



El contraste entre paisajes áridos y húmedos, Rio Grande do Norte, Brasil.

LA ISOYETA DE 800 MM

Víctor M. Ponce

Profesor Emérito de Ingeniería Civil y Ambiental

Universidad Estatal de San Diego, California

20 noviembre 2023

RESUMEN. Los climas del mundo pueden clasificarse en términos generales en: (1) áridos, y (2) húmedos; árido con una precipitación media anual inferior a 800 mm; húmedo con más de 800 mm. La isoyeta de 800 mm puede poseer una combinación óptima de agua y nutrientes: (1) abundante agua para satisfacer las demandas de la vegetación, y (2) una saludable diversidad de nutrientes, tanto en cantidad como en calidad, para satisfacer las necesidades de la vegetación. La vida humana cerca de la isoyeta de 800 mm puede resultar en general más saludable y definitivamente más sostenible. Se reducirá la cantidad de insectos y otras plagas, al tiempo que prácticamente se eliminará la necesidad de disponer de sal residual adicional. Esto último puede deberse a la percepción de la necesidad de irrigar las tierras áridas para satisfacer la demanda creciente de alimentos.

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación terrestre anual media divide los paisajes de la Tierra en dos tipos: áridos y húmedos.

Por un lado, el desierto de Atacama, en el norte de Chile, es un desierto superárido, con una precipitación anual media de 15 mm, efectivamente el más seco del mundo. Por otro lado, Mawsynram, en Meghalaya, en la India oriental es un bosque superhúmedo, con una precipitación anual media de 11 872 mm; de hecho, ¡el lugar más húmedo de la Tierra! Ésta es una gama muy amplia de variabilidad; sin embargo, la distribución no es uniforme en todo el mundo. La precipitación anual promediada espacial y temporalmente es de unos 800 mm (**Ponce y otros, 2000**). Este umbral separa las regiones con precipitaciones inferiores a la media de aquéllas con precipitaciones superiores a la media.

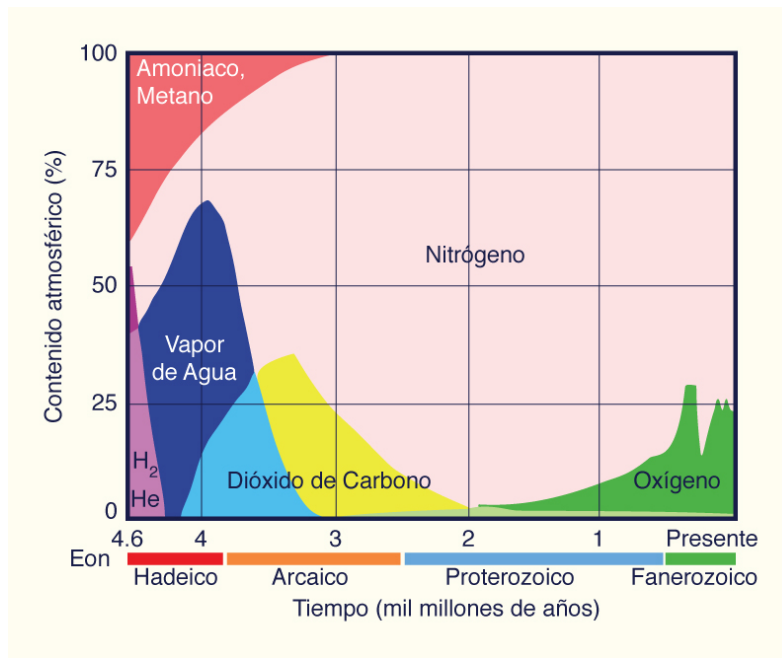
Los paisajes áridos tienen vegetación muy limitada, mientras que los paisajes húmedos tienen abundante vegetación. La pregunta es: ¿Cuál es preferible? ¿Un paisaje árido, en el cual el agua es limitada? ¿O un paisaje húmedo, en el cual abunda el agua? La respuesta no es sencilla. Una evaluación correcta requiere que examinemos la estructura de la biósfera de manera que se consideren cuidadosamente todos sus componentes.

