

HISTORIA CLIMÁTICA DE LA TIERRA

Este libro no podrá ser reproducido, ni total ni parcialmente, sin el previo permiso escrito del editor. Todos los derechos reservados.

© 2023, Sergio González
Derechos exclusivos de edición
© 2023, Editorial Planeta Chilena S.A.
Avda. Andrés Bello 2115, 8° piso,
Providencia, Santiago de Chile

Ilustraciones: Yohana Tapia Pilcante

1ª edición: mayo de 2023

RPI: 2023-A-3697
ISBN: 978-956-408-351-3

HISTORIA CLIMÁTICA DE LA TIERRA

Calentamientos globales
y glaciaciones del pasado
para entender el clima
presente y futuro

SERGIO GONZÁLEZ

Índice

Prólogo	13
Capítulo 1. Clima y sistema climático	19
Promedios	19
Tiempo y clima	22
Clima planetario	23
Sistema climático	24
Componentes del sistema climático	24
Contabilidad energética	29
Capítulo 2. Cambios climáticos	33
Variabilidad y cambio climático	33
Forzantes	36
Tiempo de respuesta	38
Retroalimentación	40
Capítulo 3. El clima del pasado	43
Morrenas y erosión glaciár	43
Las primeras ideas	44
¿Qué es un paleoclima?	45
¿Cómo sabemos del clima del pasado?	46
Proxies	48
Resolución temporal	49
Modelos climáticos	50
Capítulo 4. La Tierra caliente y la regulación térmica	53
La desgasificación	53
La Tierra caliente	55
Capturando carbono	57
El Sol joven y débil	58
Regulación térmica	59
La meteorización	61

Capítulo 5. Las primeras glaciaciones	65
El origen de la vida y el clima	65
Pongola	66
Glaciación Huroniana	68
La primera extinción	69
Capítulo 6. Glaciaciones globales	73
Glaciares en los trópicos	73
Glaciación Stuartiana	76
El supercontinente Rodinia	76
El albedo desbocado	80
Glaciación Marinoana	81
Los hidratos de metano	82
La Segunda Gran Oxidación	84
El fin del Neoproterozoico	87
Capítulo 7. Los enigmas de la era de hielo Andina-Sahariana	89
Clima cámbrico	89
El invernadero del Cámbrico	91
Extinción masiva del Ordovícico-Silúrico	93
Anoxia oceánica	94
Glaciares en el Sahara	95
Capítulo 8. Las plantas y la era de hielo Karoo	99
El origen de las plantas	99
El invernadero del Devónico	101
Regulación biológica del clima	103
Era de hielo Karoo	105
El levantamiento de la protocordillera de los Andes	107
El oxígeno y la lignina	109
La desglaciación del Pérmico y el supercontinente Pangea	110
Capítulo 9. Cambios climáticos y volcanes	113
Volcanes	113
Supervolcanes	116
La Gran Mortandad	117
<i>Traps</i> siberianos y emisiones volcánicas	118
Anoxia, euxinia y destrucción de la capa de ozono	121
Capítulo 10. Los monzones y el diluvio de Pangea	123

El clima del supercontinente Pangea	123
El monzón de Pangea	127
El diluvio universal del Triásico	130
La diversificación de los dinosaurios	132
Capítulo 11. Glaciares en el Jurásico	135
La extinción del Triásico-Jurásico	135
Cambios climáticos del Jurásico	136
Eustatismo	140
Capítulo 12. El superinvernadero	143
El óptimo climático del Cretácico	143
Expansión del fondo oceánico	146
Tormentas tropicales	147
La circulación termohalina	149
Los eventos anóxicos del Cretácico	152
El final del Cretácico	153
Capítulo 13. La extinción de los dinosaurios	155
El impacto de un asteroide	155
La larga noche y el calentamiento posterior	157
Capítulo 14. Máximos térmicos	159
Hipertermales	159
Evento PETM	162
El óptimo climático del Eoceno temprano y los marsupiales de la Antártida	165
Mar de Tetis	166
Capítulo 15. Enfriamiento global	169
Enfriamiento cenozoico	169
Evento Azolla	170
Velocidad de expansión del fondo oceánico	172
La meseta tibetana y el clima	173
Meteorización y levantamiento orográfico	175
Choque continental	175
Capítulo 16. Hielos antárticos	179
Hielos antárticos	179
El evento Oi-1	180
La Corriente Circumpolar Antártica	182

Prólogo

Una de las frases que más escucho de quienes dicen que el actual cambio climático es una mentira y que todo es parte de una conspiración que reúne a la ONU, ciertos sectores políticos e incluso reptilianos, es que el clima del planeta siempre ha cambiado. De todas las cosas que dicen los grupos negacionistas del cambio climático antropogénico esta es una de las pocas o, quizás, la única afirmación verdadera. El clima del planeta ha cambiado innumerables veces a lo largo de los 4600 millones de años de historia de la Tierra. Debo reconocer que no entiendo de qué forma esta afirmación respalda la idea de que el cambio climático que estamos viviendo es parte de una conspiración, pero, al margen de eso, probablemente una de las más sólidas evidencias que tenemos para afirmar que el cambio climático de hoy es un fenómeno excepcional y potencialmente peligroso es precisamente el conocimiento que tenemos acerca de los cambios que han ocurrido en el pasado.

Por medio de diversas metodologías científicas, algunas que se abordarán muy someramente en este libro, sabemos que el planeta Tierra ha pasado por etapas tan cálidas que los hielos y glaciares estuvieron ausentes y etapas tan frías que enormes capas de hielo cubrieron hasta las regiones de latitudes tropicales. Estas fases o estados climáticos se iniciaban y finalizaban con transformaciones que se producían por factores naturales como el Sol, la órbita de la Tierra o fenómenos tectónicos. Algunas veces estos cambios climáticos permitieron el florecimiento de múltiples formas de vida, pero en otras ocasiones las alteraciones fueron parte de eventos catastróficos que desencadenaron la desaparición de una parte importante de los seres vivos del planeta. En ese sentido, los cambios climáticos no son inofensivos y tienen consecuencias para los organismos que viven en la Tierra; por tanto, argumentar que el actual cambio climático no es peligroso porque el planeta ya ha vivido muchos es algo que no resiste ningún análisis.

