Gestión de Recursos Hídricos mediante Hidrología Isotópica

XXXI Jornadas Nacionales sobre Energía y Educación

Luis Eduardo TORO-ESPITIA
Sección de Hidrología Isotópica, NAPC, OIEA

CONTENIDO PRESENTACION

1 Datos breves sobre los recursos hídricos

2 Algunos conceptos básicos sobre hidrología isotópica

3 Isótopos estables: Deuterio y oxígeno-18

4 Datación de aguas subterráneas: consideraciones básicas

5 Tritio: Datación aguas modernas

6 Radiocarbono: Datación aguas antiguas

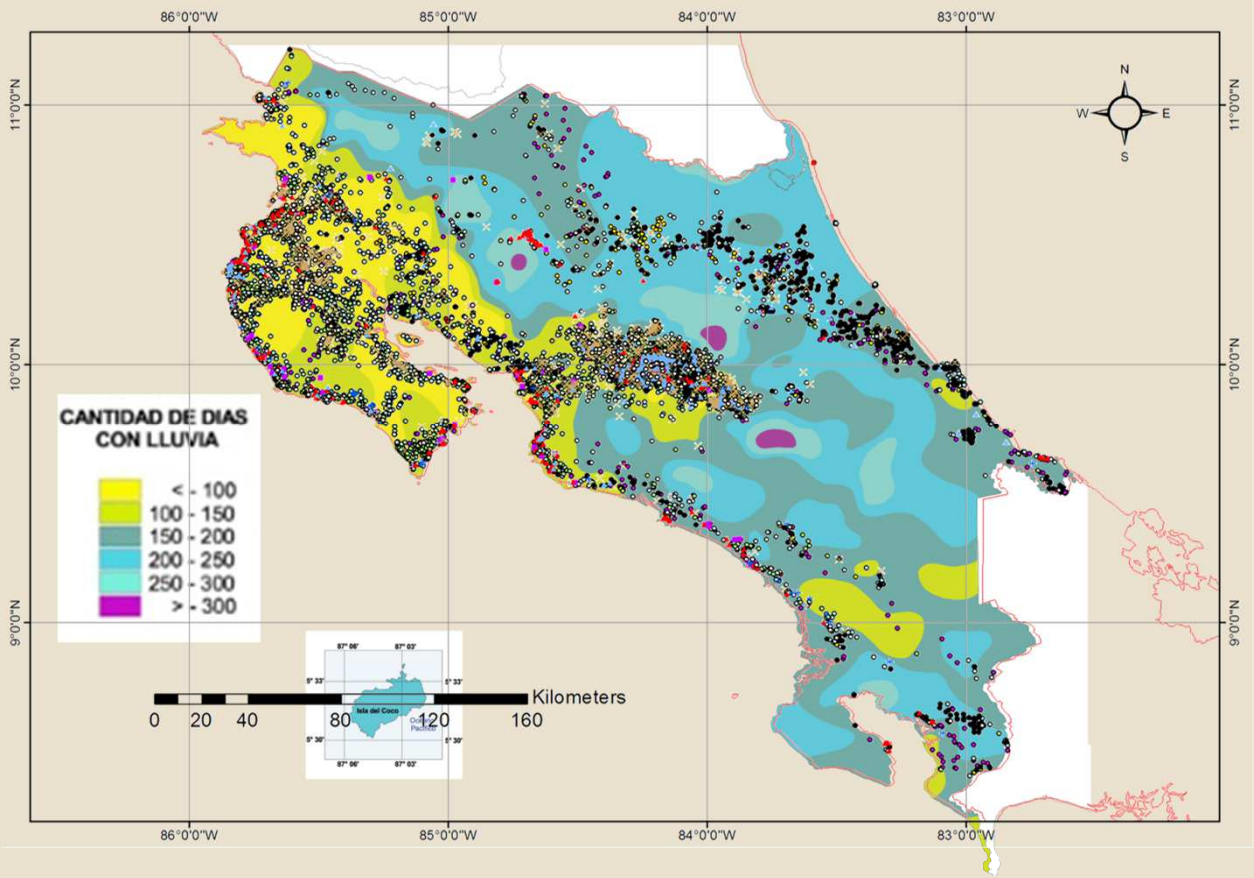
7 Resumen

1. ALGUNOS DATOS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

DISPONIBILIDAD DE LOS RECURSOS HIDRICOS

Los asentamientos humanos y la disponibilidad de recursos hídricos están inequitativamente distribuidos en el mundo. En muchas ocasiones, las mayores demandas de agua aparecen en las regiones con menos oferta hídrica.

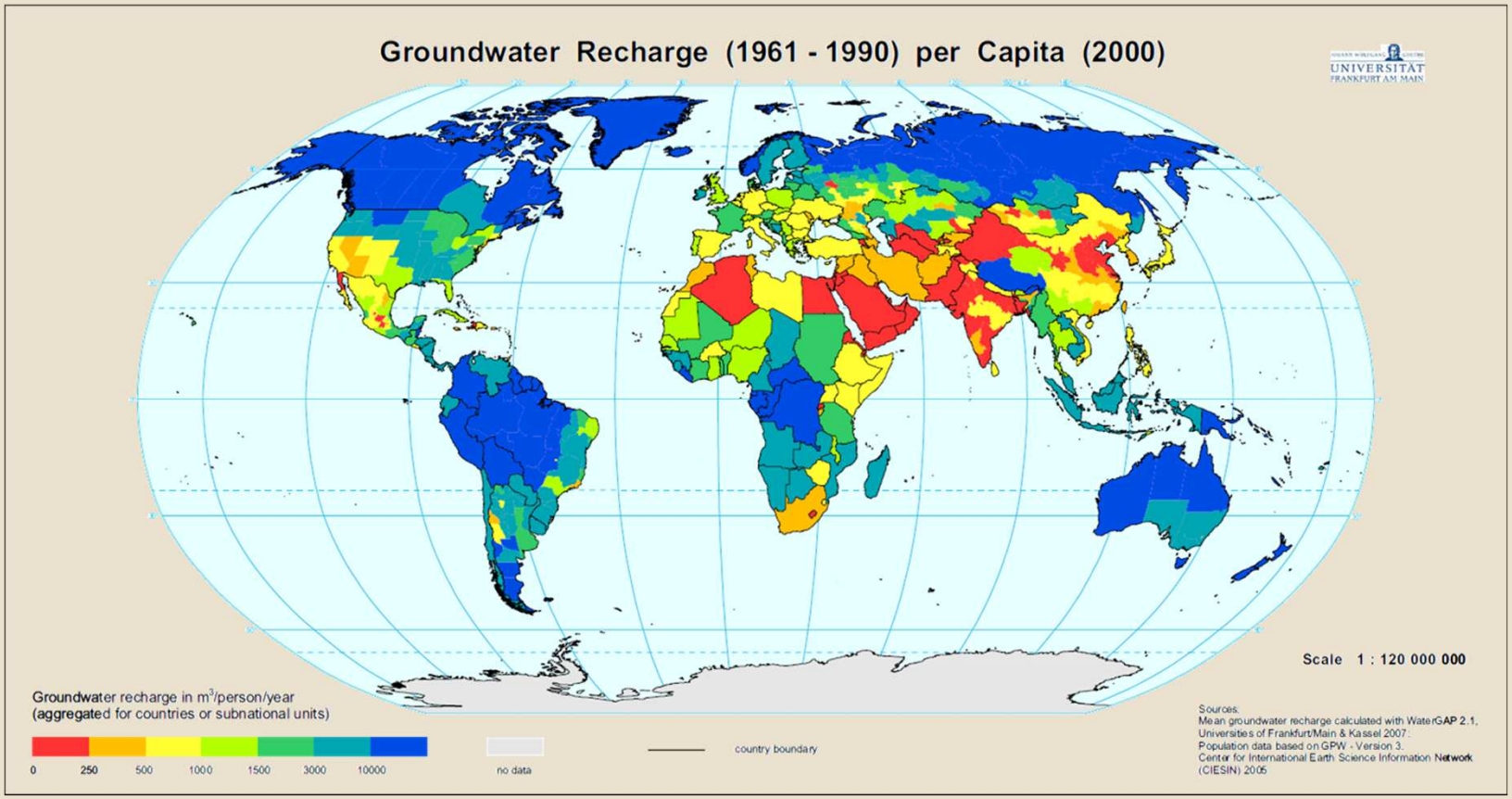
Por ejemplo, en **Costa Rica**, las regiones con menor precipitación coinciden con las zonas con mayor desarrollo urbano y turístico.



Datos tomados del SENARA.

DISPONIBILIDAD DE LOS RECURSOS HIDRICOS

Debido al acelerado incremento de la población mundial, se estima que actualmente alrededor de una tercera parte de la humanidad vive en regiones con déficit hídrico. **(Oki y Kanae, 2006)**

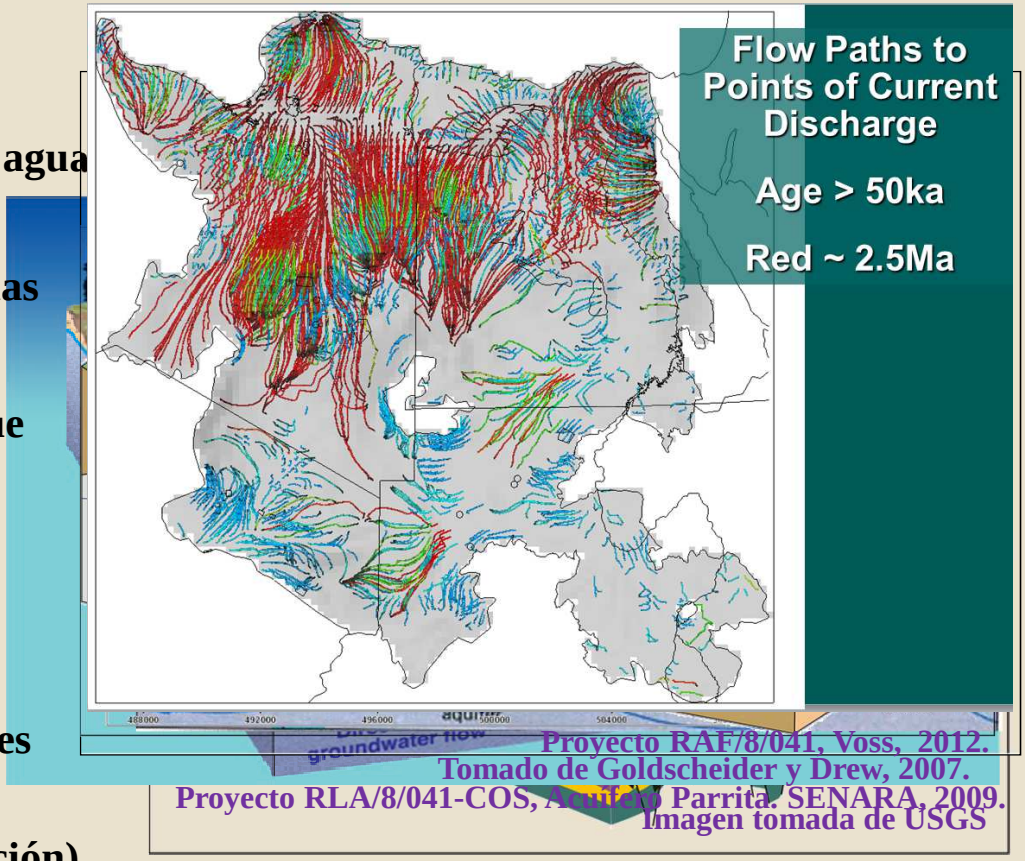


Tomado de BGR y UNESCO, 2008.

DISPONIBILIDAD DE LOS RECURSOS HIDRICOS

No es posible hacer un uso óptimo de ningún acuífero si no se comprende su comportamiento.

- **Determinar los mecanismos de recarga**
- **Determinar conexiones hidráulicas entre acuíferos**
- **Determinar conexiones agua superficial – agua subterránea**
- **Estimar tiempos medios de residencia de las aguas subterráneas**
- **Conocer los procesos químicos y físicos que controlan la calidad del agua, incluyendo fenómenos de contaminación/depuración**
- **Delimitar principales zonas de recarga y descarga (patrón de flujo)**
- **Estimar propiedades hidráulicas y balances hídricos**
- **Desarrollar modelos matemáticos (predicción)**



Proyecto RAF/8/041, Voss, 2012.
Tomado de Goldscheider y Drew, 2007.
Proyecto RLA/8/041-COS, Acuífero Parrita. SENARA, 2009.
Imagen tomada de USGS

Imagen tomada de IMTA

Organismo Internacional de Energía Atómica - OIEA

El OIEA promueve la tecnología nuclear en los casos donde su aplicación, en la búsqueda de soluciones a las necesidades humanas, representa una ventaja en comparación a otras herramientas.

Laboratorios en Mónaco

Sede Principal, Vienna

Laboratorios en Seibersdorf

2. ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LAS TÉCNICAS ISOTÓPICAS EN HIDROLOGÍA

INTRODUCCIÓN: Complementariedad en los estudios hidrogeológicos

Usualmente las técnicas isotópicas son consideradas como herramientas complementarias en las evaluaciones hidrogeológicas. En la mayoría de casos, antes de utilizar técnicas nucleares es recomendable emplear herramientas de investigación más convencionales.