2. LA BIÓSFERA

El concepto de biósfera se atribuye al científico ruso Vladimir Vernadsky (**Hutchinson, 1970**). La biósfera se define como aquella parte de la Tierra en la que existe vida. Las siguientes propiedades describen la biósfera como región: (1) presenta agua líquida en cantidades xonsiderables, (2) recibe un amplio suministro de energía solar, y (3) tiene importantes interfaces entre los estados líquidos, sólidos y gaseosos de la materia. Se ha demostrado que la vida se desarrolla fácilmente a través de las interfaces. Todas las plantas necesitan: (1) agua del entorno que las rodea, (2) dióxido de carbono y oxígeno del aire, y (3) una gran cantidad de otros elementos, en solución en el agua de los poros del suelo.

El agua existe en la superficie y el subsuelo de la Tierra en diversos lugares y en cantidades variables, según la estación y el clima, geología y geomorfología locales y regionales. El dióxido de carbono existe en el aire en cantidades suficientes para satisfacer las necesidades de la vegetación; su valor actual es de alrededor del 0,041% y está sujeto a un aumento contemporáneo gradual y persistente debido al calentamiento global de origen antropogénico. El oxígeno existe en el aire en aproximadamente un 21%, habiendo fluctuado a lo largo de eones (Fig. 1). El cuarto componente consiste de una gama de elementos químicos, normalmente en solución en el agua de los poros del suelo; estos elementos, esenciales para la vida, se denominan *nutrientes*.

Los requisitos fundamentales para la vida vegetal son: (1) la energía solar, fuente de toda actividad; (2) dióxido de carbono para la fotosíntesis; (3) agua para el transporte de sólidos a través del sistema vascular de la vegetación; y (4) una amplia disponibilidad de nutrientes, lo cual ayuda a explicar la diversidad de la biósfera.



Wikimedia Commons®

Fig. 1 Composición de gases atmosféricos a través del tiempo geológico.

3. LA NECESIDAD DE AGUA

La sustancia más abundante en la biósfera es el agua (H₂O). Los océanos, los casquetes polares, los glaciares, los lagos, los ríos, los suelos y la atmósfera de la Tierra contienen 1500 millones de kilómetros cúbicos de agua en una forma u otra. Las inusuales propiedades físicas del agua le confieren una química única, la cual determina su importancia biológica (**Penman, 1970**).

El agua sigue siendo líquida dentro del rango de temperatura más adecuado para los procesos vitales. En determinadas situaciones útiles, el agua permanece en equilibrio con sus estados sólido y gaseoso, por ejemplo, como hielo en la superficie de un lago. La congelación comienza en la superficie del lago y continúa hacia abajo. Esto se debe a que cuando se somete a enfriamiento, la contracción del agua se detiene a 4°C. A partir de ese momento, hasta el punto de congelación, el agua se expande, disminuyendo su densidad. Por lo tanto, el agua más fría flota sobre el agua más caliente [Fig. 2(a)].

El agua tiene otras propiedades que hacen posible la vida. Las más importantes son las siguientes (**Ponce, 2019**):

- Mayor calor específico entre los líquidos, es decir, la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de 1 kg de agua en 1°C.
- Mayor calor de vaporización de cualquier líquido y, por tanto, una volatilidad muy baja. Para una determinada entrada de energía, la temperatura de una determinada masa de agua aumentará más lentamente que la de cualquier otro compuesto químico.
- Un pequeño momento dipolar, el cual mide la electronegatividad de la estructura molecular del agua, permitiendo que el agua disuelva casi cualquier sustancia.
- La mayor tensión superficial de cualquier líquido, de modo que el radio de curvatura de su menisco es mayor que el de cualquier otro líquido. Cuanto mayor sea el radio de curvatura, mayor

será el contenido de agua.