Si bien el presente libro constituye una fuente de información para todo aquel que quiera contrarrestar afirmaciones negacionistas, su objetivo no es responder punto por punto estas afirmaciones; pues tampoco el foco central es el calentamiento global de hoy. No es que no vaya a abordar estos problemas en el libro (el último capítulo está totalmente centrado en cómo el ser humano ha modificado el clima del planeta con sus emisiones de gases de efecto invernadero); sin embargo, cuando empecé a escribir, durante la pandemia del covid-19, tenía como foco los climas del pasado más que el presente. Ciertamente, muchos de los temas que abordé en el libro contribuyen a una mejor comprensión de la física del calentamiento global y de los argumentos por los cuales los científicos creen que el incremento de la temperatura del planeta está siendo producido por los seres humanos, aunque en el libro también se abordan varios eventos climáticos que me parecieron interesantes porque ejemplifican muy bien cómo los seres vivos tenemos una historia estrechamente relacionada con el clima del planeta. En mi permanente búsqueda de lecturas noté la escasez de obras de divulgación destinadas a un público general que expusieran de forma clara cómo el clima ha jugado un papel preponderante en la historia de los seres vivos. Aún más difícil es encontrar libros que hagan una revisión general de la historia climática de la Tierra de forma más o menos cronológica y que permitan dibujar mentalmente un mapa de las variaciones del clima en el pasado de nuestro planeta. Bajo este escenario fue que me introduje en la tarea de construir un material que ordenara el conocimiento de la historia climática de la Tierra y que expusiera los eventos climáticos que a mi parecer son los más relevantes para entender por qué nuestro planeta es como es hoy.

El libro se inicia con tres capítulos que calificaría de introductorios a la ciencia del clima y que incluyen conceptos que son transversales a todo el texto. Desde el capítulo 4 en adelante me propongo hacer una revisión cronológica de distintos periodos y eventos climáticos que ha experimentado nuestro planeta y de los procesos que llevaron a la Tierra a esos periodos y eventos. A grandes rasgos podemos decir que el planeta ha tenido periodos con capas de hielo y glaciares sobre su superficie y periodos en que estas capas y glaciares han estado ausentes (**Figura 1**). Los momentos en que la Tierra no ha tenido capas de hielo permanentes sobre su superficie los llamaremos periodos de

invernadero¹ y los momentos en que el planeta ha tenido capas de hielo permanentes los denominaremos eras de hielo o glaciaciones².

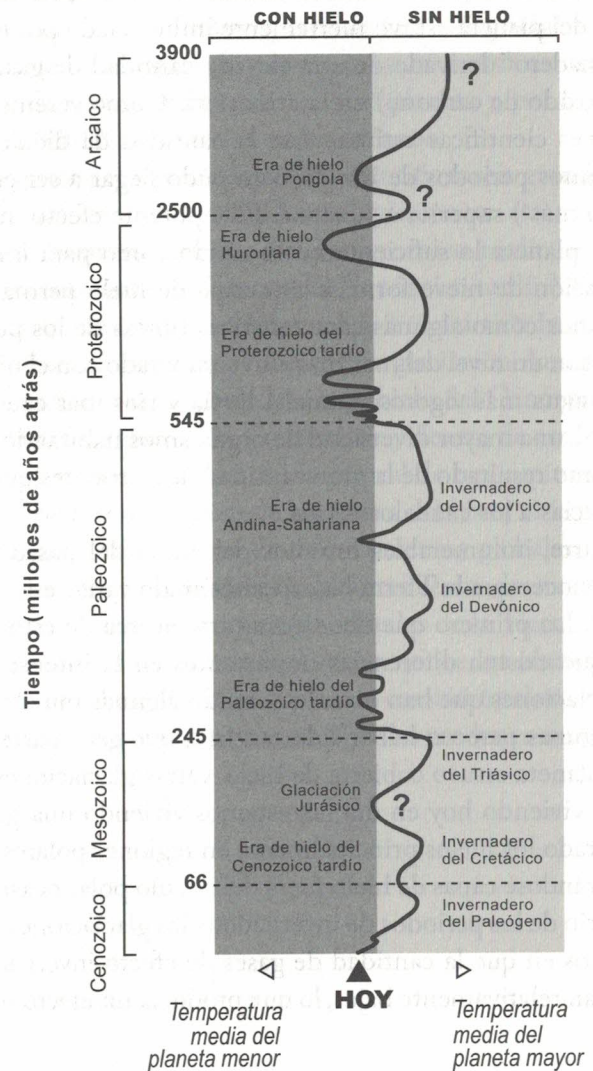


Figura 1. Glaciaciones e invernaderos a lo largo de la historia climática de la Tierra. Los signos de interrogación señalan periodos en los cuales existen muchas dudas e incertezas acerca del clima de ese momento.

1 En inglés el término es *greenhouse Earth*.

2 En inglés se utiliza el término *icehouse Earth*.

De los 4500 millones de años de existencia de la Tierra, unos 3500-3600 millones han transcurrido bajo un clima planetario considerado de invernadero (70-80 %). Tal como su nombre lo indica, en estos periodos el clima del planeta estuvo fuertemente influenciado por un potente efecto invernadero³ derivado de una elevada cantidad de gases (principalmente dióxido de carbono) en la atmósfera. Como veremos, algunas investigaciones científicas estiman que la cantidad de dióxido de carbono en algunos periodos de invernadero pudo llegar a ser entre tres a diez veces (o más⁴) superior a la actual. Este potente efecto invernadero generaba un planeta lo suficientemente cálido como para impedir que una acumulación de nieve formase una capa de hielo permanente. En el libro veremos cómo algunas características típicas de los periodos de invernadero son un nivel del mar más alto comparado con el nivel actual, un ciclo del agua más vigoroso (mucho lluvia y ríos más caudalosos) y, por lo general, una mayor diversidad de organismos habitando los mares y océanos como resultado de la gran cantidad de nutrientes que llegaban al océano gracias a los caudalosos ríos.

Por su parte, innumerables estudios del clima del pasado nos han permitido conocer que la Tierra ha experimentado varias eras de hielo o glaciaciones⁵. Lo primero que debe destacarse acerca de estos periodos helados es que existen diferencias importantes en la intensidad de las distintas glaciaciones que han ocurrido, siendo algunas muy frías y otras no tanto. Algunas parecen haber sido tan frías que gran parte de la superficie del planeta estuvo cubierta de hielo. Otras glaciaciones, como la que estamos viviendo hoy en día (sí, estamos viviendo una glaciación), han concentrado los hielos principalmente en regiones polares y de gran altitud, generándose capas de hielo fuera del círculo polar ocasionalmente. Al contrario de los periodos de invernadero, las glaciaciones coinciden con momentos en que la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera eran relativamente bajas, lo que producía un efecto invernade-

3 Profundizaremos acerca de qué es el efecto invernadero; por ahora es importante saber que los periodos de efecto invernadero se caracterizan por un efecto invernadero potente.

4 Siempre hay mucha discusión acerca de la exactitud de las estimaciones de la concentración de dióxido de carbono atmosférico de periodos pasados.