GEOLOGÍA

HIDRÁULICA DE POZOS

SENSORES REMOTOS

GEOFÍSICA

CLIMATOLOGÍA

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

HIDROQUÍMICA

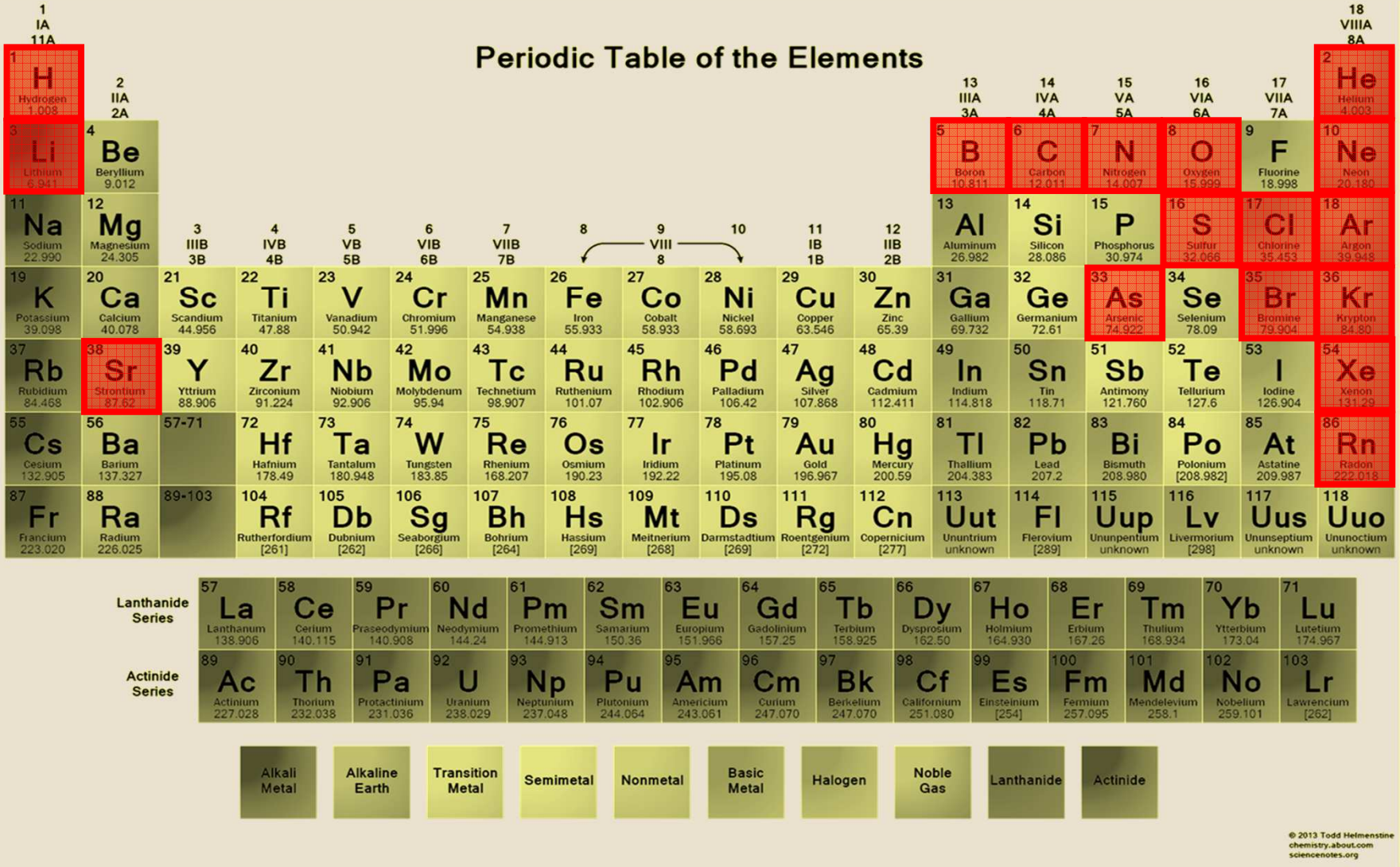
ISOTOPÍA

INTRODUCCIÓN: Trazadores Ambientales vs Trazadores Artificiales

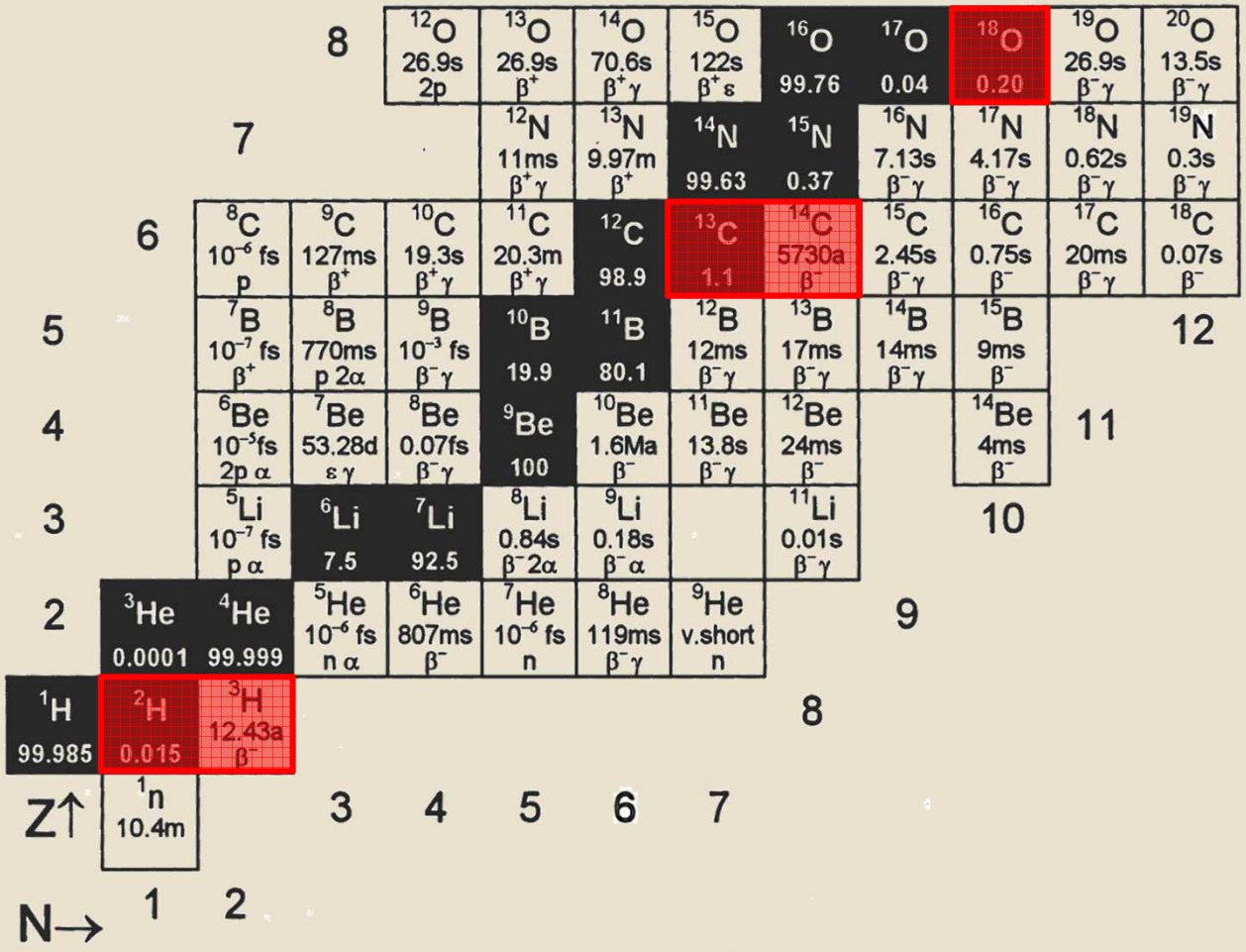
TRAZADORES AMBIENTALES	TRAZADORES ARTIFICIALES
Han sido generados por procesos naturales o han sido incorporados al ciclo del agua como consecuencia de acciones del hombre a escala mundial (pruebas nucleares).	Han sido generados artificialmente y son inyectados de manera puntual e intencionada en el acuífero que se desea estudiar.
Dan una imagen global sobre el funcionamiento de los acuíferos o sobre el problema que se desea resolver.	Empleados para resolver problemas hidrogeológicos muy específicos. Requieren de gran volumen de información hidrológica previa.

El OIEA promueve principalmente el uso de los trazadores ambientales

INTRODUCCIÓN: Principales elementos de la tabla periódica, tomados en cuenta en estudios de hidrología isotópica



INTRODUCCIÓN: Isótopos Estables vs Isótopos Radiactivos



Tomado de Clark y Fritz, 1997

ESTABLE

^{2}H
0.015

← isótopo
← % abundancia natural

RADIACTIVO

^{3}H
12.43 a
β⁻

← isótopo
← edad media

↑ partícula emitida

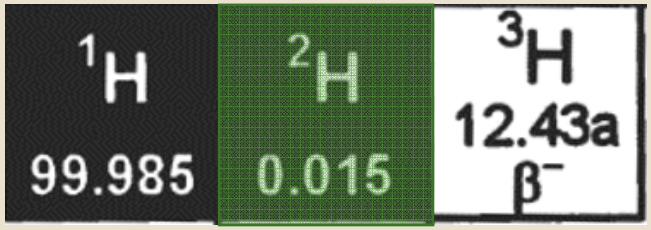
$^{1}H_2{}^{16}O$ $^{1}H_2{}^{18}O$

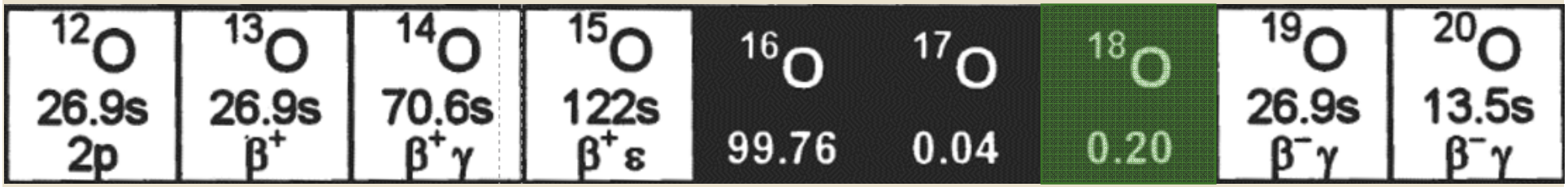
$^{1}H^{2}H^{16}O$ $^{1}H^{2}H^{18}O$

$^{2}H_2{}^{16}O$ $^{2}H_2{}^{18}O$

3. ISÓTOPOS ESTABLES

DEUTERIO Y OXÍGENO-18





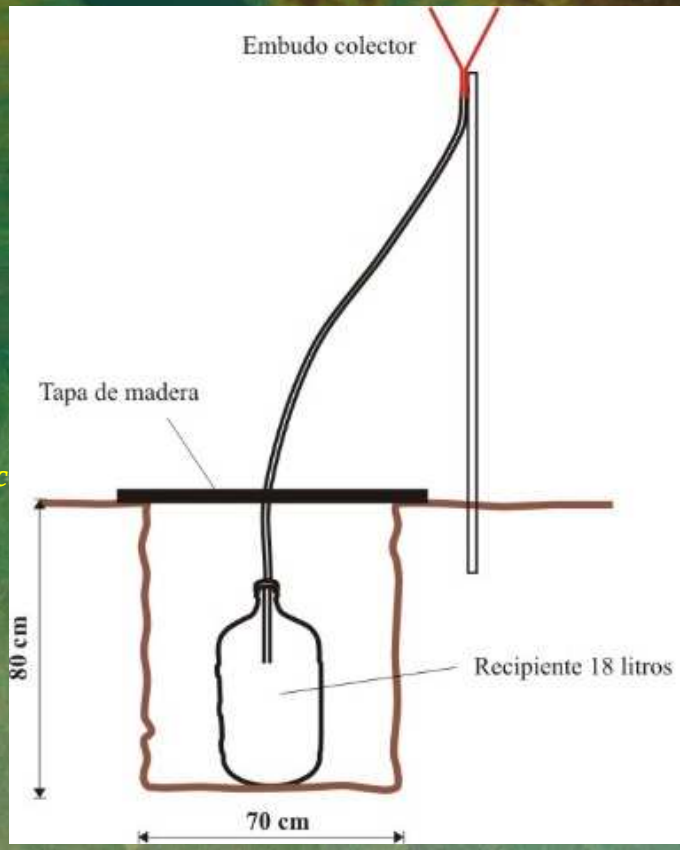
^{2}H, ^{18}O: Ejemplo teórico sobre el empleo de ambos isótopos estables para determinar la procedencia de las aguas subterráneas

Cuenca con un lago en su parte media. Ejemplo que ilustra el uso principal de los isótopos deuterio y oxígeno-18 en estudios hidrológicos: identificar mecanismos de recarga de acuíferos.

Los círculos indican la ubicación de puntos de muestreo.

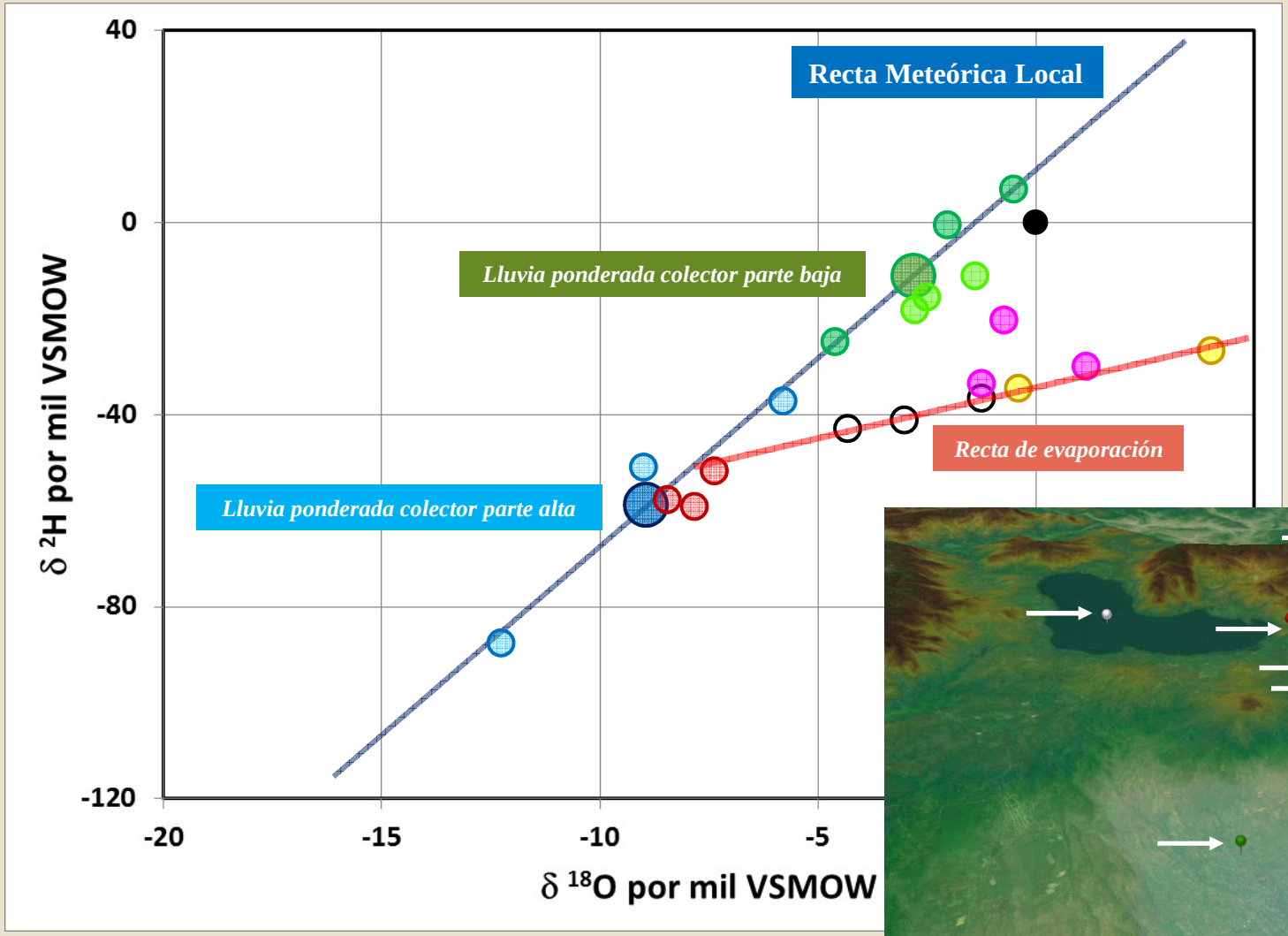
Colector de agua lluvia (2050 msnm)

