enriquecimiento ^2H basado en láser en las operaciones de tritio de bajo nivel puede facilitar un aumento de 10 a 20% en el rendimiento de la muestra mediante la eliminación de estándares Spykes replicados y laboriosa gravimetría, al proporcionar información inmediata sobre la calidad de los procesos electrolíticos. Los beneficios adicionales del uso del analizador láser LGR incluyen bajo costo, facilidad de uso y la capacidad de alternar rápidamente de muestras de agua con contenido de deuterio ultra enriquecido, a muestras de abundancia natural para realizar análisis convencionales de isótopos estables de aguas ambientales.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 94 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Unidad de enriquecimiento de Tritio ambiental (TEU)

- Rack, compacto alberga los equipos instrumentales y otros elementos necesarios para llevar a cabo la electrólisis de muestras de agua, la neutralización de la alcalinidad y la destilación final / post.
- Celdas electrolíticas, cada una con capacidad de almacenar máximo 250 mililitros de muestra de agua, El ánodo está hecho de acero inoxidable y el cátodo de acero dulce.
- Baño grande de agua grande, con refrigerante, de capacidad aproximada de 80 Litros.
- Controlador térmico utilizado en los procesos de electrólisis, neutralización de alcalinidad y destilación final/post, capaz de calentar hasta 90 °.
- Ámpulas de alimentación continua con capacidad de 2 litros, con válvula variable (para utilizar la botella en modo abierto y cerrado) según la necesidad de tener un bajo o alto Factor de enriquecimiento de tritio / deuterio.
- Baño pequeño de agua refrigerante de 5 Litros utilizada para para acomodar tubos de vidrio para condensar muestras de agua enriquecida a -20°C durante la destilación final / posterior.
- Burbujeadores, cada uno va conectado a una celda electrolítica a través de tubos de silicón para permitir el escape de los gases generados durante el proceso de electrólisis, la salida final de los burbujeadores está conectada al sistema de escape de gases fuera del laboratorio. Estos burbujeadores tampoco permiten la condensación de la humedad

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 95 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

atmosférica dentro de la celda, ya que el aceite de silicio usado en los burbujeadores aísla la celda de la atmósfera activa.

- Sistema de refrigeración, básicamente un chiller capaz de enfriar el refrigerante hasta -30 ° C se utiliza con una bomba para hacer circular el refrigerante a través del baño de enfriamiento. El sistema de calefacción y refrigeración puede mantener la temperatura deseada en los baños de agua

- Sistema de refrigeración criogénica, se utiliza con una bomba para hacer circular el refrigerante a través del baño de enfriamiento.

-Fuente de alimentación (100 V, 15 A), para pasar la corriente deseada (3 a 10 A) a las celdas a una caída de tensión deseada a través de cada celda (siempre mantenida a menos de 3 V, utilizada para suministrar la corriente a las celdas electrolíticas.

-Contador Ah (Ampere-hora) digital, se utiliza para registrar la corriente durante la electrólisis y preestablecer un valor deseado para finalmente detener la electrólisis automáticamente

-voltímetros digitales tipo LED, se utilizan para registrar y monitorear la caída de voltaje a través de cada celda electrolítica (un total de 10 celdas y un medidor digital de corriente de voltios registra la caída de tensión acumulada en todas las celdas para controlar la corriente que pasa a través de la Celda.

- Líneas de CO₂, utilizadas para neutralizar la alcalinidad directamente a través del proceso de burbujeo de CO₂, una para cada celda después de completar el proceso de enriquecimiento.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 96 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

-Cilindro de CO₂, 200 Litros de capacidad a 50 bar de presión, utilizada en el proceso de neutralización de alcalinidad.

-Válvulas de aguja, para conectar a cada línea de CO₂ y a cada celda, sirve para controlar el flujo de CO₂.

-Tubos de teflón, utilizados para conectar las celdas a los tubos de vidrio correspondientes durante la destilación final,

-Tubos de vidrio, recogen la muestra de agua enriquecida condensada de cada celda durante la destilación final.