5 El término glaciación es usualmente utilizado para referirse a los periodos glaciales. En el libro reservaremos el término glaciación como sinónimo de era de hielo y lo consideraremos diferente al término periodo glacial. Un periodo glacial es una fase dentro de la glaciación Cuaternaria en la cual crecen los casquetes de hielo continental en regiones no polares como la Patagonia, Norteamérica y el norte de Europa.

ro debilitado. Por esta razón, muchas de las hipótesis acerca de por qué se originan estas fases climáticas frías se basan en la idea de la ocurrencia de algún fenómeno que provocó una captura de dióxido de carbono desde la atmósfera. Junto con un menor nivel del mar, las glaciaciones implican también un ciclo del agua menos vigoroso, ríos con menos caudal, un incremento de la superficie árida sobre el planeta y, por lo general, una menor diversidad de seres vivos en los océanos.

En el registro geológico⁶ es posible identificar seis grandes edades de hielo o glaciaciones. Ordenadas cronológicamente estas son: Pongola, Huroniana, Neoproterozoico o del Proterozoico tardío, Andina-Sahariana, Paleozoico tardío o Karoo y del Cenozoico tardío⁷. Esta última se inicia con la aparición de los hielos sobre la Antártida hace 34 millones de años, recibiendo también el nombre de glaciación Antártida. Los últimos 2,58 millones de años de la era de hielo del Cenozoico tardío reciben el nombre de glaciación Cuaternaria y dentro de esta han ocurrido los llamados periodos glaciales, tema central de tres capítulos.

Con este pequeño resumen de los temas del libro, el lector puede comenzar por este viaje repleto de calentamientos globales, glaciaciones, extinciones, erupciones volcánicas, levantamiento de montañas, movimientos continentales y movimientos orbitales de la Tierra. He realizado cursos de historia climática de la Tierra y todos los alumnos me dicen que su visión del clima de nuestro planeta cambió totalmente después de terminadas las clases. Espero que este libro les produzca un efecto similar.

6 El registro geológico es la secuencia de estratos o capas de rocas y sedimentos que nos permiten conocer acerca del pasado de la Tierra.

7 Los nombres de algunas de estas glaciaciones hacen referencia al periodo o era en que ocurrieron, por lo que en el anexo 1 se presenta una descripción general de la escala geológica, útil para ordenarse cronológicamente respecto de los eventos que serán tratados.

Capítulo 1.

Clima y sistema climático

Promedios

Probablemente todos estamos de alguna forma familiarizados con el concepto de media o promedio. Es común que para determinar si una persona reprueba o aprueba una asignatura se determine el promedio de los controles o pruebas que la persona realizó a lo largo del curso. El promedio vendría siendo un valor que representa el rendimiento general del alumno. Pues bien, el concepto de clima está muy asociado al promedio. Se entiende como el clima de una zona a la condición meteorológica media de ese lugar o territorio. Cuando tenemos mediciones de variables como temperatura, precipitación, presión atmosférica, humedad, nubosidad, radiación, velocidad y/o dirección del viento, determinamos la condición meteorológica media calculando el promedio de las mediciones de cada una de las variables. Por un acuerdo entre científicos dedicados a las ciencias del clima se estimó que es adecuado contar con al menos treinta años de datos para calcular un promedio que pueda ser utilizado para describir un clima. A ese promedio de al menos treinta años lo llamamos promedio climatológico. El campo de ciencia que se encarga de calcular esos promedios se llama climatología. Por ejemplo, la ciudad de Viña del Mar presenta un promedio climatológico de temperatura cercano a los 15 °C. Esta afirmación suele decirse de forma más resumida de la siguiente forma: “La temperatura media de Viña del Mar es de 15 °C”. Una temperatura media de 15 °C no quiere decir que siempre la temperatura sea de 15 °C o que la temperatura media de cada día sea 15 °C⁸. Por ejemplo, en verano la ciudad de Viña del Mar experimenta temperaturas superiores a 30 °C con una media del día mayor a 20 °C. Durante el invierno, la ciudad experimenta temperaturas inferiores a 7 u 8 °C un par de horas al día. Por tanto, debe entenderse la temperatura media como un valor que representa a las temperaturas de esa zona o

8 La temperatura media del día es la temperatura que se calcula promediando las temperaturas que se miden a lo largo de un día.

territorio. Seguramente se estará usted preguntando por qué buscamos que un valor represente las temperaturas de una zona. ¿No sería más adecuado trabajar y observar todos los datos que tenemos para describir el clima de un lugar? Dos simples razones pueden ayudarnos a entender por qué se calculan métricas que representan un conjunto de datos. La primera de ellas está relacionada con el volumen de información; si trabajamos o mostramos todos los valores que tenemos medidos, nuestro cerebro no sería capaz de retener toda esa información. Hagamos el siguiente cálculo: si anoto la temperatura cada hora del día tengo 24 datos de temperatura en un día. En un año tendré 8760 datos y en treinta años acumularé 262 800 datos. Este es un enorme volumen de información, por lo que necesitamos comprimirla para poder recordarla. Así, al promediar mediciones estamos comprimiendo la información. Por lo tanto, cuando decimos que la ciudad de Viña del Mar tiene una temperatura media de 15 °C estamos indicándole a nuestro cerebro que puede suponer que los valores de temperatura giran en torno a ese valor, algunos grados más, algunos grados menos. Pero ¿cuántos grados más o menos? Las temperaturas en Viña del Mar podrían moverse muy cerca de los 15 °C o muy lejos de los 15 °C. Es claro que el promedio es insuficiente para hacernos una idea del clima de un lugar, por lo que necesitamos también contar con los valores mínimos, máximos y la desviación estándar, una medida de la lejanía o distancia de los datos respecto del promedio. El otro motivo por el que los científicos calculamos métricas para representar un conjunto de datos es que esto nos permite realizar ejercicios de comparación fácilmente. Por ejemplo, la temperatura media medida en Eureka, una estación científica ubicada en Nunavut, Canadá, es de -18.8 °C. Comparando esta temperatura con la temperatura media de Viña del Mar nos queda muy claro que si queremos ir a Eureka tendremos que ir bien abrigados.

Debe destacarse que el promedio es una buena medida para representar un conjunto de datos si este conjunto tiene una distribución de datos en forma de campana de Gauss, es decir, los datos que están concentrados en torno a un valor central variando hacia los extremos de forma simétrica (**Figura 2**). Cuando la distribución de los datos no es simétrica el promedio no refleja donde están concentrados los datos. En este caso se recomienda calcular otros parámetros que muestren de mejor forma los datos (podemos calcular la mediana). La elección de la mejor forma de representar los datos del clima también es parte de lo que analiza la climatología. Por lo tanto, la climatología no solo calcula promedios sino que su objetivo es obtener

la condición general de la atmósfera utilizando métricas que representen de forma adecuada al conjunto de datos disponibles. Junto con lo anterior, la climatología analiza cómo los datos se desvían o difieren del promedio.