- Su constante dieléctrica es mayor que la de cualquier otra sustancia, lo cual hace que el agua no sea químicamente pura en su estado normal. El agua líquida es una solución iónica que siempre contiene algunos iones de hidrógeno. La concentración de iones de hidrógeno se expresa mediante la escala de pH, la cual varía entre 0 y 14.
- Un potencial redox variable, definido como una medida de la afinidad de una sustancia para perder o ganar electrones y, por tanto, oxidarse o reducirse, respectivamente [Fig. 2 (b)]. En ambientes oxidados, el potencial redox puede alcanzar hasta +800 mV, mientras que en ambientes extremadamente reducidos puede alcanzar tan solo -400 mV. (Ponce, 2019).

A diferencia de cualquier otra sustancia de la naturaleza, las propiedades físicas variadas del agua le permiten sostener la vida en todos los entornos terrestres, incluidos los terrestres, fluviales, oceánicos y atmosféricos.

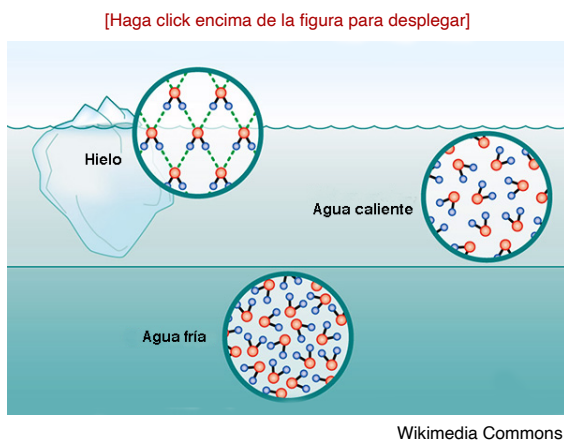


Fig. 2 (a) Moléculas de agua y temperatura ambiente.

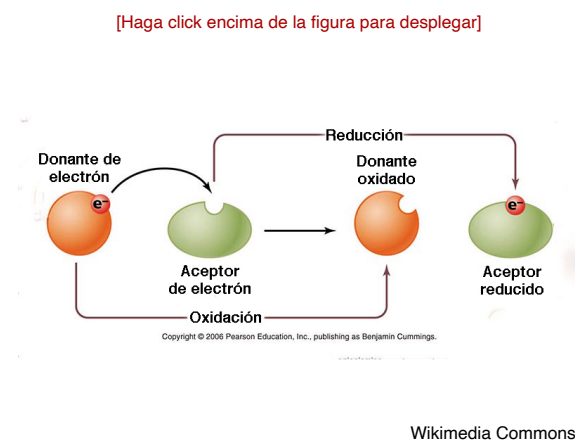
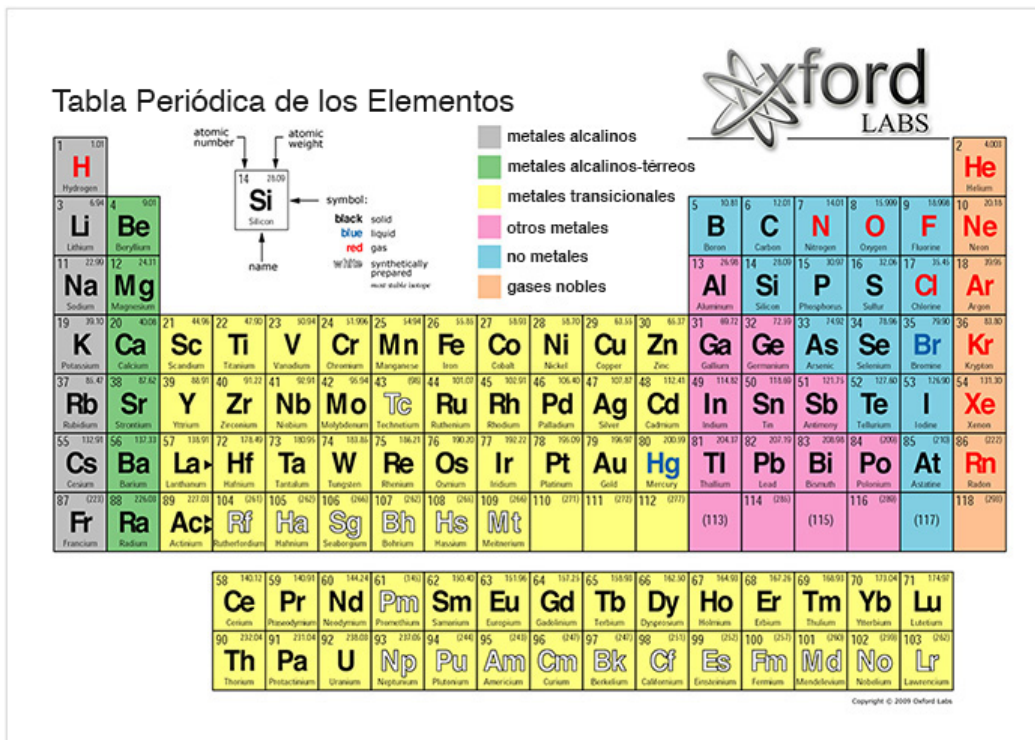