-Bomba de vacío, utilizada para crear un vacío en las celdas y tubos durante el proceso de destilación final.

-Líneas de vacío, usadas en el proceso de destilación final.

-Calibradores de vacío, se fijan a cada celda para medir el nivel de vacío durante el proceso de destilación final.

-Sensor de temperatura, utilizado para medir la temperatura de los baños de refrigerante grande y pequeño durante diferentes procesos, por medio de un controlador de temperatura digital.

-Conjunto de conectores de cable, utilizados en el proceso de electrólisis para conectar las celdas con la fuente de alimentación de CD en dos códigos de color (cátodo y ánodo por separado).

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 97 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

- Unidad estándar de pre-destilación, que comprende de un generador de refrigeración y conjuntos individuales de unidades de destilación (calentadores, frascos, juntas de vidrio, etc.).

-Taponos de goma de diferentes tamaños, utilizados en los baños de refrigerante grandes y pequeños, celdas y tubos para reducir la pérdida de refrigerante y de la muestra, respectivamente

- Válvula doble de Latón, utilizada para cambiar entre los modos de calefacción y refrigeración de los baños de refrigerante.

-Regulador de temperatura del termopar, exhibe en el display la temperatura en centígrados del baño de refrigerante grande.

Prueba de tres celdas electrolíticas y entrega de los volúmenes enriquecidos, para evaluación del factor de enriquecimiento electrolítico.

Proceso de electrolisis

El proceso de electrólisis a baja temperatura da como resultado que el tritio y el deuterio se concentren selectivamente dentro del agua residual que queda en la celda de electrólisis.

La electrólisis de muestras de agua se lleva a cabo casi a temperaturas de congelación con el fin de maximizar la discriminación de isótopos y pasando una corriente desde el cátodo al ánodo a través de la muestra de agua que contiene el electrolito. Los gases O₂ y H₂ resultantes (mezcla explosiva) se ventilan con seguridad afuera a una campana

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 98 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

extractora. Al final de la electrólisis, el tritio y el deuterio se concentraron por factores de 20-90 o más, dependiendo de los volúmenes inicial y final.

se realizaron pruebas de operación a 3 celdas electrolíticas, para ello se realizó el siguiente procedimiento.

se realizó el pesaje de las celdas electrolíticas vacías, dando como resultado 179 gramos, después se agregaron 250 ml de agua en un ampulla de vidrio con capacidad de 2litros de agua, se preparó el electrolito, agregando 0.75 gramos de peróxido de sodio en el fondo del ánodo de la celda, se agregó un poco de agua del ampulla de vidrio y se agito durante 20 minutos, se procedió a colocar el cátodo de las celdas y se colocaron en el baño de agua grande.

Proceso de neutralización de alcalinidad

Este proceso consiste en hacer pasar por la celda gas CO₂, para realizar la neutralización de la muestra de agua, se debe insertar la línea de gas al interior de la celda electrolítica, y ajustar la salida de gas en función con el número de burbujas que se observen en los burbujeadores de vidrio, para ello se debe regular la línea de CO₂ con las perillas de apertura del gas.