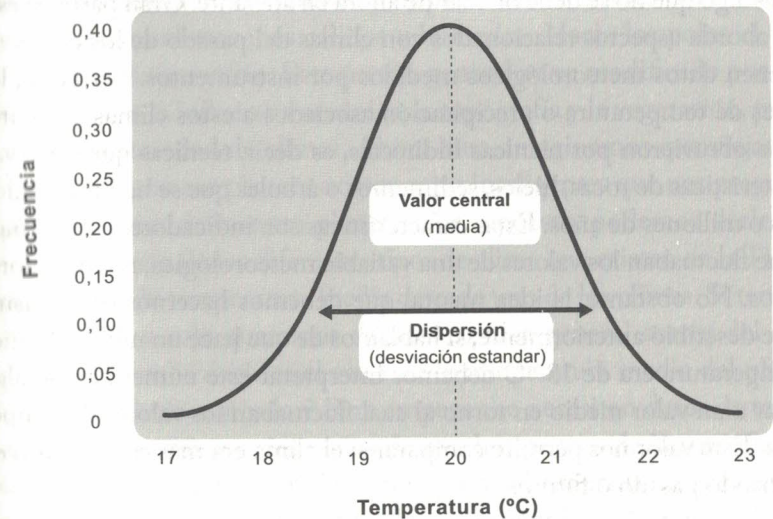


Figura 2. Gráfico de la distribución normal o de campana de Gauss de un grupo de datos medidos. Para este ejemplo son datos de temperatura. En el gráfico, la línea curva indica la frecuencia de datos, es decir, la cantidad de datos que tienen un cierto valor dividido por la suma total de datos medidos. Por ejemplo, cerca del 40 % de los datos (0,40) tiene un valor que es cercano a 20 °C (puede ser un poco mayor o un poco menor a ese valor). En el gráfico también podemos ver que la mayoría de los datos tienen un valor entre los 18 °C y los 22 °C. Entre los 17-18 °C y los 22-23 °C hay pocos datos (la curva está cerca del 0). Decimos por tanto que la mayoría de los datos están concentrados entre los 18 °C y los 22 °C. El ancho de la campana de Gauss (representada en la línea con doble flecha) se denomina dispersión, y una medida de la dispersión es la desviación estándar. Si la línea doble flecha fuese más larga (la campana más ancha), los datos estarían más dispersos. Si la línea fuese más corta (la campana más delgada), los datos estarían más concentrados. Si tomáramos todos los datos medidos y calculamos el promedio de todos ellos obtenemos la media. En una distribución normal la media está ubicada en el centro, es decir, la media es el valor central o mediana. Por lo tanto, cuando nos entregan la media de un grupo de datos es muy importante saber cómo es la forma de la distribución de los datos. Si los datos tienen una distribución normal sabremos que esa media es el valor central y que el resto de los datos fluctúan alrededor de este valor de forma simétrica, es decir, la cantidad de datos que hay bajo la media es la misma que la cantidad de datos que hay sobre la media.

Sobre la base de los valores calculados por la climatología solemos calificar o clasificar los climas utilizando conceptos como frío, cálido, templado, lluvioso, tropical, seco, árido, etcétera. Ahora bien, ¿qué sucede cuando queremos calificar cómo era el clima de un lugar hace miles o millones de años? Es evidente que hace miles de años no se contaba con termómetros para medir la temperatura o pluviómetros para medir la precipitación. En

esos casos la metodología de cálculo de promedios no se puede utilizar. Los científicos han tenido que crear múltiples técnicas para obtener alguna noción, aproximación o visión general de cómo era el clima del pasado y esto es algo que no se debe olvidar de ahora en adelante. Gran parte de este libro aborda aspectos relacionados con climas del pasado de los cuales no se tienen datos meteorológicos medidos por instrumentos. Por tanto, los valores de temperatura o precipitación asociados a estos climas son datos que se obtuvieron por técnicas indirectas, es decir, técnicas que observan características de rocas, hielos, sedimentos o árboles que se han mantenido miles o millones de años. Estas características son indicadores de un rango en que fluctuaban los valores de una variable meteorológica, no son valores exactos. No obstante, la idea mental que debemos hacernos es la misma que se describió anteriormente; si hablamos de que hace un millón de años la temperatura era de 13 °C debemos interpretar este número como algo similar a un valor medio en torno al cual fluctuaban los valores de temperatura. Este valor nos permite comparar si el clima era más cálido o frío en un periodo pasado o futuro.

TIEMPO Y CLIMA

Ya sabemos que si estudiamos la condición media de la atmósfera en un lugar por un periodo de treinta años o más conoceremos el clima de ese lugar. Ahora bien, si nos focalizamos en lo que sucedió un día puntual, por ejemplo, el 14 de mayo de 2016, dejamos de hablar de clima y utilizamos las palabras tiempo atmosférico o simplemente tiempo. El campo de la ciencia que estudia los fenómenos físicos de la atmósfera que ocurren en un periodo de tiempo corto (días a un par de semanas) se llama meteorología. A modo de resumen, si queremos tener una idea de cómo es el clima de una zona debiésemos vivir muchos años en esa zona. Lo que experimentamos día a día, a cada hora, es el tiempo. Así, la diferencia entre la ciencia climática y la ciencia meteorológica radica en la escala temporal del análisis. A pesar de esta separación, tiempo y clima están relacionados; una sucesión de tiempos produce el clima y el clima a su vez es el escenario base en torno al cual el tiempo atmosférico fluctúa.

CLIMA PLANETARIO

En la actualidad el planeta Tierra tiene zonas de clima templado, seco y frío, seco y cálido, frío y húmedo y tropical. Hacia la línea del ecuador se concentran los climas más cálidos y húmedos. Hacia los polos el clima se vuelve más seco y frío. Este patrón general se ve modificado por otros factores como la influencia oceánica, la topografía y la vegetación, produciendo una variedad de climas. Ahora bien, imaginemos que viajamos a otro planeta y en ese planeta existen seres inteligentes que nos preguntan cuál es el clima de nuestro planeta. Por supuesto, podemos darles una larga explicación de los diferentes tipos de clima que existen en la Tierra y especificarles la temperatura media de cada uno de los climas. Si tenemos poco tiempo y solo queremos darles una idea general acerca del clima terrestre podemos decirles el valor de la temperatura media del planeta. ¿Cómo se calcula este valor? Para empezar, se necesitan datos de temperatura de a lo menos treinta años de muchos puntos de la superficie del planeta. Cada serie de datos de temperatura debe tener la misma cantidad de datos y debe ser representativa de igual superficie. Para entender esto último pensemos lo siguiente: si vamos a calcular la temperatura media del planeta y tenemos más mediciones del hemisferio norte de la Tierra, el promedio obtenido representará más lo que sucede en el hemisferio norte que lo que sucede en todo el planeta. Para evitar este problema, se debe utilizar igual cantidad de puntos de medición para cada zona o región del planeta, para que ninguna zona sea más representada que otra. Teniendo esta precaución, la temperatura media del planeta se calcula promediando los promedios climatológicos de la temperatura de muchos puntos de la Tierra espaciados de forma regular (grilla). En otras palabras, se calculan dos promedios; un promedio temporal y un promedio espacial. Cuando realizamos este procedimiento obtenemos que en la actualidad la temperatura media del planeta es cercana a los 15 °C. Este dato es útil porque podemos usarlo para compararlo con la temperatura media del planeta Marte (-55 °C) o con la temperatura media de la Tierra en el Cretácico hace 80 millones de años (23-25 °C). Así, la temperatura media del planeta es un valor que refleja una condición general del planeta (más cálido o frío) sin olvidar que es un valor calculado a partir de datos de temperatura que pueden ser muy diferentes a ese promedio.