Colec

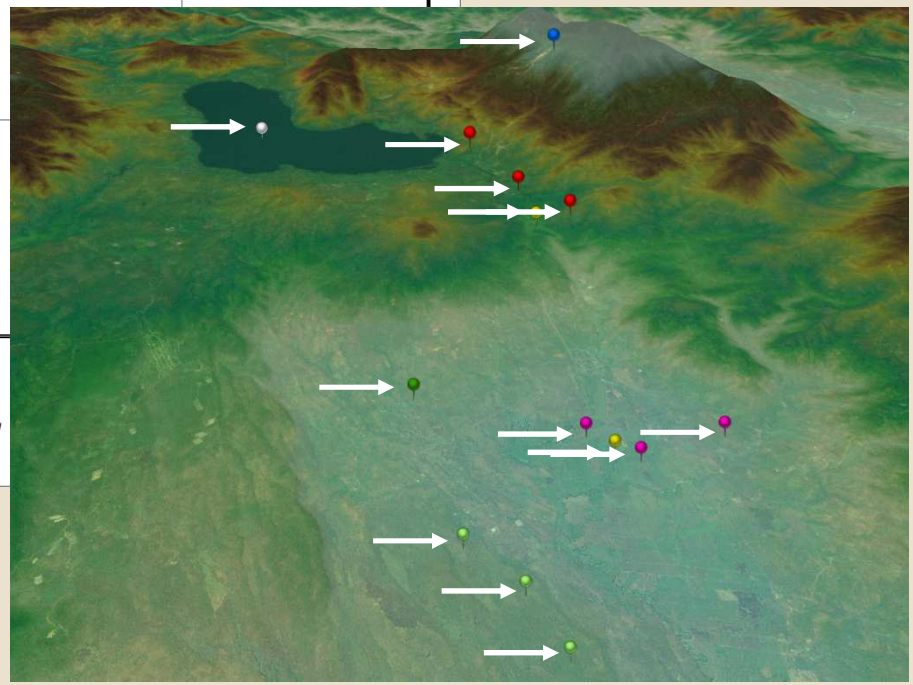


Topografía tomada de la cuenca del Lago Yojoa, Honduras

^{2}H, ^{18}O: Ejemplo teórico sobre el empleo de ambos isótopos estables para determinar la procedencia de las aguas subterráneas



- Mar (referencia)
- Lluvia (2050 msnm)
- Lluvia (110 msnm)
- Pozos Cuenca Media
- Lago
- Río (desagüe lago)
- Pozos Cuenca Baja
- Pozos Cerca Río



INTRODUCCIÓN: Abundancias absolutas vs Abundancias relativas (isótopos estables)

La medición de las relaciones isotópicas absolutas requiere de equipos muy sofisticados y si se hiciera en forma rutinaria supondría grandes retos en la comparación de resultados entre diferentes laboratorios.

Desde el punto de vista instrumental, es más fácil medir concentraciones relativas, lo que a su vez es de mayor interés en los estudios de hidrología isotópica.

$$\delta^{18}O_{muestra} = \frac{\left({}^{18}O/_{16}O\right)_{muestra} - \left({}^{18}O/_{16}O\right)_{referencia}}{\left({}^{18}O/_{16}O\right)_{referencia}}$$

$$\delta^{18}O_{muestra} = \left[\frac{\left({}^{18}O/_{16}O\right)_{muestra}}{\left({}^{18}O/_{16}O\right)_{referencia}} - 1\right] \cdot 1000‰\ VSMOW$$

INTRODUCCIÓN: Materiales de referencia para diferentes isótopos estables

Isotope	*Ratio*	*% natural abundance*	*Reference (abundance ratio)*	*Commonly measured phases*
^{2}H	$^{2}H/^{1}H$	0.015	VSMOW $(1.5575 \cdot 10^{-4})$	H_2O, CH_2O, CH_4, H_2, OH^- minerals
^{3}He	$^{3}He/^{4}He$	0.000138	Atmospheric He $(1.3 \cdot 10^{-6})$	He in water or gas, crustal fluids. basalt
^{6}Li	$^{6}Li/^{7}Li$	7.5	L-SVEC $(8.32 \cdot 10^{-2})$	Saline waters, rocks
^{11}B	$^{11}B/^{10}B$	80.1	NBS 951 (4.04362)	Saline waters, clays, borate, rocks
^{13}C	$^{13}C/^{12}C$	1.11	VPDB $(1.1237 \cdot 10^{-2})$	CO_2, carbonate, DIC, CH_4, organics
^{15}N	$^{15}N/^{14}N$	0.366	AIR N_2 $(3.677 \cdot 10^{-3})$	N_2, NH_4^+, NO_3^-, N-organics
^{18}O	$^{18}O/^{16}O$	0.204	VSMOW $(2.0052 \cdot 10^{-3})$ VPDB $(2.0672 \cdot 10^{-3})$	H_2O, CH_2O, CO_2, sulphates, NO_3^-, carbonates, silicates, OH^- minerals
^{34}S	$^{34}S/^{32}S$	4.21	CDT $(4.5005 \cdot 10^{-2})$	Sulphates, sulphides, H_2S, S-organics
^{37}Cl	$^{37}Cl/^{35}Cl$	24.23	SMOC (0.324)	Saline waters, rocks, evaporites, solvents
^{81}Br	$^{81}Br/^{79}Br$	49.31	SMOB	Developmental for saline waters
^{87}Sr	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$^{87}Sr = 7.0$ $^{86}Sr = 9.86$	Absolute ratio measured	Water, carbonates, sulphates, feldspar

FUNDAMENTOS: Fraccionamiento isotópico (isótopos estables)

Fraccionamiento isotópico ocurre en cualquier reacción termodinámica debido a diferencias en las velocidades de reacción entre las especies moleculares. El resultado es un cambio en la relación isotópica a ambos lados de la reacción.

Cambio de estado

$$H_2O_{fase\ liquida} \leftrightarrow H_2O_{vapor}$$

Transformación química

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$$

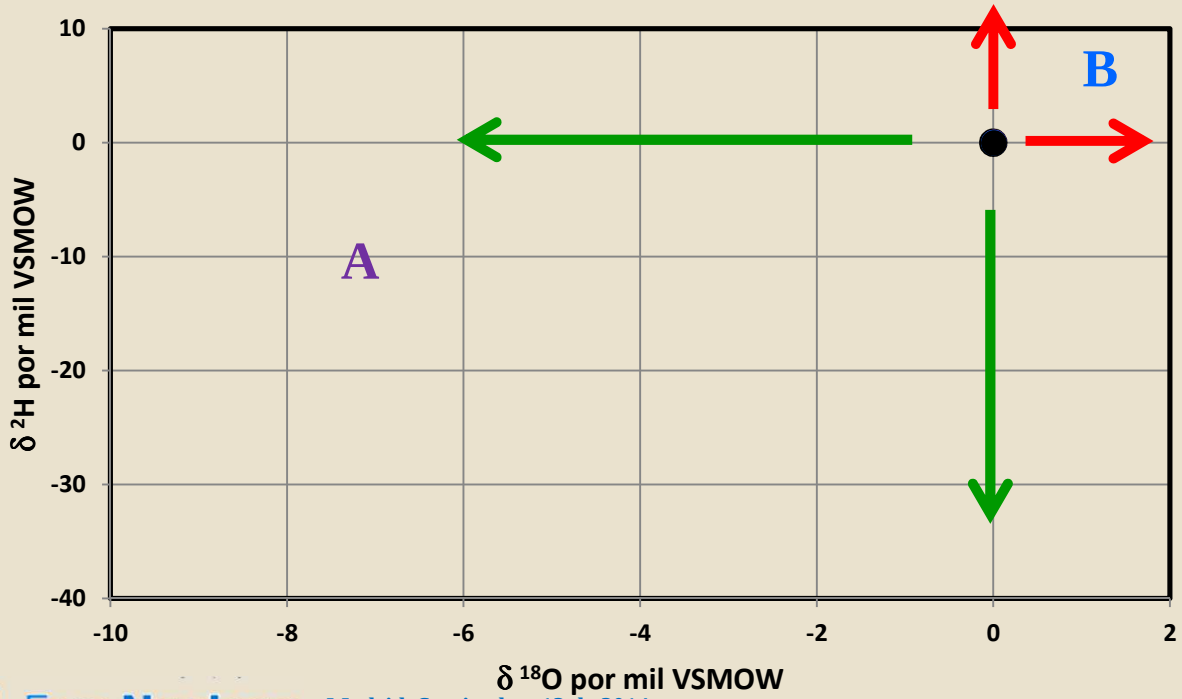
INTRODUCCIÓN: Concentraciones absolutas vs Concentraciones relativas (isótopos estables)

$$\delta^{18}O_{muestra} = \left(\frac{\left({}^{18}O/_{16}O\right)_{muestra}}{\left({}^{18}O/_{16}O\right)_{referencia}} - 1 \right) \cdot 1000‰ \; VSMOW$$

$$\delta^{2}H_{muestra} = \left(\frac{\left({}^{2}H/_{1}H\right)_{muestra}}{\left({}^{2}H/_{1}H\right)_{referencia}} - 1 \right) \cdot 1000‰ \; VSMOW$$

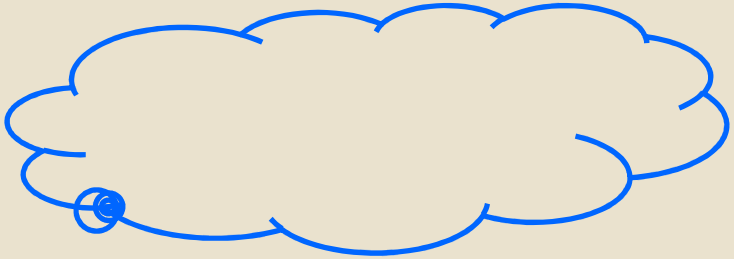
Si las relaciones isotópicas de la muestra son iguales al material referencia, la cantidad □ será igual a 1 y el valor δ será CERO.

VSMOW: Vienna Standard Mean Ocean Water

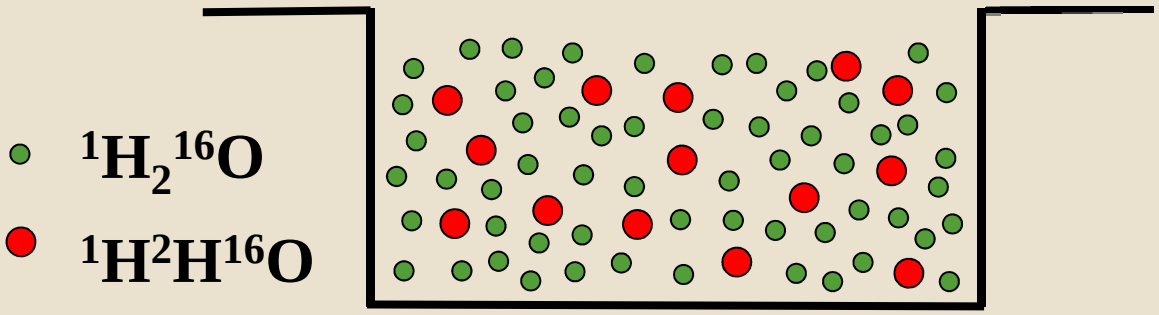


ENRIQUECIMIENTO

FUNDAMENTOS: Fraccionamiento isotópico (isótopos estables)



Fase empobrecida en isótopos pesados



Fase enriquecida en isótopos pesados

FUNDAMENTOS: Variaciones isotópicas en el ciclo hidrológico (isótopos estables)

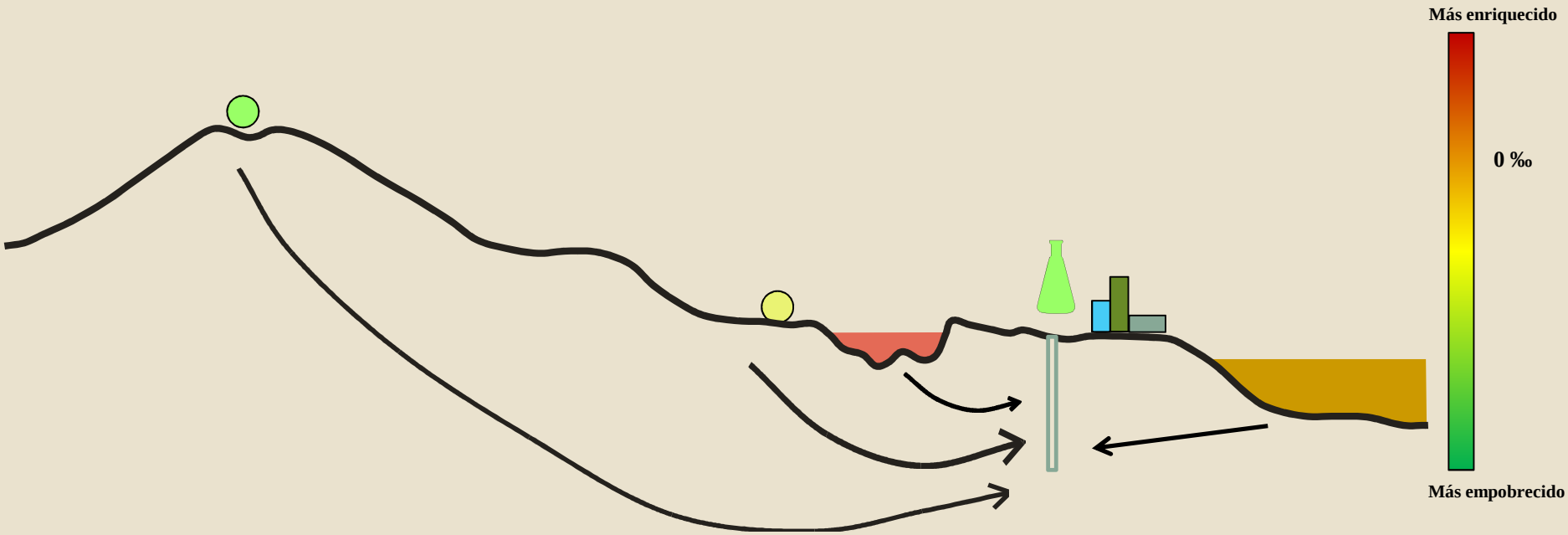
A medida que las precipitaciones

Un cuerpo de agua, un lago por

Al estar sometida continuamente a evaporación, el agua que queda en el lago sufre un enriquecimiento isotópico apreciable.