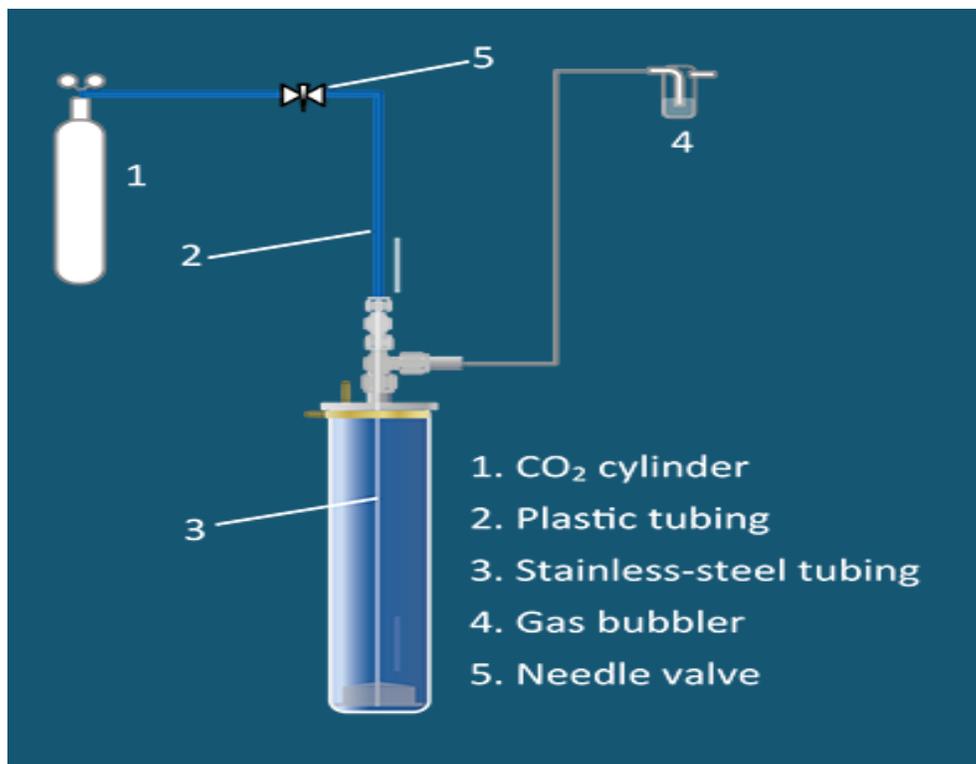


Figura 67 Proceso de neutralización de alcalinidad

Proceso de destilación final

Una vez que se ha completado la concentración electrolítica, la muestra de agua necesita ser recuperada cuantitativamente de la celda para el recuento de centelleo líquido, y destilada para eliminar todos los electrolitos añadidos que podrían causar interferencia.

La etapa final de destilación requiere que las muestras de agua se recuperen criogénicamente calentando la muestra y usando una trampa fría criogénica con un vacío suave para bombear toda el agua y el vapor de la celda de enriquecimiento. La recuperación cuantitativa del agua es esencial para determinar adecuadamente los factores de enriquecimiento de tritio y deuterio.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 100 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

1: Pretratamiento de muestras de agua.

Como requisito previo antes de seguir procesando, las muestras de agua se deben destilar (destilación primaria) en el laboratorio para eliminar todas las sales disueltas. Esto es para asegurar que los diversos iones que se encuentran naturalmente en el agua (Cl⁻, SO₄⁻⁻, CO₃⁻⁻, Mg ++, Na +, K +, etc.) no interfieran con el proceso de electrólisis y corroan los electrodos de acero suave.

Es importante tener en cuenta que no todas las sales se eliminan a través de la destilación primaria. Las sales volátiles o gases solubles pueden destilarse con el agua. Para la mayoría de las aguas subterráneas es suficiente una destilación. Sin embargo, las muestras fuertemente salinas o geotérmicas pueden necesitar dos pasos de destilación o un tratamiento con carbón activo.

2: La electrólisis de las muestras de agua.

El proceso de electrólisis a baja temperatura hace que el tritio y el deuterio se concentren selectivamente en el agua residual que queda en la celda de electrólisis.

La electrólisis de las muestras de agua se lleva a cabo cerca de temperaturas de congelación para maximizar la discriminación de isótopos y pasando una corriente desde el cátodo al ánodo a través de la muestra de agua que contiene electrolito. Los gases de O₂ y H₂ resultantes (mezcla explosiva) se ventilan de manera segura hacia el exterior a una campana extractora. Al final de la electrólisis, el tritio y el deuterio se han concentrado en factores de 20 a 90 o más, según los volúmenes de inicio y final.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 
Página 101 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

3: Neutralización de la alcalinidad

Neutralización de la alcalinidad en muestra enriquecida con burbujeo de CO₂.