Fig. 2 (b) Procesos de oxidación y reducción en agua.

4. LA NECESIDAD DE NUTRIENTES

La ecología define la biósfera como el lugar de interacción del hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno. En la Tabla Periódica de los Elementos, estos elementos están numerados 1, 6, 7 y 8, respectivamente (Fig. 3). Si ampliamos esta lista para incluir fósforo (15) y azufre (16), tendremos un conjunto de seis de los dieciséis elementos más ligeros, que conforman el acrónimo NCHOPS. En conjunto, estos seis elementos constituyen aproximadamente el 99% en peso de la biósfera. Una gran cantidad de problemas ambientales surgen de la reactividad excepcional de estos seis elementos (Deevey, 1970).

[Haga click encima de la figura para desplegar]



Oxford Labs®

Fig. 3 Tabla Periódica de los Elementos.

La biosfera se compone principalmente de dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). El nitrógeno, un componente importante de las proteínas, es sorprendentemente escaso, alrededor del 0,5%. Cuando se queman, los constituyentes de las cenizas biosféricas constituyen aproximadamente el 1,2% del peso original. Los elementos dominantes son el calcio, el potasio, el silicio y el magnesio, todos con importantes funciones bioquímicas.

Un átomo de magnesio (0,099%) se encuentra en el centro de cada molécula de clorofila. El silicio (0,122%) es útil para construir estructuras resistentes. El azufre (0,071%) es el "endurecimiento" de las proteínas. Una proteína no puede realizar su función a menos que esté plegada y tenga una forma particular. Esta estructura tridimensional se mantiene mediante enlaces entre átomos de azufre que unen un segmento de una molécula de proteína con otro.

El fósforo (0,052%) es absolutamente necesario para la biosfera. El "enlace de fosfato de alta energía" es el combustible universal para todo el trabajo bioquímico de la célula. Un átomo de fósforo por molécula de adenosina es absolutamente esencial para el buen funcionamiento de la biosfera (Deevey, 1970).

La Tabla 1, Parte 1, muestra la composición de la biosfera, con los elementos enumerados por número atómico creciente, de 1 a 16. La Parte 2 muestra los elementos más pesados (peso atómico superior a 16), enumerados por su cantidad relativa. Los tres elementos principales, oxígeno, carbono e hidrógeno, constituyen el 98,4% (en peso) de la biosfera. El 1,6% restante son los nutrientes. Encabeza la lista el nitrógeno, seguido del calcio, potasio, silicio, magnesio, azufre, aluminio, fósforo, cloro, hierro, manganeso y sodio. La Tabla 2 ordena los elementos por peso (kg/ha).

TABLA 1. Composición de la biósfera, por elementos (Parte 1) (Deevey, 1970).