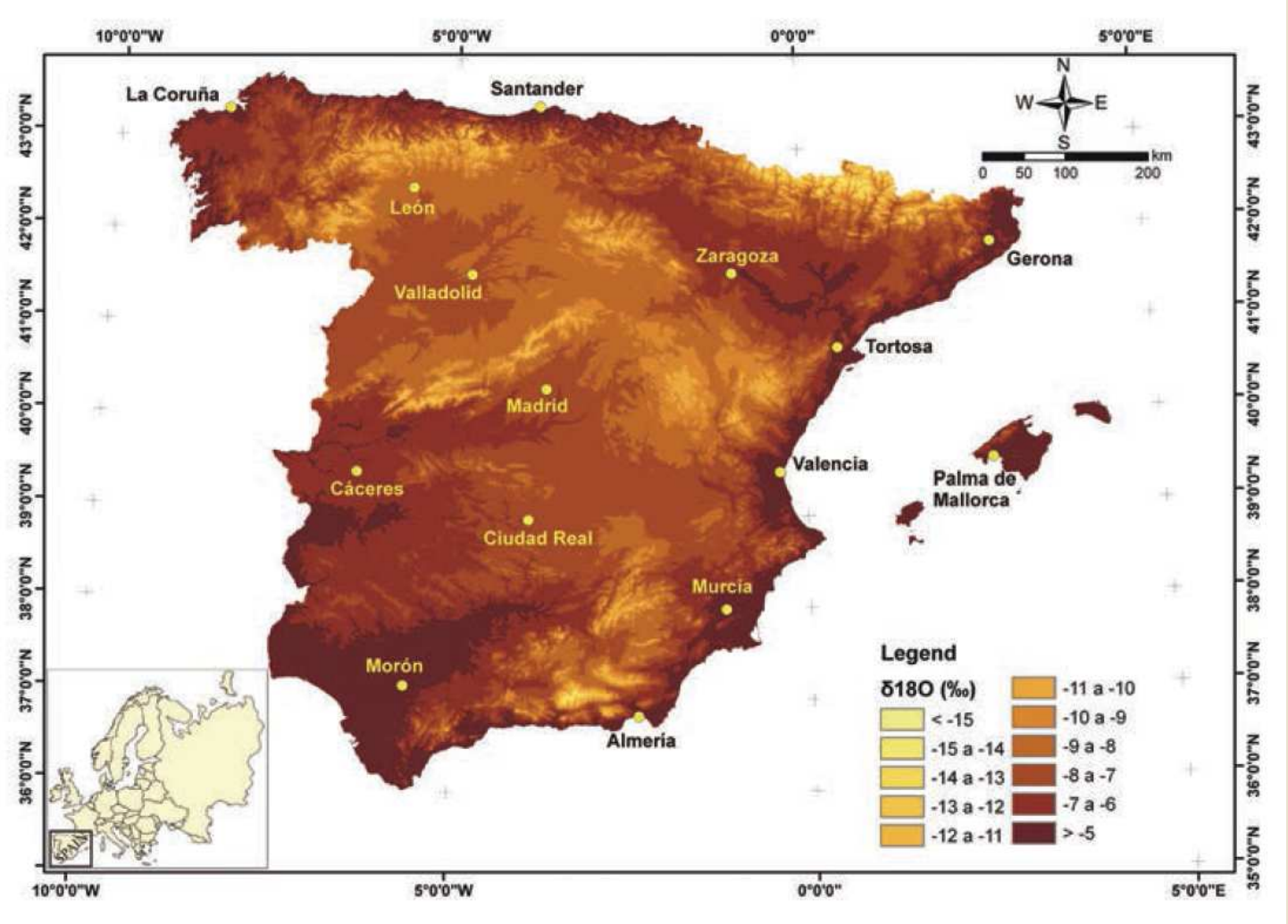
El contenido isotópico de las primeras lluvias son ligeramente empobrecidas respecto al agua de mar.

FUNDAMENTOS: Variaciones isotópicas en el ciclo hidrológico (isótopos estables)



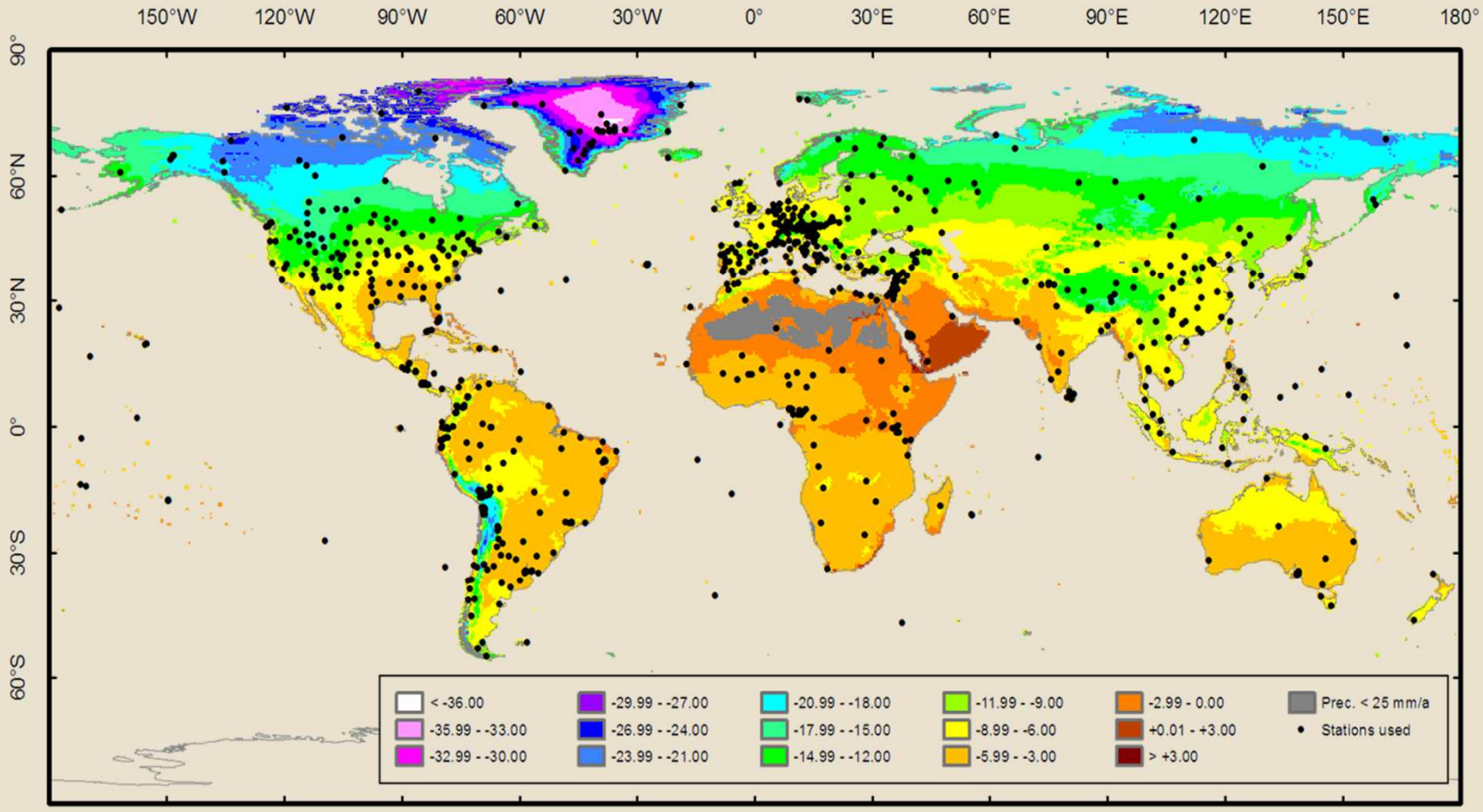
PRECIPITACIÓN: Variación del oxígeno-18 en España. Valores interpolados usando un método desarrollado por el CEDEX y el IGME

Modelo de regresión múltiple, usando dos factores geográficos: la latitud y la altitud.



Tomado de: Rodríguez-Arévalo et al., 2011

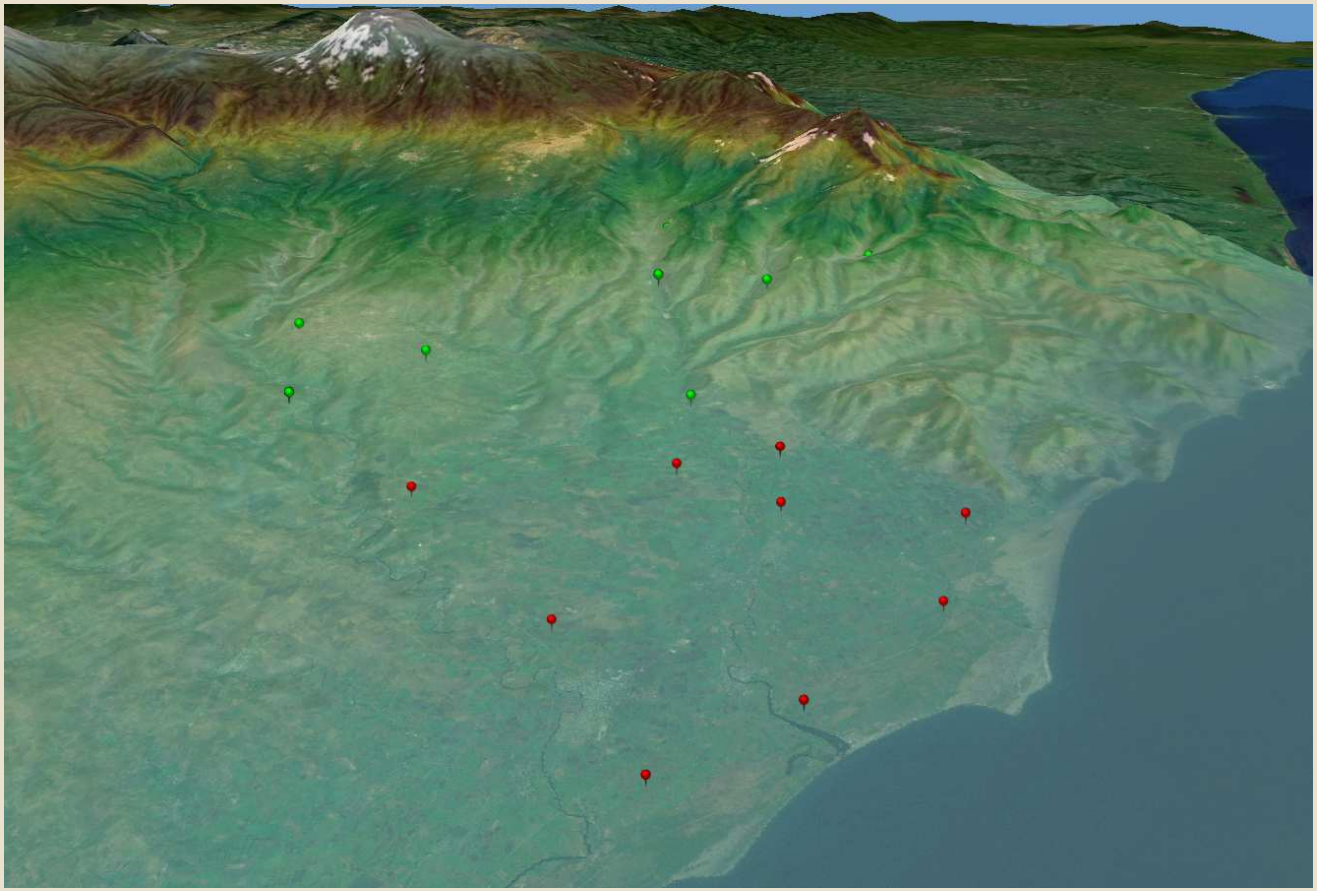
PRECIPITACIÓN: Variación del oxígeno-18 a escala mundial. Datos tomados de la red GNIP del OIEA



Modelo desarrollado por Stefan TERZER, IAEA

EJEMPLO: Cuenca del río Actopan, México. Proyecto MEX/7/010

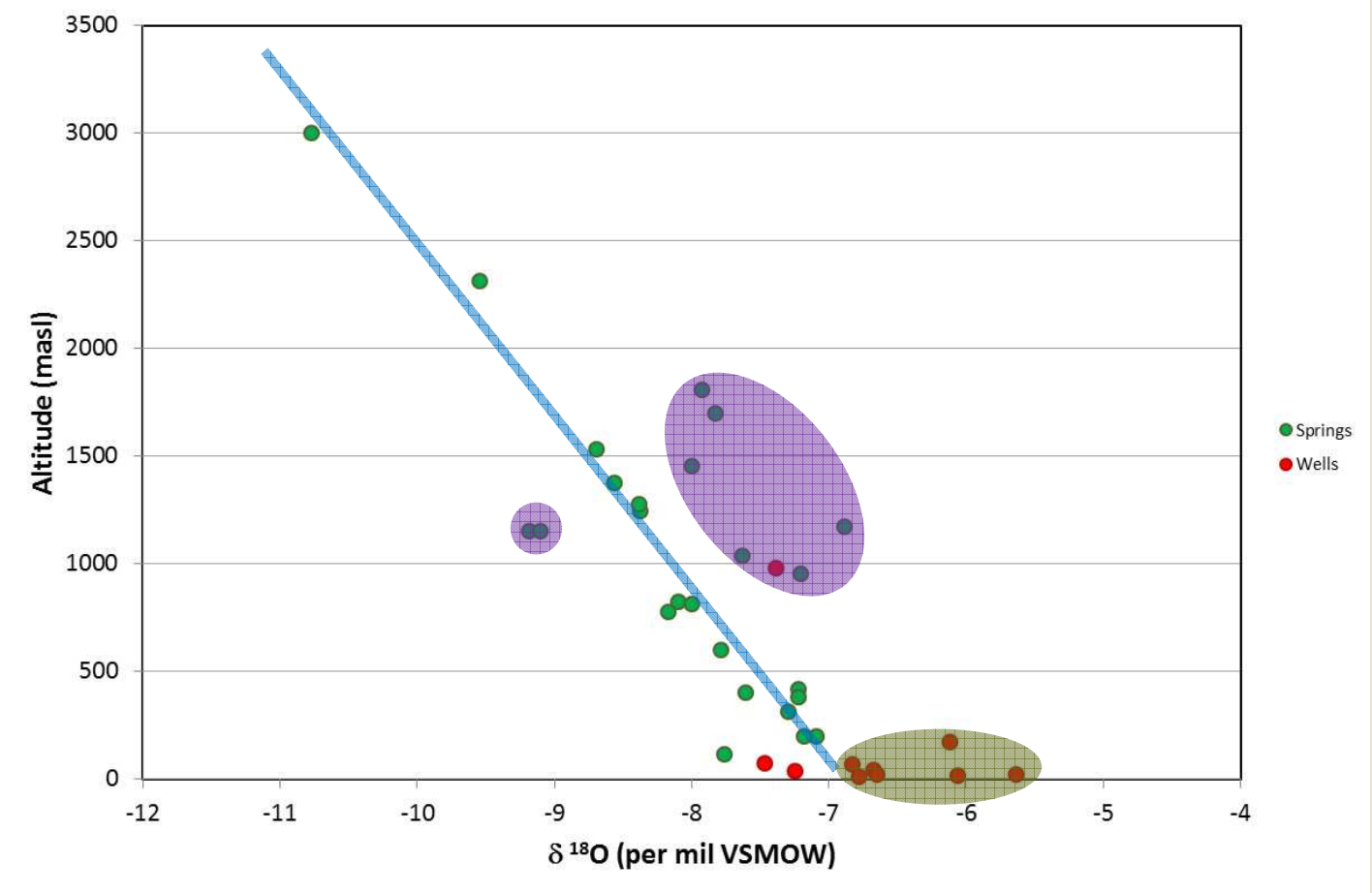
El área de estudio presenta un fuerte contraste topográfico (más de 4000 metros en la diferencia en altitud), lo cual da lugar a variaciones isotópicas importantes.