4: La destilación final.

Una vez que se ha completado la concentración electrolítica, la muestra de agua debe recuperarse cuantitativamente de la celda para el recuento de centelleo líquido y destilarse para eliminar todos los electrolitos agregados que podrían causar interferencia.

La etapa de destilación final requiere que las muestras de agua se recuperen criogénicamente calentando la muestra y utilizando una trampa de frío criogénico con un vacío suave para bombear todo el agua y el vapor fuera de la celda de enriquecimiento. La recuperación cuantitativa del agua es esencial para determinar correctamente los factores de enriquecimiento de tritio y deuterio.

5: Limpieza de las celdas

Una vez que las muestras de agua se han destilado de las células para el recuento de centelleo líquido, las células deben limpiarse antes de que puedan volver a usarse.

La etapa de neutralización de CO₂ da como resultado la formación de sales de bicarbonato de sodio en la parte inferior de las células de enriquecimiento. Esta es una sal soluble en agua que se puede eliminar fácilmente con un lavado suave con agua caliente, teniendo cuidado de evitar dañar el revestimiento de la celda negra.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 
Página 102 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

7.- CAPACITACIÓN

Capacitación del personal en laboratorios del extranjero

Se recibió capacitación por parte del Organismo Internacional de Energía Atómica para la aplicación y operación del laboratorio de hidrología isotópica, así como también para el desarrollo de proyectos de estudio internos y externos en el Instituto. Este tipo de capacitaciones otorgadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica han contribuido a que el laboratorio de hidrología isotópica este a la vanguardia de estos tiempos modernos.

Los temas relevantes otorgados en la capacitación se describen a continuación:

En el curso “Desarrollo en el análisis de tritio para aplicaciones hidrológicas” se vieron conceptos básicos de química e isótopos y sus aplicaciones, etapas para la determinación de electrólisis como son: Destilación primaria, preparación del electrolito, enriquecimiento electrolítico, neutralización, posdestilación y medición de centelleo líquido; se realizaron visitas a laboratorios de Hidrología Isotópica del Organismos Internacional de Energía Atómica como fueron: Tritio ambiental, gases nobles, isótopos estables, contadores láser y contadores de centelleo líquido.

En la capacitación también se hicieron demostraciones para la determinación de tritio ambiental en laboratorio en cada una de sus etapas como son: Destilación primaria, preparación del electrolito, enriquecimiento electrolítico, neutralización, posdestilación y medición de centelleo líquido. También se conoció y trabajo con la unidad de electrólisis clásica y la nueva unidad de enriquecimiento electrolítica, con la finalidad de ampliar más el conocimiento de los procesamientos para la determinación de tritio ambiental. Se hicieron varias observaciones de cuidados en cada etapa del análisis, así como también el mantenimiento de la limpieza de las dos unidades de enriquecimiento electrolítico. Se

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 103 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

conoció y puso en operación los equipos de contador de centelleo líquido de diferentes tecnologías como son: El contador de centelleo líquido Quantulus 1220, contador de centelleo líquido Quantulus GCT 6220. Se conoció y manejo el programa TRIMS que tiene la finalidad de tener un control de datos y control de calidad en los resultados de la medición de la metodología de tritio ambiental.

En la visita “Laboratorios en Seibersdorf” se conocieron el laboratorio de nutrición de cultivos, laboratorio de alimentos y protección ambiental, laboratorio de ciencia e instrumentación nuclear y laboratorio de medio ambiente terrestre; todos equipados con tecnología de vanguardia.

Curso Nacional de Isótopos estables en el estudio de las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas

En el Instituto se llevó a cabo el curso nacional de isótopos aplicados al estudio de las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas por un experto del OIEA, en el Centro de Capacitación, con la participación de personal técnico de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) y del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS), además de personal del mismo Instituto.



COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA

SUBCOORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

LABORATORIO DE HIDROLOGÍA ISOTÓPICA

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
 Laboratorio de hidrología isotópica
 Paseo Cuauhnáhuac 8532
 Col. Progreso
 62550 Jiutepec, Morelos
 México
 Teléfono: 52 (777) 329 3600 Ext. 805
 Fax: 52 (777) 329 3600
 Correo electrónico: lghita@taloc.imta
 Página web: www.gob.mx/imta

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
 Hidrología Isotópica
 PO Box 100, 1400 Vienna, Austria
 Teléfono: (+43-1) 2600-21734
 Fax: (+43-1) 2600-7
 Página web: www.iaea.org

CURSO NACIONAL DE APLICACIÓN DE ISÓTOPOS EN EL ESTUDIO DE LAS AGUAS ATMOSFÉRICAS, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS

Isotopía de la lluvia

IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

IAEA International Atomic Energy Agency

Figura 68 Tríptico del Curso Nacional.



Figura 69 Participantes del Curso Nacional.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 
Página 105 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

8.- CONCLUSIONES

Se realizó la instalación de 15 colectores de agua de lluvia, complementarios a la Red Nacional de Monitoreo de la Isotopía Estable de la Precipitación Pluvial, en diversos sitios de los observatorios meteorológicos del servicio Nacional Meteorológico y en las estaciones pluviométricas del Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Se encuentra en operación la Red Nacional de Monitoreo de la Isotopía Estable de la Precipitación Pluvial integrada por 28 estaciones colectoras de lluvia, con cobertura de las provincias fisiográficas, zonas de acuíferos transfronterizos, zonas con hidrocarburos en yacimientos no convencionales y cuencas con estrés hídrico.

Se obtuvieron resultados de los análisis iniciales de las composiciones isotópicas y químicas de la precipitación pluvial de las zonas integrantes de la RENIP.

Se implementaron metodologías de reciente desarrollo en medición de isótopos estables por espectroscopía láser y en tritio ambiental por enriquecimiento electrolítico del deuterio.

Se capacitó al personal en el laboratorio el laboratorio de Hidrología Isotópica del Organismo Internacional de Energía Atómica, en la operación y procesamiento de datos de la Unidad de enriquecimiento de Tritio ambiental.

Se llevó a cabo en el Instituto el Curso Nacional de Aplicación de Isótopos en el Estudio de las Aguas Atmosféricas, Superficiales y Subterráneas, con la participación de personal técnico del Servicio Meteorológico Nacional, Comité Técnico de Aguas Subterráneas, Sistema de Aguas de la Ciudad de México y del mismo Instituto, además de personal académico de la Universidad Nacional Autónoma de México.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 106 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

9.- BIBLIOGRAFÍA

Clark, I.D., y Fritz, P., 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, N.Y., U.S.A., 63–108 y 287-290.

CONAGUA, 2018. Comisión Nacional del Agua, “Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia”, <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>.

Craig, H., 1961. Standard for Reporting Concentrations of Deuterium and Oxygen-18 in Natural Waters, *Science* 133, 1833.

Horita, J., 2005. Saline Waters, in Aggarwal, P.K., Gat, J.R., and Froehlich, K.F.O. eds., *Isotopes in the Water Cycle*, Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag.

IAEA, 2005. *Isotopes in the water cycle, past, present and future of a developing science*.

INEGI, 2018. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Clasificación fisiográfica del Territorio Nacional”.

Mazor, E., 1991. - *Applied chemical and isotopic groundwater hydrology* - Open Univ. Press.

Méndez, J., Návar J. y González V., 2007. “Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México”, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, No. 65, pp. 38-55.

OIEA, Organismo Internacional de Energía Atómica, 2016. “Guía de muestreo de la precipitación pluvial”, GNIP.

 	AMPLIACIÓN Y OPERACIÓN DE LA RED NACIONAL DE LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y QUÍMICA DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL (RENIP)	
Página 107 de 107	México, 2018	Clave: F.CO.2.04.01

Page, J., 1929. "Climate of Mexico", Monthly Weather Review, United States Department of Agriculture.