Número Atómico, en orden secuencial, (1 a 16)	Símbolo	Elemento	Orden, por peso	Peso (kg/ha)	Fracción del total	Porcentaje del total
1	H	Hidrogeno	3	13,149	0.06591	6.591
2	He	Helio	0	0	0	0
3	Li	Litio	0	0	0	0
4	Be	Berilio	0	0	0	0
5	B	Boro	0	0	0	0
6	C	Carbono	2	78,502	0.39346	39.346
7	N	Nitrógeno	4	1,001	0.00503	0.503
8	O	Oxígeno	1	104,605	0.52420	52.420
9	F	Fluor	0	0	0	0
10	Ne	Neon	0	0	0	0
11	Na	Sodio	15	38	0.00020	0.020
12	Mg	Magnesio	8	196	0.00099	0.099
13	Al	Aluminio	10	111	0.00057	0.057
14	Si	Silicio	7	241	0.00122	0.122
15	P	Fósforo	11	104	0.00052	0.052
16	S	Azufre	9	142	0.00071	0.071
Parte 2: Estos elementos, de número atómico > 16, están ordenados por peso unitario (kg/ha).						
Número atómico	Símbolo	Elemento	Orden indicado, por peso	Peso (kg/ha)	Fracción del total	Porcentaje del total
20	Ca	Calcio	5	754	0.00379	0.379
19	K	Potasio	6	456	0.00229	0.229
17	Cl	Cloro	12	99	0.00050	0.050
26	Fe	Hierro	13	77	0.00040	0.040
25	Mn	Manganeso	14	42	0.00021	0.021
Suma	-	-	-	199,517	1.0000	100.000

TABLA 2. Composición de la biósfera, por peso unitario (kg/ha) (Deevey, 1970).

Número atómico	Símbolo	Elemento	Orden, por peso	Peso (kg/ha)	Fración del total	Porcentaje del total
8	O	Oxígeno	1	104,605	0.52420	52.420
6	C	Carbono	2	78,502	0.39346	39.346
1	H	Hidrógeno	3	13,149	0.06591	6.591
7	N	Nitrógeno	4	1,001	0.00503	0.503
20	Ca	Calcio	5	754	0.00379	0.379
19	K	Potasio	6	456	0.00229	0.229
14	Si	Silicio	7	241	0.00122	0.122
12	Mg	Magnesio	8	196	0.00099	0.099
16	S	Azufre	9	142	0.00071	0.071
13	Al	Aluminio	10	111	0.00057	0.057
15	P	Fósforo	11	104	0.00052	0.052
17	Cl	Cloro	12	99	0.00050	0.050
26	Fe	Hierro	13	77	0.00040	0.040
25	Mn	Manganeso	14	42	0.00021	0.021
11	Na	Sodio	15	38	0.00020	0.020
Suma	-	-	-	199,517	1.0000	100.000

Observamos que la biósfera es a la vez húmeda y carbonácea. Una sola clase de compuestos, el formaldehído (CH_2O) y sus polímeros, constituye más del 98% del peso total. **Deevey (1970)** concluye su trabajo fundamental sobre los ciclos minerales recapitulando la fórmula empírica de la materia viva: **$\text{H}_{2960}\text{O}_{1480}\text{C}_{1480}\text{N}_{16}\text{P}_{1.8}\text{S}$** .

En resumen, sacamos las siguientes conclusiones sobre la composición de la biosfera: (1) la abrumadora presencia de formaldehído (CH_2O), que constituye alrededor del 98,4% en peso; y (2) la presencia de una gama de nutrientes, doce (12) de ellos, enumerados en la Tabla 2; todos elementos ligeros, en su mayoría con un peso atómico inferior a 17, pero ciertamente inferior a 27. Otros nutrientes, muy probablemente presentes en micronutrientes y trazas en muestras alternativas, no fueron documentados en el trabajo de Deevey. Estos incluyen (pesos atómicos indicados entre paréntesis): cromo (24), cobalto (27), níquel (28), cobre (29), zinc (30), selenio (34) y molibdeno (42).