Contraparte del Proyecto: Universidad Veracruzana

EJEMPLO: Cuenca del río Actopan, México. Proyecto MEX/7/010

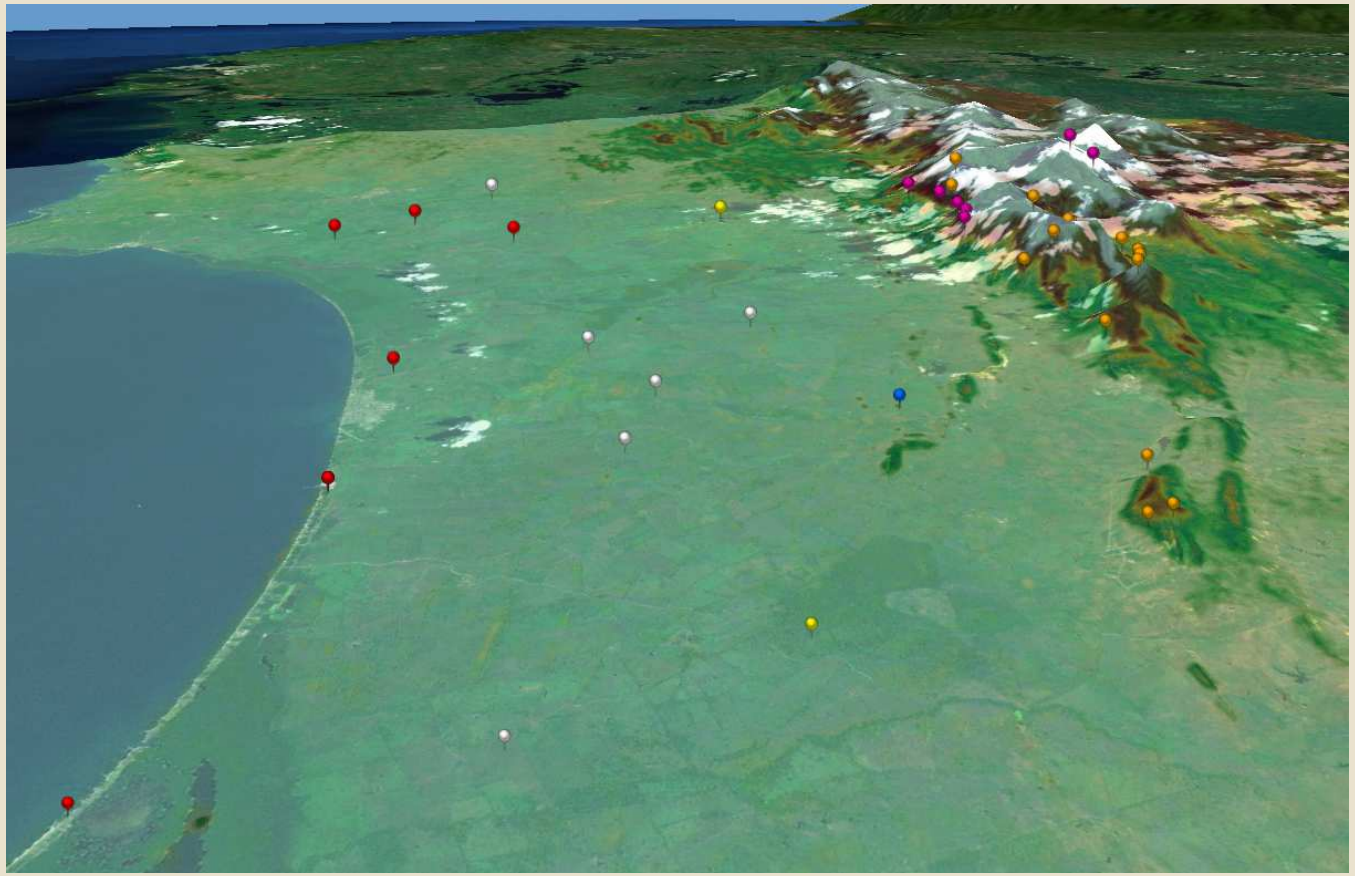
Los manantiales exhiben un gradiente altitudinal para el contenido isotópico. La mayoría de los pozos parece estar recargada con lluvias muy locales.



Algunos manantiales parecen estar alimentados con lluvias que presentan una fuente de humedad diferente.

EJEMPLO: Acuífero Golfo de Morrosquillo, Colombia. Proyecto COL/7/001

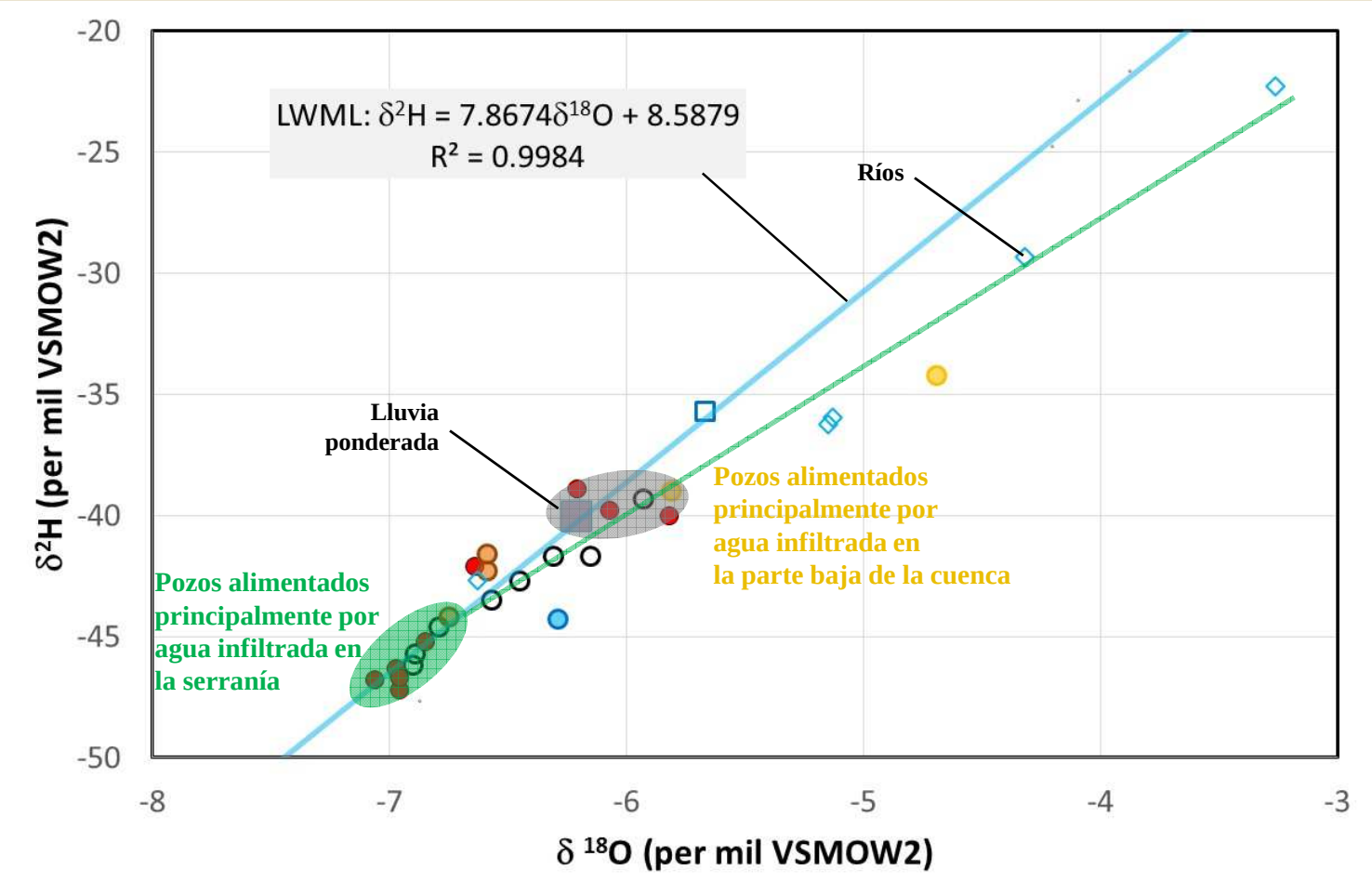
Acuífero costero compuesto por sedimentos aluviales. Presenta varios mecanismos de recarga. El límite este está conformado por una serranía de no más de 400 msnm.



Contraparte del Proyecto: CARSUCRE

EJEMPLO: Acuífero Golfo de Morrosquillo, Colombia. Proyecto COL/7/001

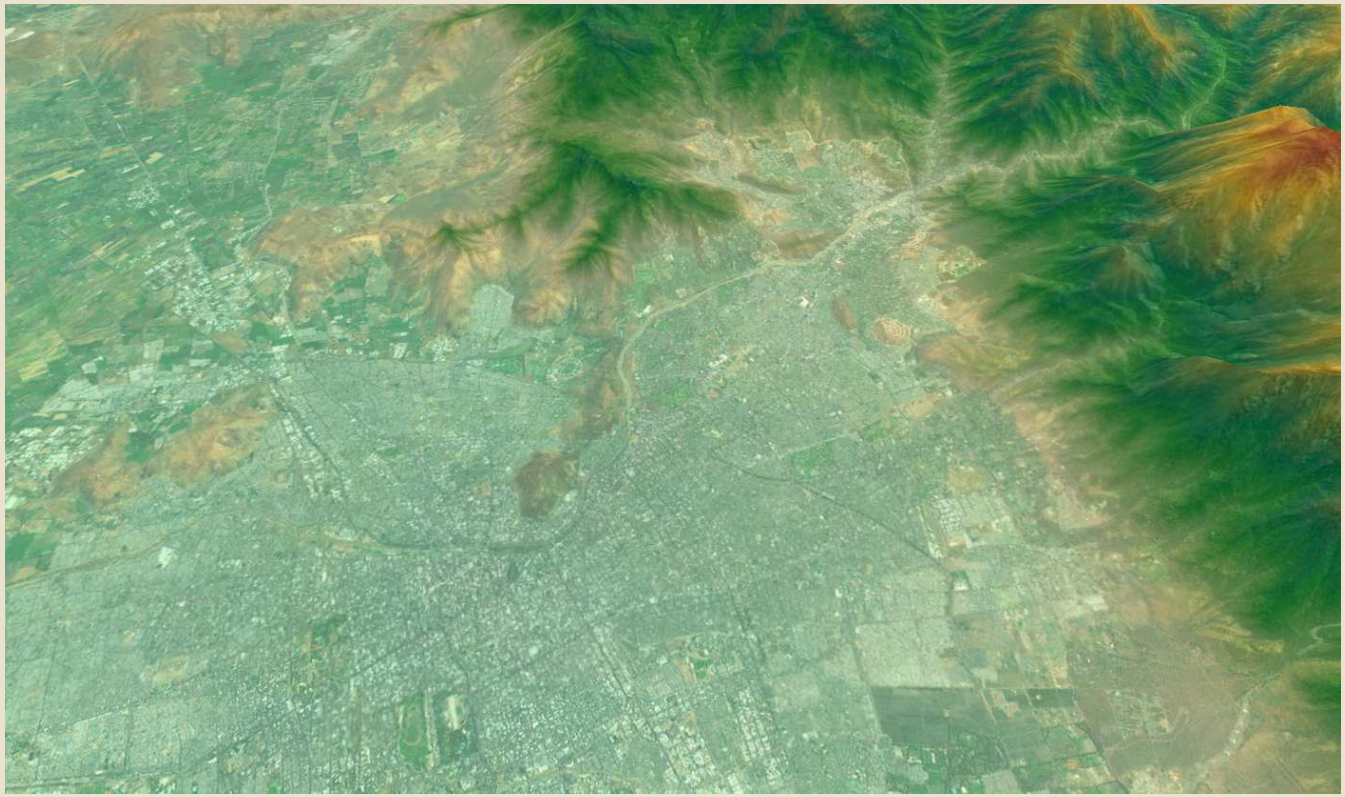
Los pozos más próximos a la costa (círculos rojos) exhiben dos tipos de recarga diferentes en función de la profundidad del pozo.



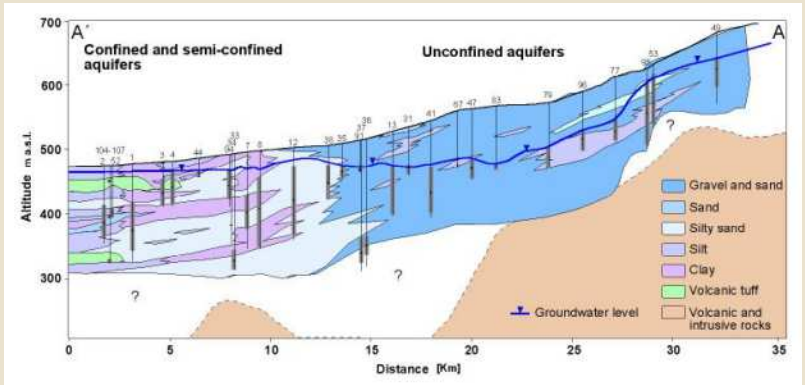
La lluvia ponderada obtenida del colector indica el contenido isotópico del agua que se infiltra en la parte baja de la cuenca.

EJEMPLO: Acuífero de Santiago, Chile. Proyecto RLA/8/031

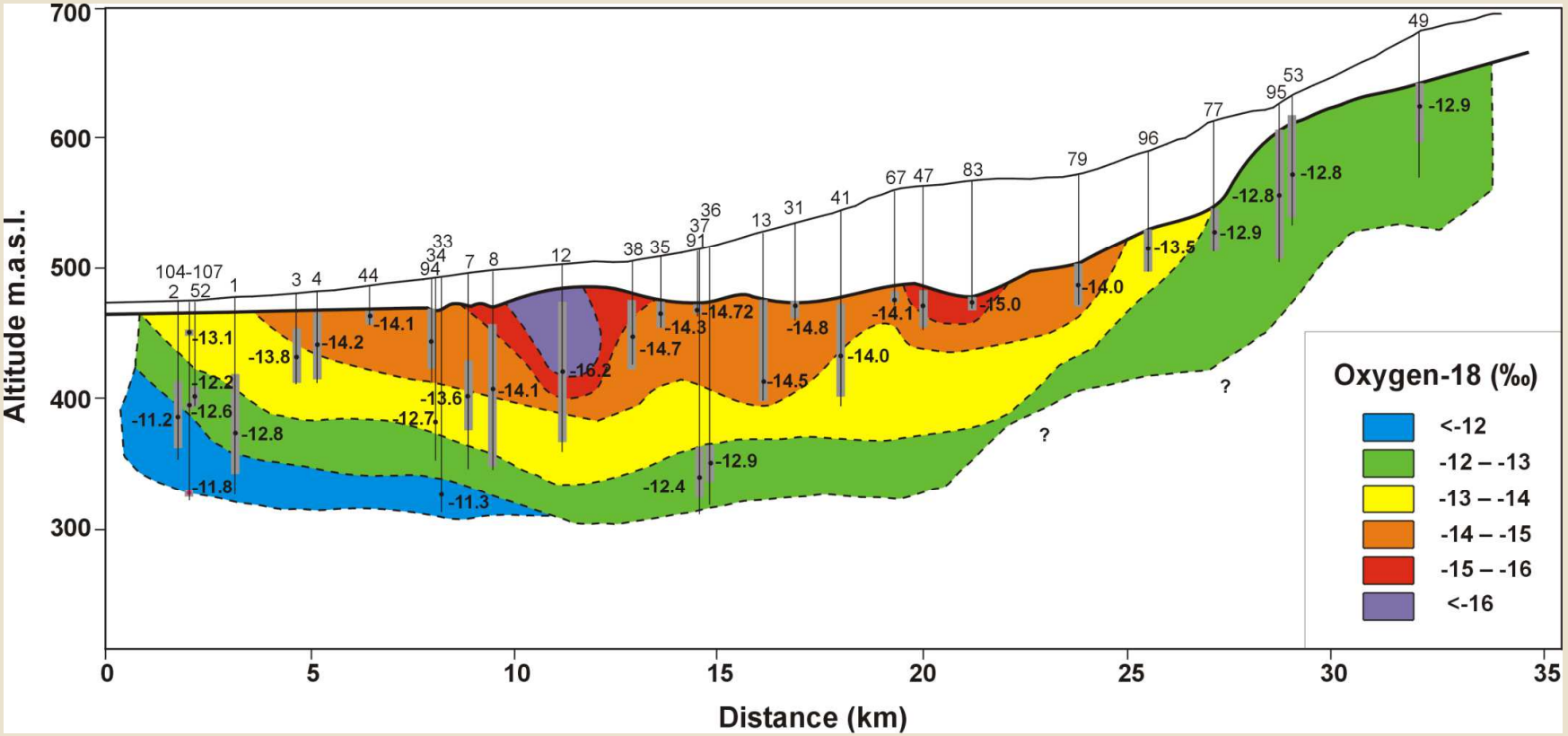
Acuífero aluvial. Presenta varios mecanismos de recarga, incluidos algunos producidos por el urbanismo. La ciudad Santiago está construida en lo que antes era la principal zona de recarga del acuífero.