Ya sea si queremos entender el clima global o el clima de alguna región específica del planeta, debemos tener presente que el clima es el resultado de las interacciones que se establecen entre muchos elementos. Todos estos elementos y sus interacciones se agrupan en un concepto llamado sistema climático. Así, el clima es básicamente el resultado de las interacciones que se producen en el sistema climático. Pero ¿qué es un sistema?

Un sistema es una entidad que está constituida por múltiples partes, elementos o componentes que interactúan entre sí. En particular, el sistema climático es una entidad que agrupa varios componentes que interactúan y que al funcionar definen o determinan eso que llamamos clima. Como el sistema climático está ubicado en el espaciotiempo, cambia a medida que avanza el tiempo y puede ser susceptible de mediciones. Estas características permiten decir que el sistema climático es un sistema físico. Existen varios tipos de sistemas físicos los cuales se diferencian en la existencia o no de intercambio de energía o materia con los alrededores del sistema. Los alrededores del sistema es todo aquello que no es parte del sistema. El sistema climático es uno físico, que se asume o se aproxima a un sistema cerrado, es decir, es uno que no intercambia materia con el entorno, pero sí intercambia energía. La verdad es que la atmósfera sí intercambia un poco de materia con el espacio exterior; sin embargo, este intercambio es mínimo y por lo tanto podemos asumir que es un sistema cerrado.

COMPONENTES DEL SISTEMA CLIMÁTICO

El sistema climático está constituido por cinco componentes que interactúan de diversas formas entre sí. Estos componentes son la atmósfera, la hidrósfera, la criósfera, la litósfera y la biósfera.

La atmósfera es una capa gaseosa que rodea a un planeta. En el caso de la Tierra, esta capa está constituida principalmente por nitrógeno y oxígeno. En menor cantidad también podemos encontrar agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), gases nobles y ozono (O_3). La importancia de la composición química de la atmósfera en el clima planetario se analizará a lo largo de todo el libro. A modo de resumen, podemos decir que la interacción que se produce entre los gases de la atmósfera y la radiación que llega desde el Sol es fundamental para

que el planeta sea un lugar habitable. Esta interacción implica la absorción⁹, emisión y dispersión¹⁰ de radiación por parte de las moléculas. Un aspecto fundamental de la composición atmosférica de la Tierra es que la cantidad de los distintos gases va variando en el tiempo por una multiplicidad de procesos que incorporan gases a la atmósfera o retiran gases desde la atmósfera. Los componentes de la Tierra que incorporan gases a la atmósfera se denominan fuentes y los componentes que retiran gases de la atmósfera y los almacenan se denominan sumideros. Otro aspecto de la atmósfera es que esta es una capa gaseosa que se mueve, es decir, es un fluido. El movimiento de la atmósfera no solo implica transporte de masa entre un punto y otro, sino que también involucra transporte de energía. A nivel planetario, el movimiento de las masas de aire en la atmósfera recibe el nombre de circulación atmosférica y juega un papel decisivo para entender el clima del planeta.

La atmósfera puede dividirse esquemáticamente en cinco capas, cada una con propiedades y características diferentes (**Figura 3**). La capa más superficial y donde ocurren principalmente los fenómenos meteorológicos y climáticos es la tropósfera. La tropósfera posee el 90 % de la masa de la atmósfera, por lo que es ahí donde están la mayoría de los gases que tienen importancia en los procesos climáticos. La capa que está sobre la tropósfera se denomina estratósfera y es ahí donde se ubica la capa de ozono. Cuando compuestos químicos o partículas logran llegar a la estratósfera pueden permanecer mucho tiempo en ella debido a que el intercambio de materia entre la tropósfera y estratósfera es limitado. Las erupciones volcánicas constituyen uno de los fenómenos que pueden lanzar compuestos y partículas a la estratósfera.

9 La absorción es un proceso mediante el cual la energía en forma de radiación es capturada por moléculas y átomos.

10 La radiación solar está compuesta por radiación con distintas longitudes de onda. Esta radiación viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden separar o descomponer la radiación solar según sus longitudes de onda y cambiar la dirección de (desviar) esta radiación. Esto es lo que se denomina dispersión.

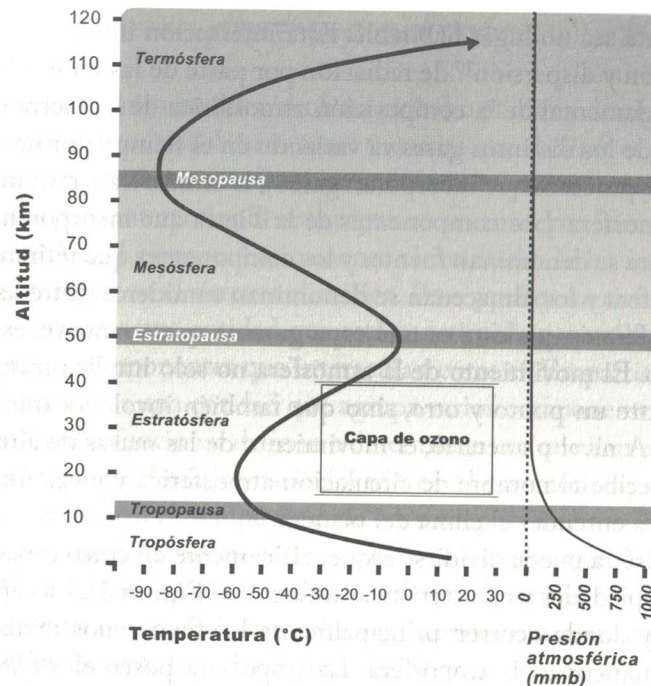


Figura 3. Capas de la atmósfera. La unidad de la presión atmosférica es el milibar. Los fenómenos climáticos ocurren en la tropósfera. El 90 % de la masa de la atmósfera está en la tropósfera.

La hidrósfera es el componente del sistema climático que agrupa a todas las masas de agua líquida de la superficie del planeta, es decir, océanos, mares, lagos, lagunas, ríos y acuíferos. El agua juega un papel trascendental en el clima debido a que esta molécula posee una alta capacidad calorífica, es decir, se necesita mucha energía para elevar en 1 °C la temperatura del agua. Por esta gran capacidad de retener energía, los océanos son un reservorio de energía que permite regular la temperatura del planeta. Además, disueltos en los océanos y cuerpos de agua, existen muchos elementos o moléculas que fluyen desde o hacia la atmósfera y la litósfera. Estos intercambios de moléculas entre los componentes del sistema climático tienen efectos en el clima planetario.