5. EL CLIMA Y LOS SERES HUMANOS

El 15 de noviembre de 2022, la población mundial alcanzó los **8 mil millones**. El género humano está distribuido por todos los continentes y climas del mundo (Fig. 4) (Klinger y Ryan, 2022). El Cuadro 3

muestra que el 62% de la población mundial vive en regiones húmedas, con una precipitación media anual superior a 800 mm; el resto, el 38%, vive en regiones áridas, con menos de 800 mm. También muestra que el 70% de la población (27% semiárida + 43% subhúmeda) vive en los lugares comprendidos por las isoyetas de 400 y 1600 mm (los datos que se muestran en la Tabla 3 han sido tomados de la Fig. 4). Concluimos que los humanos, en general, tienen una ligera preferencia por las regiones húmedas: aproximadamente seis de cada diez personas viven en regiones húmedas.

[Haga click encima de la figura para desplegar]

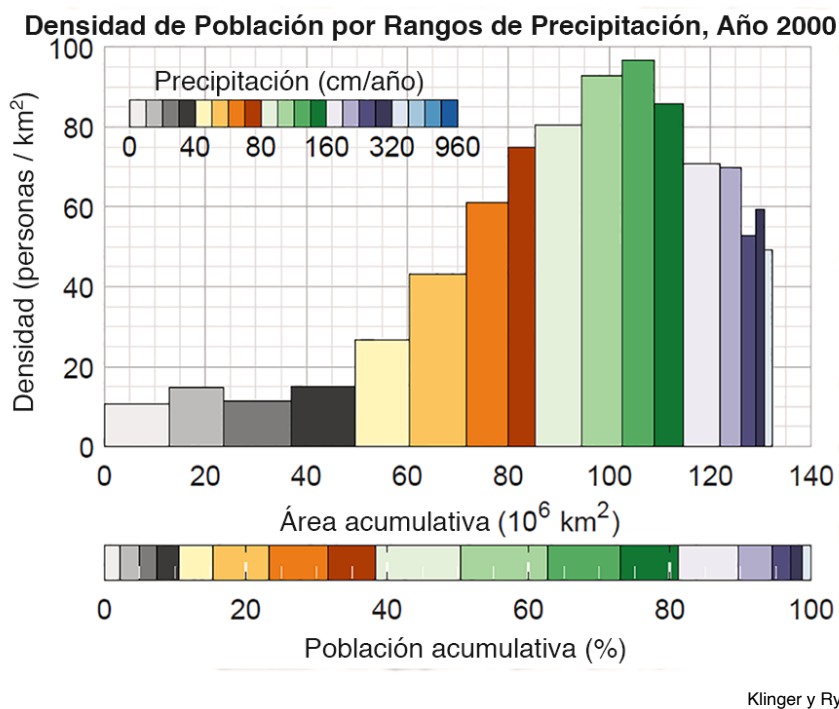


Fig. 4 Densidad de población global por rango de precipitación (Año 2000).

TABLA 3. Población global por rango de precipitación (Año 2000) (Klinger y Ryan, 2022).				
Clima	Precipitación (mm/año)	Población en el rango (%)	Población acumulativa (%)	División de la población (%)
<i>Superárido</i>	Menor de 100	2	2	Árido: 38
<i>Hiperárido</i>	100-200	3	5	
<i>Árido</i>	200-400	6	11	
<i>Semiárido</i>	400-800	27	38	
<i>Subhúmedo</i>	800-1,600	43	81	Húmedo: 62
<i>Húmedo</i>	1,600-3,200	18	99	
<i>Hiperhúmedo</i>	3,200-6,400	1	100	
<i>Superhúmedo</i>	Mayor de 6,400	0	100	

El razonamiento anterior se relaciona con la cantidad de humedad ambiental. Constituye una valoración correcta de la realidad del clima, al menos en lo que a cantidad de agua se refiere. Sin embargo, no considera los suelos subyacentes. Los suelos de las regiones áridas generalmente no han sido lixiviados por grandes cantidades de precipitación y el flujo superficial/subsuperficial asociado; por lo tanto, se han mantenido incólumes con el tiempo, conservando la mayoría, si no todos, sus nutrientes.