Contraparte del Proyecto:
DGA, CCHEN, SERNAGEOMIN



EJEMPLO: Acuífero de Santiago, Chile. Proyecto RLA/8/031



Crédito: Iriarte, S. (2003)

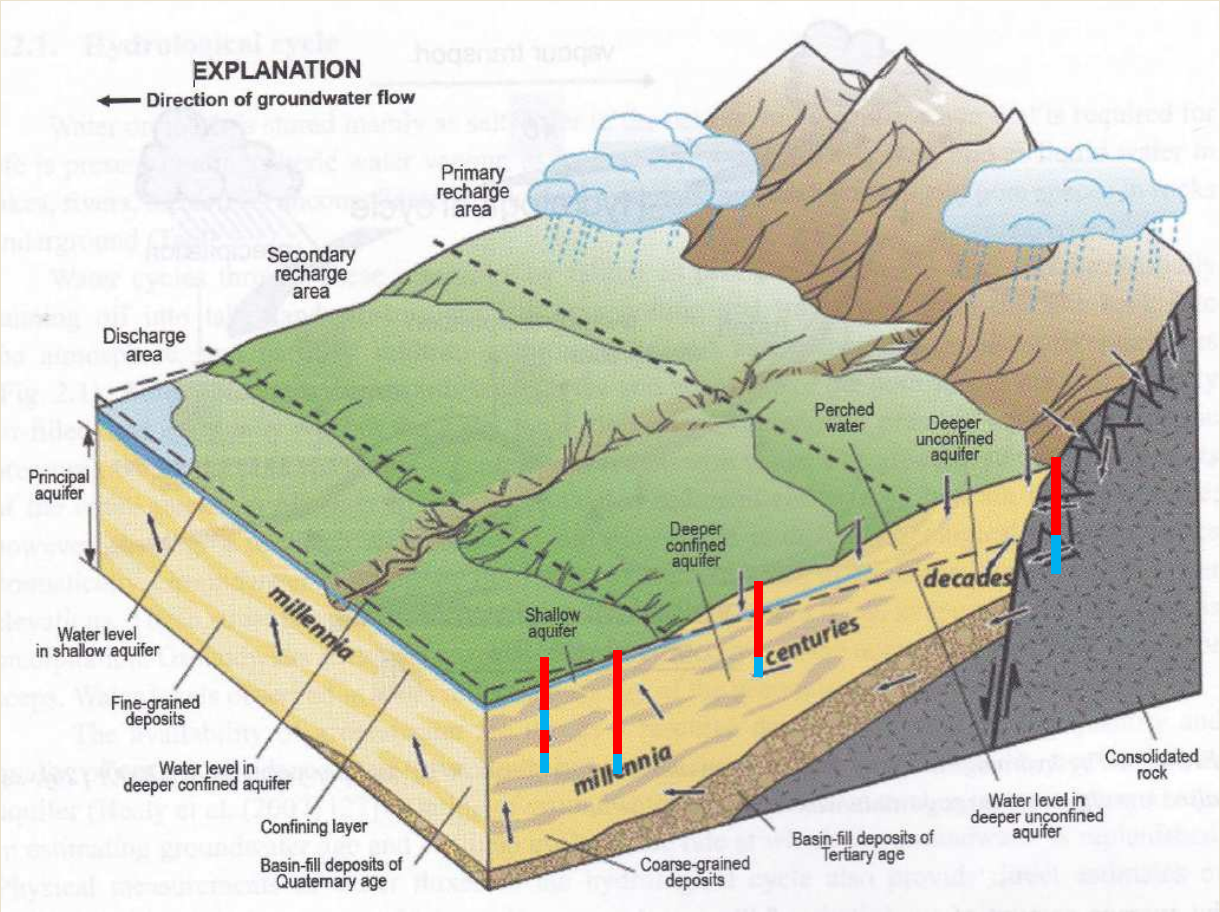
Las aguas más negativas (entre -14 y -16 por mil O^{18} provienen de fugas en las redes de agua potable y de alcantarillado. El servicio de abastecimiento doméstico de agua es alimentado por una bocatoma de río de una cuenca aledaña, a una altura mayor a la altura promedio del río Mopocho que atraviesa el área de estudio.

4. DATACIÓN AGUAS SUBTERRÁNEAS CONSIDERACIONES BÁSICAS

DATACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: ¿Qué se entiende por "edad" del agua subterránea?

La edad estimada a partir de una única herramienta isotópica puede ser insuficiente para caracterizar el dinamismo de un acuífero.

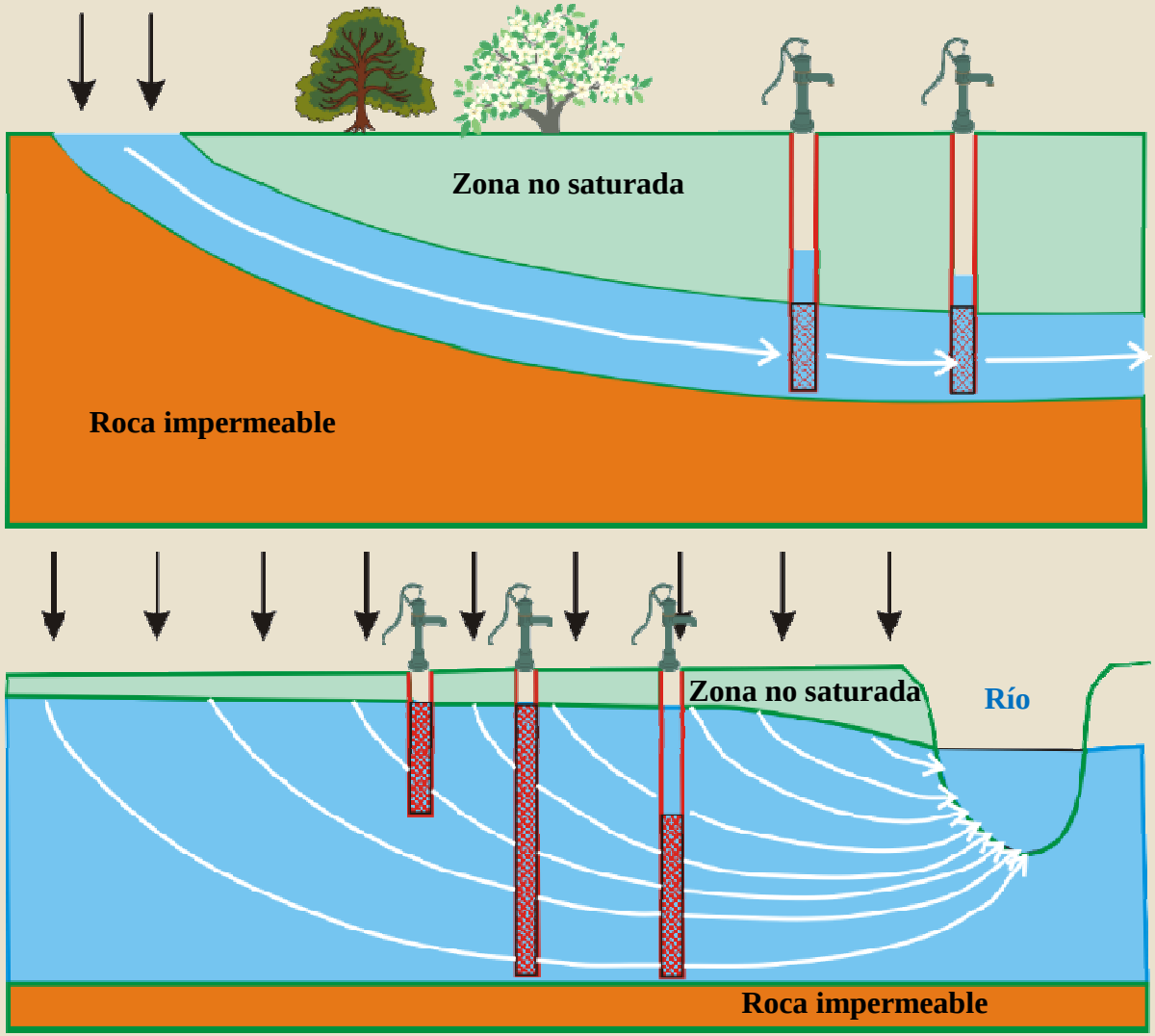
Es muy recomendable utilizar en forma simultánea varias técnicas isotópicas, así como recopilar la mayor cantidad de información hidrogeológica para una adecuada interpretación.



Tomado de Plummer et al, IAEA 2013. Modificado de Hely et al., 1971; Thiros, 2000.

Las edades de las aguas subterráneas en un mismo acuífero pueden variar en más de un orden de magnitud.

DATACIÓN: Interpretación en el marco de modelos de flujo del agua subterránea

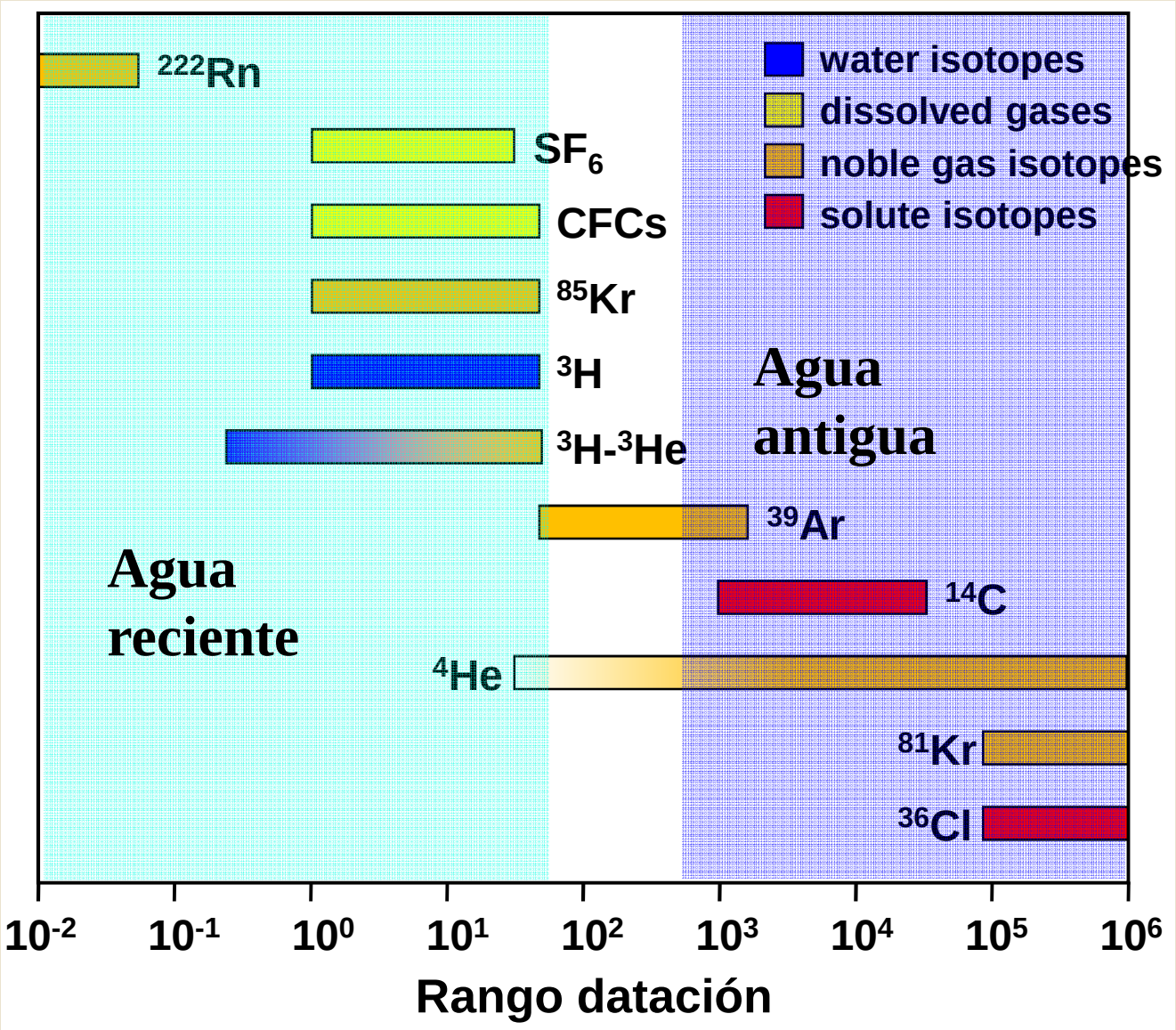


Idealización del patrón de flujo en el agua subterránea: Dos modelos extremos. Muchos de los acuíferos corresponden a una mezcla de ambos modelos.

Tomado de: Maloszewski y Zuber, 1982

DATACIÓN: Trazadores ambientales usados en datación

El eje horizontal denota años. La gráfica incluye dos trazadores químicos: CFCs y SF6. Los únicos isótopos que realmente datan la edad del agua son los que hacen parte de las moléculas del agua (tritio). Los otros hacen parte de sustancias disueltas en el agua.



5. TRITIO

AGUAS MODERNAS

TRITIO: Generalidades

Periodo de semidesintegración: 12.43 años (*Unterweger et al., 1980*)

Producción natural: Radiación cósmica

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{3}_{1}H$$

El tritio se combina con el oxígeno de la estratosfera para forma agua

$$^{3}H + O_2 \rightarrow {}^{3}HO_2 \rightarrow {}^{1}H\,{}^{3}HO$$

Producción artificial: Ensayos termonucleares (1951-1980) y operación de plantas de energía nuclear.