Al igual que la atmósfera, la hidrósfera también es escenario de movimientos de masa. En los océanos los movimientos de grandes cantidades de agua se llaman corrientes marinas. Junto con transportar masa, una corriente marina también transporta energía. A nivel planetario, el patrón de movimiento de los océanos recibe el nombre de circulación oceánica y junto con la circulación atmosférica llevan a cabo el transporte de

calor entre los distintos puntos del planeta. En el libro mencionaremos algunas corrientes marinas importantes al explicar la ocurrencia de ciertos eventos o procesos climáticos.

La criósfera constituye el componente del sistema climático que agrupa a todas las masas de agua en estado sólido incluyendo hielos¹¹, glaciares y permafrost¹². La red de interacciones que hay entre la criósfera y los demás componentes del sistema climático es múltiple. Para empezar, los hielos son reservorios de agua que si se derritieran implicarían un cambio en el nivel del mar y modificaciones en parámetros físicos de las aguas como su densidad y salinidad. Los cambios en la densidad y salinidad del agua de mar pueden afectar a las corrientes marinas, lo que a su vez trae consecuencias a nivel climático. Los hielos, además, participan en el balance de energía del planeta (algo que se abordará un poco más adelante), puesto que las superficies blancas reflejan al espacio parte de la energía que llega desde el Sol. Este fenómeno se denomina efecto del albedo del hielo y a lo largo del libro veremos que juega un papel significativo en la historia climática de la Tierra.

La litósfera es la capa superficial sólida de la Tierra y está formada por la corteza y la zona más externa del manto (**Figura 4**). Su espesor va de 50 a 100 km y su límite externo es la superficie del planeta. La litósfera está fragmentada en una serie de placas tectónicas en cuyos bordes se concentran fenómenos geológicos como el magmatismo (incluido el vulcanismo), la sismicidad y la orogénesis¹³. Los procesos que ocurren

11 Existen diversas denominaciones para las distintas extensiones de hielo. El hielo que se forma sobre el océano recibe el nombre de banquisa. La banquisa suele ser delgada y como mucho alcanza los veinte metros de espesor, siendo su espesor promedio cercano a tres metros. La banquisa es distinta al iceber, pues este último es hielo que se desprende de una plataforma de hielo. Una plataforma de hielo es una gran plataforma flotante que se forma donde un glaciar o capa de hielo fluye hacia la costa. En otras palabras, los icebergs son porciones de glaciares que se encontraban en el continente y que al desprenderse quedan en el océano. Respecto de los hielos continentales, cuando su extensión es inferior a 50.000 km² reciben el nombre de campos de hielo. Cuando los hielos continentales tienen una extensión superior a 50.000 km² se habla de casquete glaciar, manto de hielo o *inlandsis*. En la actualidad existen dos casquetes glaciares: el casquete de Groenlandia y el casquete de la Antártida. Finalmente, los hielos sobre montaña reciben el nombre de glaciar de montaña.

12 El permafrost es una capa de suelo que está permanentemente congelada.

13 La orogénesis es el proceso geológico por el cual una zona alargada de la corteza terrestre se acorta y engrosa por deformación y fracturación como consecuencia de esfuerzos tectónicos laterales. Este es el mecanismo principal de formación de las cordilleras en los continentes.

en la litósfera, como la desintegración de las rocas y el vulcanismo, tienen efectos en la composición química de la hidrósfera y la atmósfera. Además, el movimiento de las placas tectónicas y la orogénesis tienen efectos a largo plazo en la circulación atmosférica y oceánica. En el libro se expondrán diversas hipótesis acerca de cómo el movimiento de las placas tectónicas y los procesos de la litósfera jugaron un papel relevante en cambios climáticos.

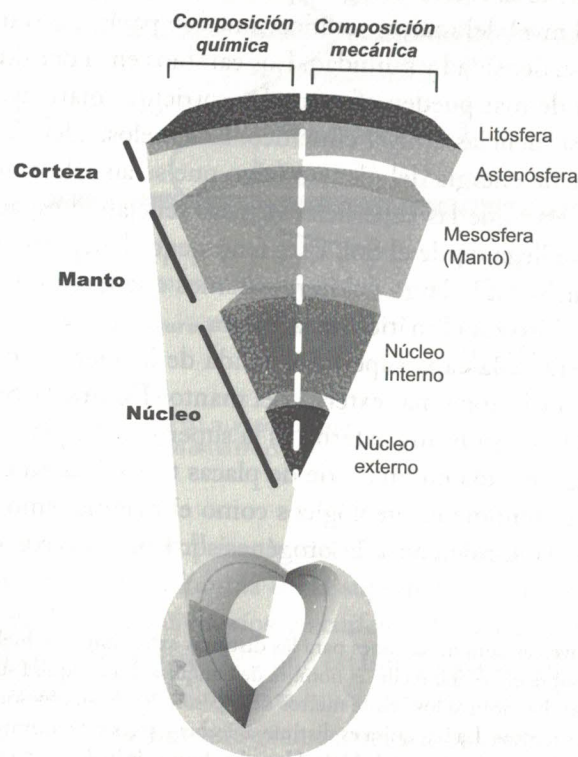


Figura 4. Capas internas del planeta Tierra. Figura basada en la imagen 16 del libro *Vida: su origen, evolución y búsqueda en el espacio*.

Finalmente, la biósfera hace referencia a todos los seres vivos del planeta. Podría no ser tan obvio cómo la presencia de los seres vivos juega un rol en el clima, así que me esforzaré en ilustrar muchas interacciones que hay entre los seres vivos y el clima. Los seres vivos modificamos la composición química de la hidrósfera, litósfera y atmósfera generando elementos o moléculas que son liberadas al ambiente. Además,

contribuimos a acelerar procesos físicos que tienen importancia en el clima. Por ejemplo, las raíces de las plantas contribuyen a desintegrar físicamente rocas, proceso que contribuye a que el CO_2 pase desde el aire hacia las rocas (veremos cómo ocurre este proceso).

Cada uno de los cinco componentes del sistema climático posee sus propios campos de estudio, razón por la cual la ciencia del clima constituye una disciplina que integra conocimiento de áreas específicas muy diferentes entre sí. En este sentido, el presente libro no deja de ser un reto al intentar condensar información científica que proviene de distintos campos. Para contribuir a una lectura fácil asumí que el lector no proviene de ningún campo específico de la ciencia y, por lo tanto, me tomé el tiempo de ir explicando o definiendo conceptos básicos de los distintos campos de las ciencias naturales a medida que van apareciendo en el relato de la historia del clima de la Tierra.