Observamos que tanto el agua como los nutrientes son necesarios para el buen funcionamiento de la biósfera. La biósfera necesita agua en cantidades específicas (Sección 3) y nutrientes de diferentes tipos (Sección 4). Dependiendo demasiado de cualquiera de ellos, en detrimento de los otros, sería contraproducente. ¿Cuál es el término medio, aquél que proporcione suficiente agua para las necesidades de las plantas, junto con una cantidad suficiente de nutrientes que les permitan, juntos agua y nutrientes, cumplir con el propósito de la biósfera?

6. LA ISOYETA DE 800 MM

Una isoyeta es una curva que muestra "precipitación igual" en unidades de profundidad, generalmente en milímetros. En la hidrología de aguas superficiales, la curva de isoyetas, o simplemente "isoyeta", se utiliza normalmente para representar la precipitación media anual, en mm/año. La isoyeta de 800 mm constituye el umbral entre los climas áridos y húmedos. Más precisamente, es el límite entre una región semiárida, en el rango de 400-800 mm, y una subhúmeda, en el rango de 800-1600 mm (**Ponce y otros, 2000**).

El origen del valor de 800 mm merece una mayor explicación. La cantidad de humedad almacenada en la atmósfera es función de la latitud y el clima, y varía típicamente de 2 a 15 mm en las regiones polares y áridas a 45 a 50 mm en las regiones húmedas (UNESCO, 1978). Aquí suponemos un valor medio global terrestre de 25 mm. La humedad atmosférica se recicla cada once (11) días en promedio, constituyendo un total de $365/11 = 33$ ciclos por año (L'vovich, 1979). Esto da como resultado un valor de precipitación media global terrestre anual de $P_{mgt} = 25 \times 33 = 825$ mm. Aquí asumimos la centena más cercana: $P_{mgt} = 800$ mm. El valor de 800 mm es el punto que separa los climas áridos de los húmedos, particularmente cuando se definen sólo en términos de precipitación media anual, una definición que caracteriza mejor las regiones subtropicales.

Las regiones áridas generalmente tienen menos agua y humedad y, por lo tanto, presentan suelos relativamente no lixiviados. Cuanto más árida sea la región, es probable que permanezcan más nutrientes, tanto en cantidad como en calidad, en el perfil del suelo [Fig. 5(a)]. Por el contrario, las regiones húmedas tienen más agua y humedad, y en el tiempo geológico se ha producido una lixiviación considerable del suelo. Cuanto más húmeda es la región, más probable es que los suelos carezcan de una gran cantidad de nutrientes [Fig. 5 (b)]. Este hecho ha sido ampliamente documentado (**Ponce, 2023**).



Fig. 5 (a) El desierto del Sahara.



Fig. 5 (b) La selva amazónica.

Postulamos que la humanidad se enfrenta a este dilema: cuanto más árida es la región, menos agua hay; por otro lado, cuanto más húmeda es la región, menos nutrientes hay. Se necesitan cantidades adecuadas de agua y nutrientes para el correcto funcionamiento de la biosfera. Postulamos aquí que la disponibilidad de ambos recursos puede ser óptima en o cerca a la isoyeta de 800 mm.

Una región más seca que lo óptimo (digamos, menos de 400 mm) tendrá un buen suministro de nutrientes de todo tipo, incluidos los que son muy necesarios para la vegetación (entre ellos, potasio y magnesio), y aquéllos que tal vez no sean necesarios en las cantidades en las que están presentes (sodio y calcio). Por lo tanto, habrá que desperdiciar estos últimos, creando un problema de eliminación de sales residuales que, en la mayoría de los casos, resulta ser muy onerosa. Tal como se ha demostrado en varias oportunidades, las sociedades deben pagar por la disposición adecuada de las sales residuales de la irrigación (**Ponce, 2023**).