Decaimiento del tritio: Decae a ^{3}He a través de la emisión de partículas beta

$$^{3}H \rightarrow {}^{3}He + \beta^{-}$$

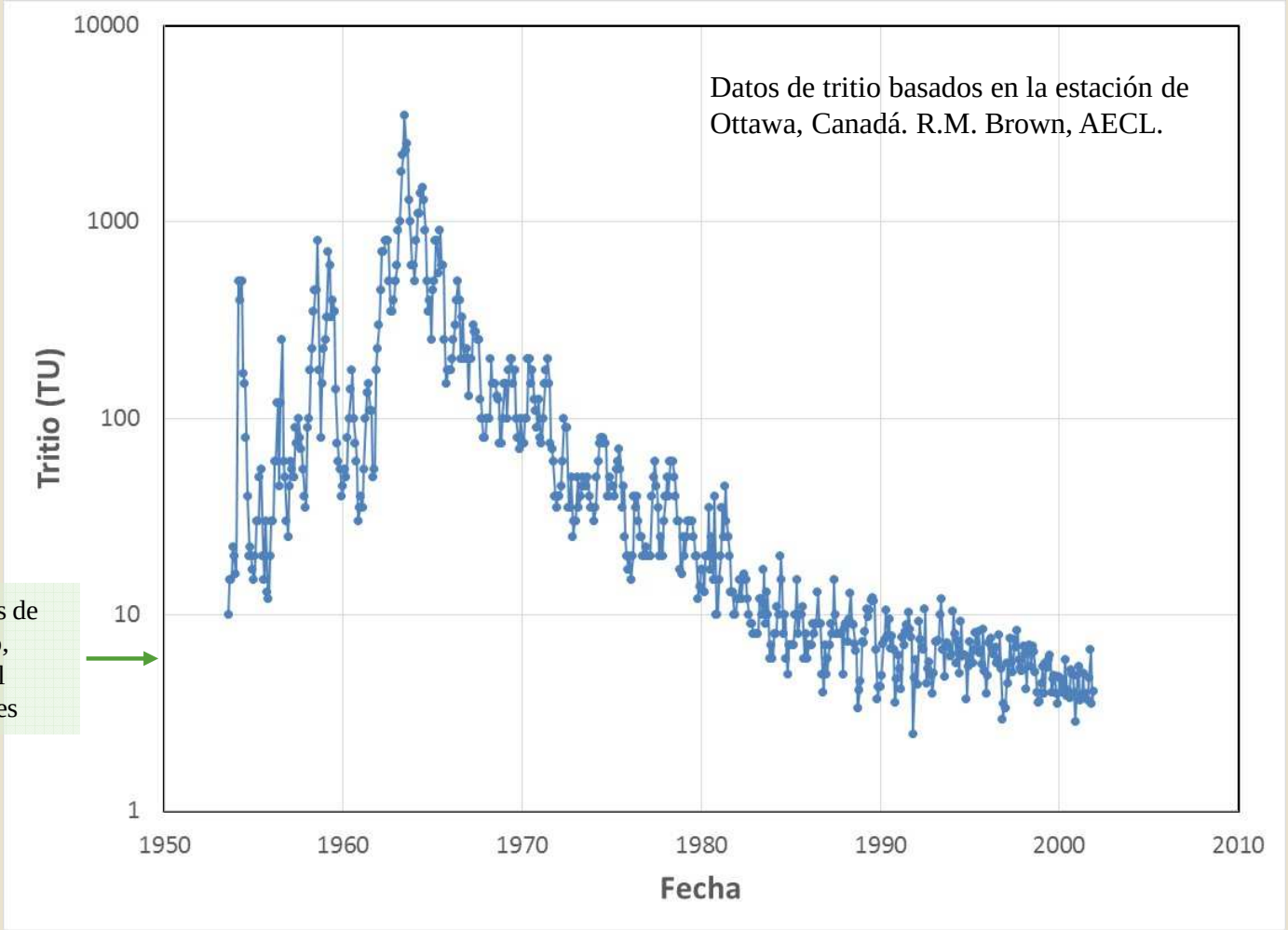
Unidad de medida: Unidad de Tritio (TU)

$$1\,TU = 1\,{}^{3}H\ por\ 10^{18}\ atomos\ de\ {}^{1}H$$

$$1\,TU = 0.118\,Bq \cdot kg^{-1}$$

TRITIO: Tritio en el agua lluvia

Variación de la actividad de tritio a partir de 1952, fecha de inicio de las pruebas termonucleares.



Actividad promedio de mediciones de tritio realizadas a muestras de vino, para estimar la actividad ambiental antes de los ensayos termonucleares

TRITIO: Datación de aguas recientes

1. Interpretación cualitativa: La presencia de tritio en el agua subterránea indica que el agua es moderna o que al menos tiene un componente de agua recargada en los últimos 60 años.

$$a_t\,{}^3H = a_0\,{}^3H \cdot e^{-\lambda t}$$

$a_t\,{}^3H$: Actividad residual de tritio (valor reportado de la muestra)

$a_0\,{}^3H$: Actividad de tritio al momento de la recarga del acuífero

λ : término de decaimiento

$$\lambda = \frac{ln2}{t_{1/2}} \qquad t_{1/2} = 12.43 \text{ años}$$

$$t = -17.93 \cdot ln \frac{a_t\,{}^3H}{a_0\,{}^3H} \longrightarrow 8$$

$$2014 - 1952 = 62$$

Si asumimos que la actividad de tritio era de 8 TU justo antes de empezar los ensayos termonucleares (1952), se tiene que:

$$a_t\,{}^3H = 0.25\ TU$$

El límite de detección de los mejores laboratorios de tritio ambiental está alrededor de **0.25** TU

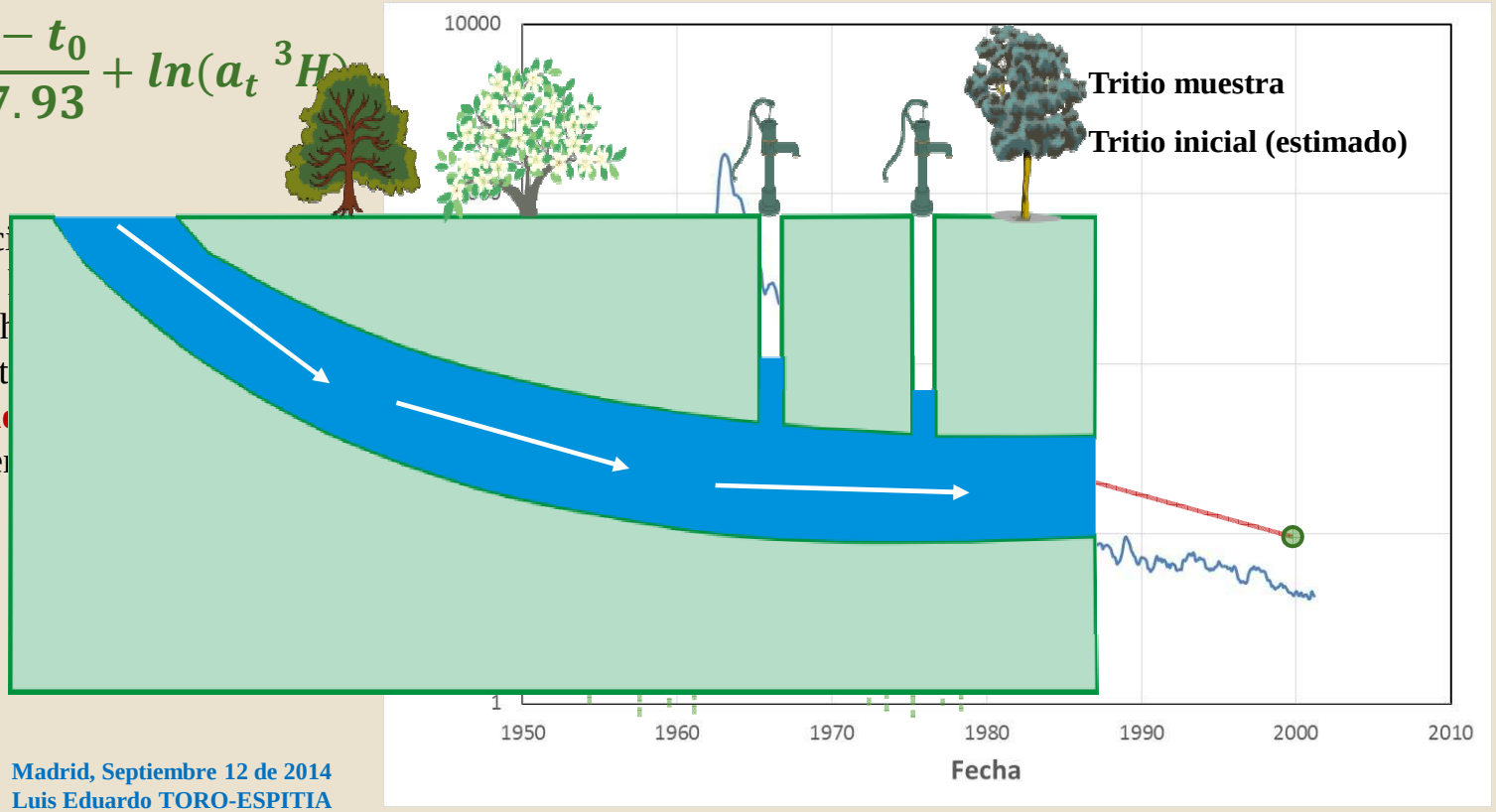
TRITIO: Datación de aguas recientes

2. Interpretación semi-cuantitativa: Tomando como referencia una **función de entrada de tritio**, y usando un **modelo "lumped parameter"** que represente el sistema de flujo del acuífero de interés, es posible estimar la "edad" del agua subterránea.

Ejemplo: El modelo más sencillo es el de **flujo tipo pistón**. Este modelo no toma en cuenta fenómenos como dispersión o mezcla entre aguas de diferente origen. Sólo toma en cuenta el decaimiento del tritio. Partiendo de la actividad de tritio medida en una muestra, se infiere el año en que el agua ingresó al sistema hidrogeológico.

$$ln(a_0\ ^3H) = \frac{t_t - t_0}{17.93} + ln(a_t\ ^3H)$$

Existen varias aplicaci
ellas desarrolladas en
Excel), que permiten h
de edades con varios t
flujo. Por ejemplo: **Fl**
(Maloszewski y Zube
(USGS)



TRITIO: Datación de aguas recientes

3. Interpretación cuantitativa Tritio/Helio-3: Midiendo simultáneamente el tritio y su "hijo" (el Helio-3), es posible obtener buenas estimaciones del tiempo de residencia de las aguas subterráneas. En condiciones óptimas de medición de ambos isótopos, es posible tener incertidumbres de sólo medio año. El inconveniente radica en la complejidad del análisis del helio-3.

$$^{3}H_t = \cancel{^{3}H_0} \cdot e^{-\lambda t}$$

Para determinar ***t***, es necesario conocer $^{3}H_0$ (función de entrada de tritio)

$$^{3}He_t = \cancel{^{3}H_0} \cdot \left(1 - e^{-\lambda t}\right)$$

Combinando ambas ecuaciones, es posible cancelar el término $^{3}H_0$

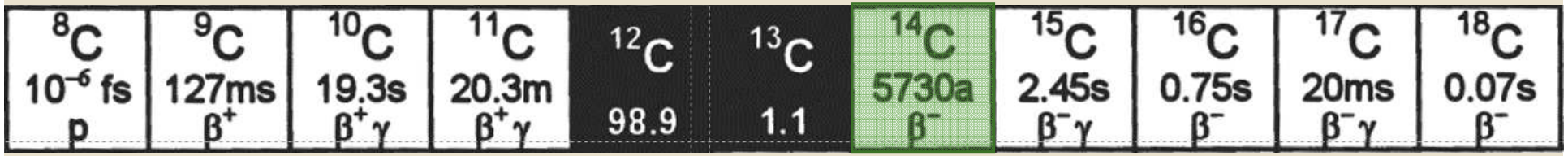
$$^{3}He_t = {}^{3}H_t \cdot \left(e^{-\lambda t} - 1\right)$$

La concentración de $^{3}He_t$ está dada en TU (1 ^{3}He por cada 10^{18} ^{1}H)

Se debe aplicar un factor de corrección a $^{3}He_t$ por concepto del ^{3}He incorporado desde la atmósfera al momento de la recarga (incluyendo aquel procedente de burbujas que se introducen al subsuelo durante la infiltración del agua, y por el helio producido durante el decaimiento de la serie ***U***/***Th***.

6. RADIOCARBONO

AGUAS ANTIGUAS



RADIOCARBONO: Generalidades

Periodo de semidesintegración: 5730 ± 40 años (*Godwin,1962*)

Producción natural: Radiación cósmica

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + p$$

El radiocarbono se combina con el oxígeno de la estratosfera para formar $^{14}CO_2$, el cual posteriormente es absorbido por las plantas durante la fotosíntesis.