CONTABILIDAD ENERGÉTICA

Ya sabemos que la interacción de los cinco componentes del sistema climático mencionados produce el clima, es decir, la condición media de la atmósfera. Pero ¿cómo exactamente el sistema climático produce el clima?

La condición general o media de la atmósfera en una región o lugar depende de la cantidad de energía que tenga la atmósfera en ese lugar. Por ejemplo, en las zonas tropicales la atmósfera tiene más energía y eso produce que las temperaturas sean más elevadas en esas regiones. La cantidad de energía de que dispone la atmósfera en un lugar es resultado de un balance de energía en el cual intervienen distintos procesos que distribuyen o reparten energía entre los cinco componentes del sistema climático. En este sentido, debemos entender al sistema climático como una gran máquina que distribuye energía entre los distintos puntos de la superficie del planeta. Esa distribución o repartición de energía hace que la atmósfera de un lugar en específico se quede con una cierta fracción de energía y es esa fracción la que genera el clima de ese lugar. A nivel planetario, el fenómeno es el mismo. La Tierra recibe energía y esta se reparte entre los distintos componentes del sistema climático conduciendo a que la atmósfera se quede con una fracción de energía. Esta fracción produce el clima del planeta.

Si el sistema climático es una máquina que reparte energía, ¿cuál es la fuente de esa energía? La energía del sistema climático proviene de dos

fuentes: el Sol y el interior de la Tierra. La mayor parte de la energía que mueve el sistema climático proviene del Sol y nos llega principalmente en forma de radiación ultravioleta y radiación visible¹⁴. La cantidad de radiación que llega desde el Sol a la parte más alta de la atmósfera no es la misma que llega a la superficie terrestre. En su viaje a través de la atmósfera la radiación solar va interactuando con las moléculas y átomos que constituyen la atmósfera.

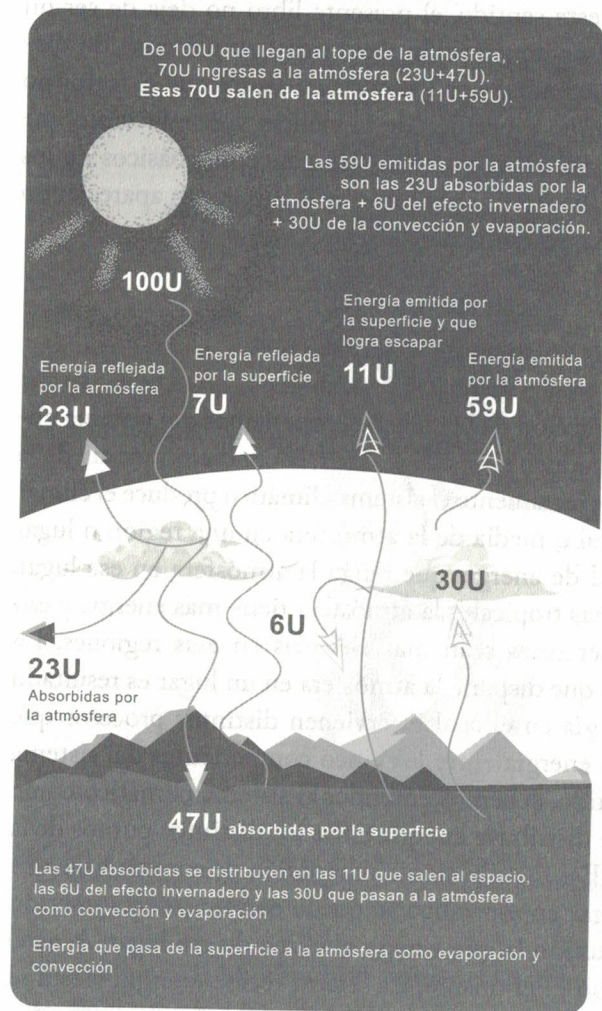


Figura 5. Balance final de energía del sistema climático. La energía que ingresa es igual a la que sale del planeta.

14 La radiación ultravioleta es radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 100 nm y los 400 nm. En tanto, radiación visible es radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano. La longitud de onda de esta radiación está comprendida entre 400 y 700 nm aproximadamente.

En la actualidad, de 100 unidades de radiación que ingresan a la atmósfera (**Figura 5**), 23 son devueltas al espacio por las nubes y por las moléculas de la atmósfera (23 %) y 7 unidades son reflejadas por la superficie devolviéndolas al espacio (7 %). El porcentaje de la radiación incidente que refleja una superficie se llama albedo y su valor es muy diferente según el tipo de superficie. Las superficies blancas reflejan mucha más radiación que las superficies oscuras. Seguramente si usted ha visitado glaciares, superficies con nieve o un salar blanco (como el salar de Uyuni en Bolivia) le habrán recomendado que utilice lentes para protegerse de la intensa radiación que reflejan estas superficies. Los científicos han estimado que si la superficie del planeta estuviese cubierta un 100 % por océano la temperatura media de la Tierra sería cercana a 27 °C como consecuencia de un albedo superficial menor. Por el contrario, si el planeta estuviese cubierto de hielo, la temperatura media de la Tierra descendería a valores inferiores a -40 °C.

Continuando con la contabilidad, de las 70 unidades que no fueron devueltas al espacio por la atmósfera y por la superficie (no olvide el 70), 23 son absorbidas por la atmósfera (23 %) y 47 unidades son absorbidas por la superficie (47 %). La energía que es absorbida por la superficie no queda retenida en ella y una parte (17 unidades) es reemitida por ella, pero no como radiación ultravioleta y visible sino como infrarroja¹⁵. No todas esas 17 unidades escapan al espacio; solo 11 lo logran. Las 6 unidades restantes son absorbidas por moléculas de la atmósfera y devueltas hacia la superficie. Este proceso se denomina efecto invernadero y los gases que tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja que emite la Tierra se llaman gases de efecto invernadero. El efecto invernadero se produce porque moléculas como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O_3), vapor de agua y algunas moléculas orgánicas tienen la capacidad de capturar radiación infrarroja. Cuando se produce esta captura las moléculas pasan a un estado excitado, es decir, pasan de un nivel de menos energía a un nivel de más energía que se manifiesta en que esa molécula cambia de posición (rota) o vibra más (se mueve más). Un estado excitado es un estado inestable, por lo que la molécula reemite la energía absorbida y vuelve a su estado no excitado. Este efecto es muy importante para que la Tierra sea un lugar habitable pues, sin los gases de efecto invernadero, la temperatura

15 La radiación infrarroja es radiación electromagnética menos energética que la radiación ultravioleta y visible y cuya longitud de onda está comprendida entre 700 nm y 1 mm.

promedio del planeta sería de -18°C , no los agradables 15°C que experimentamos hoy.