Por el contrario, una región que es más húmeda que lo óptimo (digamos, más de 1600 mm) tendrá un suministro de agua garantizado, pero los nutrientes pueden faltar en cantidad y calidad, una situación que claramente no es del todo adecuada para la productividad de la agricultura. Concluimos que una región en o cerca de la isoyeta de 800 mm es aquella en la cual el suministro tanto de agua como de nutrientes es óptimo; por lo tanto, es una región más adecuada para el bienestar y el progreso de la especie humana. Para permitirnos cierta latitud, puede considerarse razonable un rango de 400 a 1600 mm de precipitación media anual.

Las aseveraciones anteriores no implican que deban evitarse las regiones fuera de este rango (400-1600 mm). Más bien, implica que el asentamiento de regiones áridas y húmedas fuera de este rango resultará más costoso, muy probablemente de manera hasta ahora imprevista, lo que puede resultar en costos tangibles adicionales y/u otros efectos negativos que podrían estar algo ocultos para la salud pública y ambiental.

Estudio de caso: Michoacán, México. México es el mayor productor de aguacate del mundo y representa el 30% de la producción mundial (**U.S. Department of Agriculture, 2021**). El estado de Michoacán, en el centro oeste de México, representa el 75% de la producción nacional de aguacate y el 81% del valor total de la producción. No parece sorprendente que la precipitación media anual en Michoacán sea de 850 mm (**INEGI, 2023**), muy cercana al valor de 800 mm considerado óptimo.

[Click on top of figure to expand]



Elías González (quora.com)

Fig. 6 Producción de aguacate en Michoacan, México.

7. RESUMEN

Hemos demostrado que tanto el agua como los nutrientes son necesarios para el funcionamiento adecuado de la biósfera. Los climas globales suelen clasificarse en términos generales en: (1) áridos, y (2) húmedos; árido para una precipitación media anual inferior a 800 mm; húmedo para más de 800 mm. Seis de cada diez personas viven en regiones húmedas, lo que revela la ligera preferencia del ser humano por los ambientes húmedos. Las regiones muy áridas carecen de agua; las regiones muy húmedas carecen de nutrientes. Observamos que la isoyeta de 800 mm, el umbral entre las regiones áridas y húmedas, parece poseer una combinación óptima de agua y nutrientes: (1) abundante agua para satisfacer las demandas de la vegetación, y (2) una diversidad de nutrientes, tanto en cantidad como en calidad, para satisfacer las necesidades del ecosistema.

En conclusión, la vida cerca de la isoyeta de 800 mm puede resultar en general más saludable para los humanos y ciertamente más sostenible. Se reducirá la cantidad de insectos y otras plagas, al mismo tiempo que prácticamente se eliminará la necesidad de tener que disponer de sal residual adicional. Esto último puede deberse a la necesidad de irrigar las tierras áridas para satisfacer la creciente demanda de alimentos.

BIBLIOGRAFÍA

Deevey, E. S. **Mineral Cycles**. *Scientific American*, Vol. 223, No. 3, September, 149-158.

Hutchinson, G. E. **The Biosphere**. *Scientific American*, Vol. 223, No. 3, September, 45-53.

INEGI, 2023. **Cuéntame, Monografías, Información, Michoacán**. (Consulted on September 20, 2023).

Klinger, B. A., and S. J. Ryan. 2022. Population distribution within the human climate niche. *PLOS Climate*, 1(11).

L'vovich, M. I. 1979. World water resources and their future. *American Geophysical Union*, Washington, D.C.

Penman, H. L. **The Water Cycle**. *Scientific American*, Vol. 223, No. 3, September, 99-108.

Ponce, V. M., R. P. Pandey, and S. Ercan. 2000. **Characterization of drought across climatic spectrum**. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 2, April, 222-224.

Ponce, V. M. 2019. **The properties of water**. Online article. https://ponce.sdsu.edu/properties_of_water.html

Ponce, V. M. 2023. **Is the irrigation of arid lands a double-edged sword?**. Online article.
https://ponce.sdsu.edu/irrigation_double_edged.html

UNESCO. 1978. *World Water Balance and Water Resources of the Earth*. Paris, France.

U.S. Department of Agriculture, 2021. **Global Agriculture Information Network Report, October 5, 2021**.

231203