$$^{14}C + O_2 \rightarrow ^{14}CO_2$$

Decaimiento: El radiocarbono se transforma en Nitrógeno-14, mediante la emisión de partículas beta

$$^{14}C \rightarrow ^{14}N + \beta^-$$

Edad de radiocarbono convencional:

edad, en años

$$t = \tau \cdot ln\frac{A_0}{A}$$

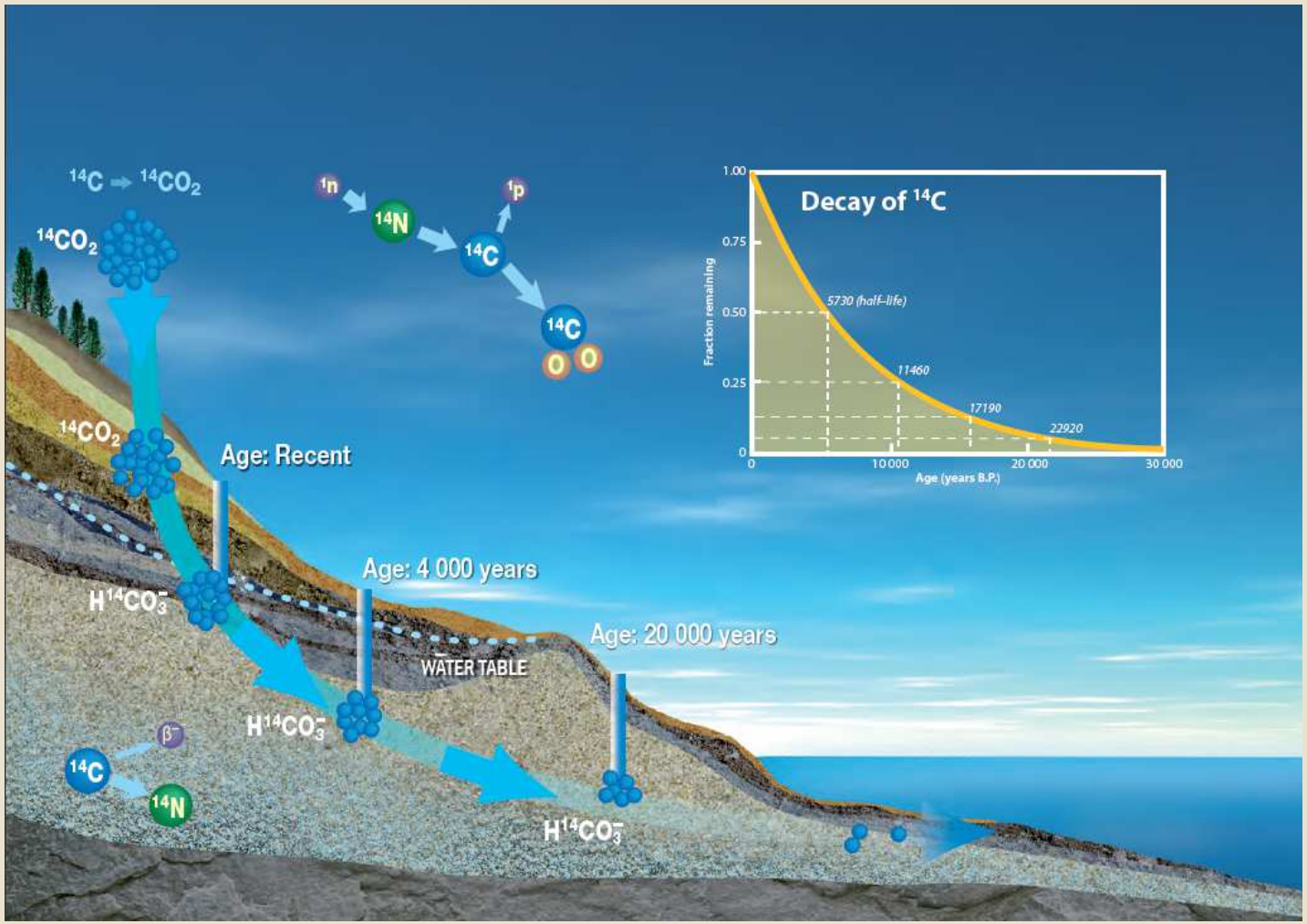
Actividad inicial del ^{14}C

Actividad específica del ^{14}C medida en la muestra

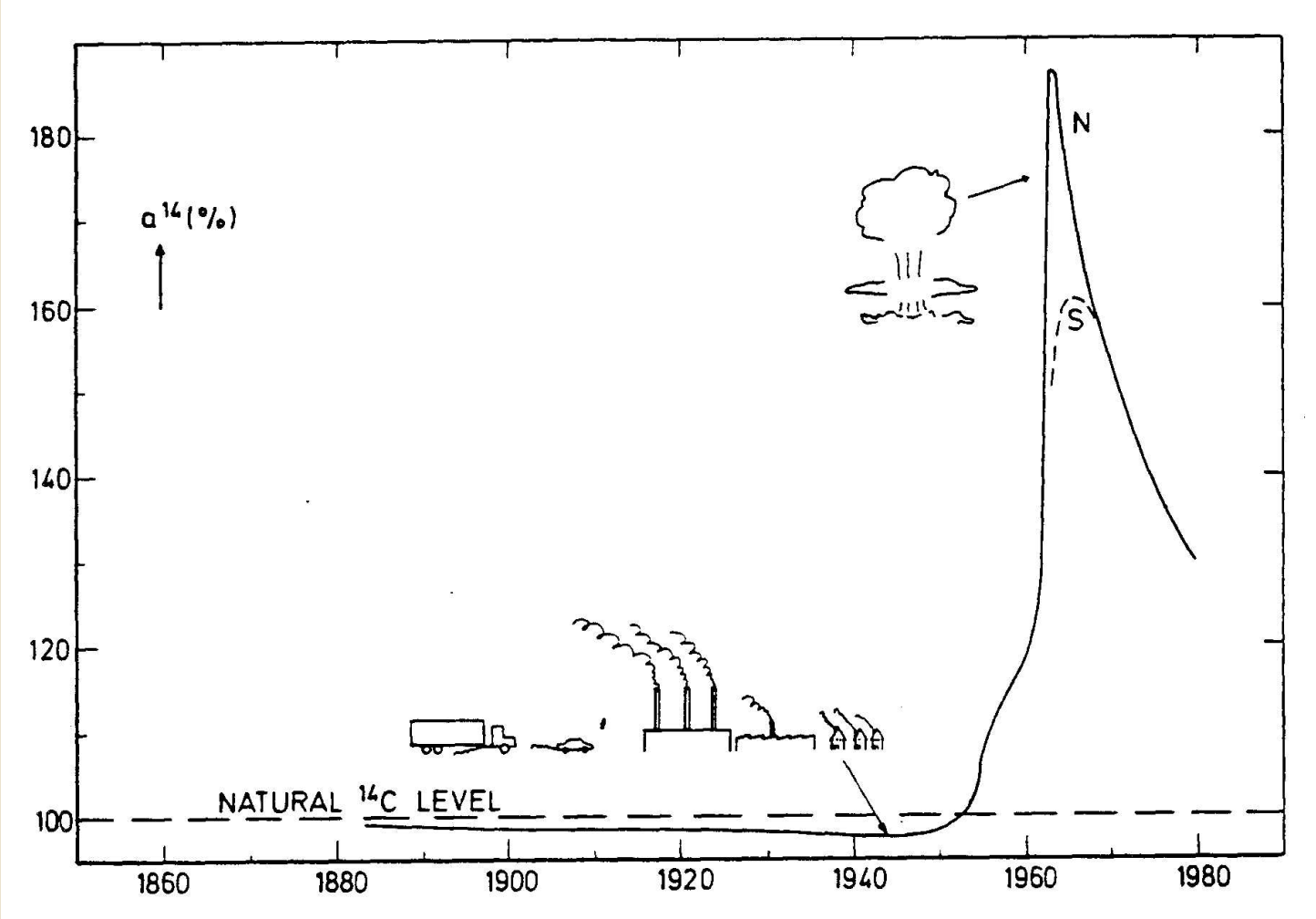
$$\tau = \frac{5568}{ln2}$$

Unidad de medida: porcentaje de carbono moderno (***pmc***)

RADIOCARBONO: Generalidades

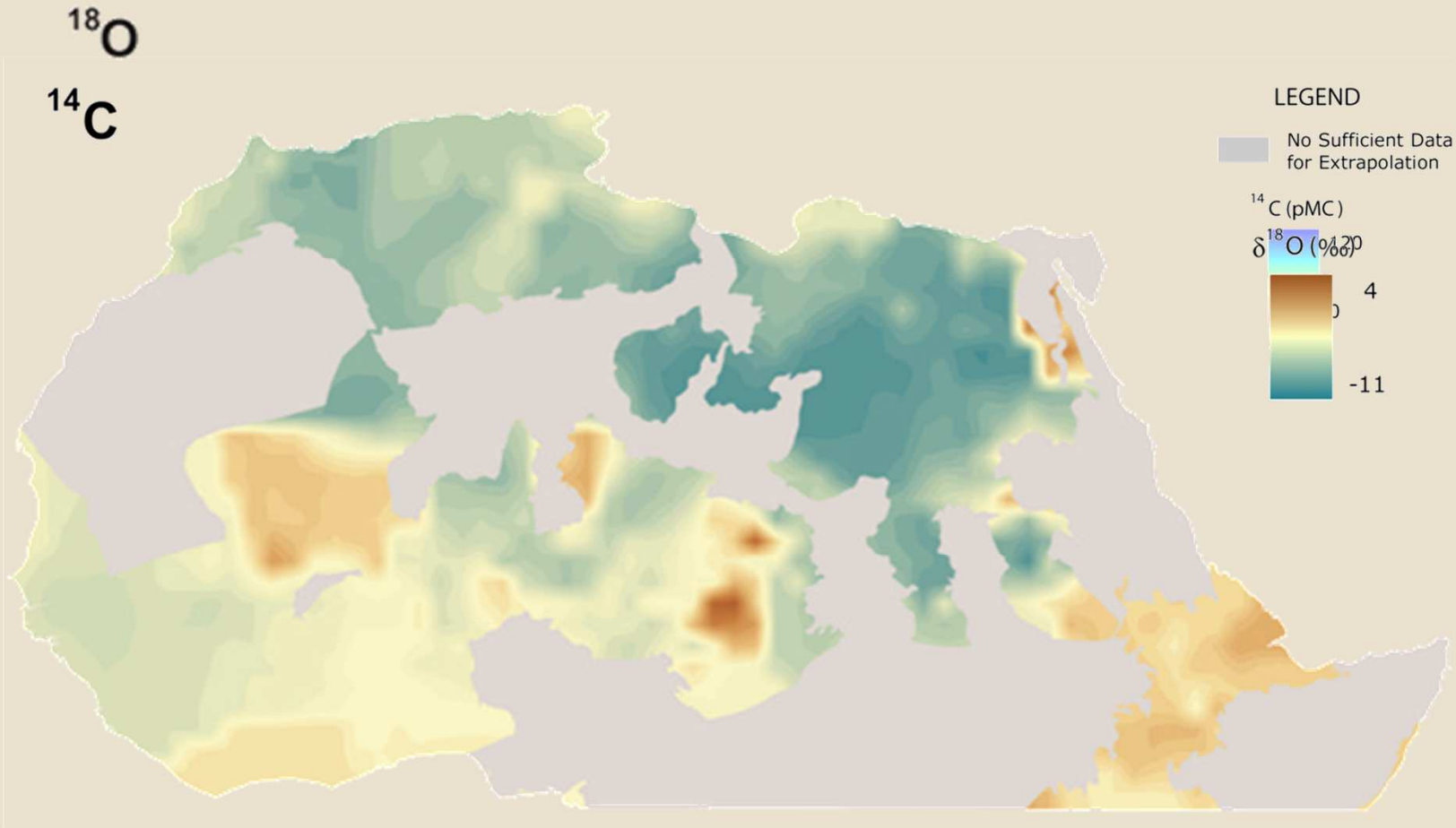


RADIOCARBONO - Fuentes



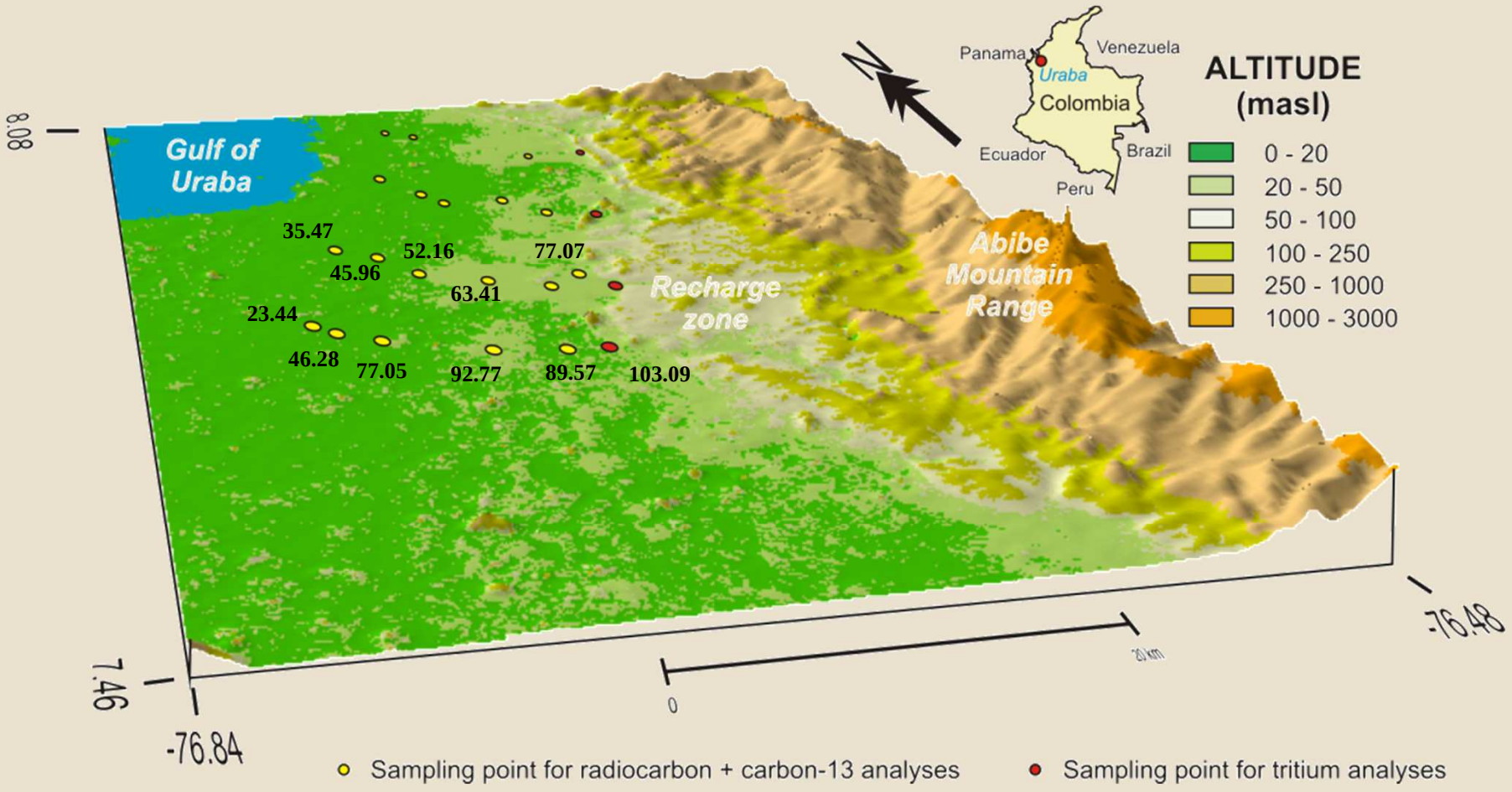
EJEMPLOS: Uso combinado de varios isótopos, parte septentrional de África

Los valores de oxígeno-18 más negativos corresponden a las aguas más antiguas (cero o baja actividad de radiocarbono).



Datos del OIEA

EJEMPLOS: Acuífero de Urabá, Colombia. Proyecto COL/7/001



Contraparte del Proyecto: CORPOURABA

7. RESUMEN

Ideas para resaltar

El contenido isotópico del agua puede usarse como una “huella dactilar” para identificar: 1) la procedencia del agua; 2) mezclas entre aguas con distinto origen; 3) velocidades promedio o tiempos promedio de residencia de las aguas subterráneas; 4) conexiones hidráulicas entre aguas superficiales y subterráneas; 5) mecanismos de contaminación; 6) zonas de recarga/descarga de acuíferos; 7) cambios climáticos; 8) desarrollos de modelos hidrológicos conceptuales.

Siempre que sea posible, las técnicas isotópicas deberán usarse junto con otras herramientas de investigación hidrológica, con el fin de obtener una imagen más completa sobre la naturaleza y dinamismo de los recursos hídricos.

La selección de los isótopos a medir en el marco de un proyecto de hidrología, dependerá de los objetivos planteados, condiciones en el campo para la toma de muestras, y laboratorios y recursos económicos disponibles.

¡GRACIAS!