Las 30 unidades de energía que no fueron emitidas por la superficie como radiación infrarroja pasan a la atmósfera por medio de los procesos físicos de convección¹⁶ y evaporación¹⁷. De esta forma, la atmósfera se queda con estas 30 unidades, que junto a las 23 unidades absorbidas antes de que la radiación llegara a la superficie y las 6 unidades del efecto invernadero, suman un total de 59 unidades (59 %). Estas 59 unidades son reemitidas por la atmósfera y las nubes hacia el espacio como radiación infrarroja. Así, si sumamos lo que emite la atmósfera (59) y la superficie (11) al espacio nos da un total de 70 unidades, valor similar a la cantidad de energía que fue absorbida por la atmósfera y la superficie inicialmente. En otras palabras, toda la energía que ingresa al sistema Tierra-atmósfera es devuelta o reemitida al espacio. Si la energía que ingresa al planeta no fuese devuelta al espacio, el planeta estaría siempre calentándose. Por el contrario, si el planeta devolviese más energía de lo que está recibiendo, la Tierra estaría en un proceso de enfriamiento permanente.

El balance o contabilidad de energía que acabamos de ver se conoce como balance energético del sistema Tierra-atmósfera y depende de los distintos componentes del sistema climático. Si los componentes del sistema climático experimentan variaciones, cambian los porcentajes en que la energía es absorbida, reflejada o emitida hasta alcanzar un nuevo equilibrio. El equilibrio es el estado en que toda la energía que ingresa al sistema sale de él. En la actualidad, es el ser humano el que está alterando esta contabilidad energética, incorporando más gases de efecto invernadero a la atmósfera. Una mayor cantidad de gases de efecto invernadero implica que más unidades de energía quedan en la atmósfera. Una parte de esta energía pasa a ser calor sensible¹⁸, es decir, temperatura. Otra parte de esa energía se transforma en movimiento. Por lo tanto, una atmósfera con más energía es una atmósfera más cálida, pero además una atmósfera con más energía disponible para los procesos que ocurren en ella.

La historia del clima de la Tierra que usted conocerá por medio de este libro es el relato de cómo ha cambiado el balance energético del sistema Tierra-atmósfera y las consecuencias que tuvieron esos cambios. En los 4600 millones de años de historia de la Tierra, el albedo, la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera y la cantidad de radiación solar que recibe el planeta, han cambiado por diversos factores desequilibrando el balance de energía. A estos desequilibrios los llamamos cambios climáticos y sus causas las identificamos como forzantes. Nos introduciremos en las definiciones y conceptos generales acerca de los cambios climáticos en el siguiente capítulo y veremos cuáles son los forzantes naturales que provocan estos fenómenos.

16 La convección es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido.

17 La evaporación es un proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso.

18 El calor sensible es la energía que suministrada a un cuerpo o un objeto hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y, por lo tanto, no provoca un cambio de fase o cambio de estado.

Capítulo 2. Cambios climáticos

Variabilidad y cambio climático

Cursé los primeros años de escolaridad hace unos treinta años, durante la década de los noventa, en mi ciudad natal Viña del Mar. Vivía (y vivo actualmente) muy cerca del establecimiento donde cursé desde el nivel de kínder hasta cuarto medio. Para llegar a mi colegio solo tenía que caminar cuatro cuadras, dos de ellas con una pendiente pronunciada debido a que el colegio se ubica en un cerro. No me gustaba asistir al colegio durante los meses de invierno porque las lluvias eran frecuentes e inevitablemente llegaba mojado a clases, más si parte del trayecto al establecimiento estaba inclinado. Por eso, disfrutaba cuando las autoridades decretaban suspensión de clases, algo que llegó a suceder en muchas ocasiones. Y es que durante los años noventa los temporales en Viña del Mar podían significar tres o cuatro de días de fuertes precipitaciones, con vientos que arrancaban techumbres y deslizamientos de tierra en los cerros. Incluso si no suspendían las clases, era totalmente entendible que muchos alumnos no asistiesen a ellas, considerando que gran parte de la población de Viña del Mar vive en cerros. En la actualidad, los estudiantes de los colegios de Viña probablemente jamás han experimentado una suspensión de clases por lluvia. No es que las autoridades hayan establecido una política de no suspensión de clases: hoy no se suspenden porque prácticamente no ocurren temporales. Las pocas lluvias que hemos tenido los últimos años están lejos de ser los aguaceros que eran durante los años noventa y que me permitían quedarme en casa. Podemos decir que la condición general de la precipitación en Viña del mar cambió. ¿Constituirá esto un cambio climático?

Año a año las condiciones de precipitación y temperatura son diferentes: algunos años son más húmedos y otros más secos; hay años más cálidos y otros más fríos. Esta variabilidad año a año se conoce como variabilidad interanual (entre años) y es parte de la variabilidad climática, un concepto que hace referencia a fluctuaciones del estado medio de la atmósfera y que pueden extenderse por un par de años o una década.

Una fluctuación implica una desviación respecto del promedio pero que no permanece en el tiempo. Para entender de mejor forma este concepto es bueno abordar someramente el patrón de variabilidad climática más conocido, El Niño-Oscilación del Sur o, simplemente, El Niño.

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un patrón climático, es decir, es un fenómeno del clima que es recurrente o que sucede de forma seguida. Básicamente, el ENOS consiste en una oscilación de variables meteorológicas en el Pacífico ecuatorial. Una oscilación de variables significa que la magnitud de esas variables cambia, adquiriendo a veces valores más altos y en otras ocasiones valores más bajos. La variable utilizada por los científicos para describir el fenómeno es la temperatura superficial del mar o TSM, variable que cambia según la fase del ENOS: si durante varios meses seguidos la TSM tiene valores altos respecto del promedio estamos bajo la condición de El Niño o fase positiva del ENOS; si durante varios meses seguidos la TSM tiene valores más bajos del promedio estamos presente bajo la condición de La Niña o fase negativa del ENOS; si los valores de la TSM están cerca del promedio climatológico decimos que estamos en una condición neutra. Las distintas fases del ENOS se van intercalando, haciendo que cada cuatro años más o menos ocurra el fenómeno de El Niño. En ocasiones el fenómeno tarda solo dos años en repetirse y en otras ocasiones se hace esperar hasta siete años.

En Chile, la fase positiva del ENOS o El Niño suele estar asociado a un año con una precipitación superior a la precipitación promedio¹⁹. Este incremento en la cantidad de precipitación no perdura en el tiempo y se extiende solo por el periodo calificado como fase positiva de El Niño (uno o dos años). Por ejemplo, el año 1997 Chile central vivió un invierno notablemente lluvioso a raíz de la influencia de El Niño particularmente fuerte. Los temporales ocurridos en junio y agosto afectaron desde la Región de Atacama hasta la Región de la Araucanía decretándose estado de emergencia y suspendiendo clases en varias ciudades, entre ellas Viña del Mar. La condición extremadamente lluviosa de 1997, con valores muy superiores a la precipitación promedio, permitió salir de un déficit de precipitación desencadenado por cuatro años considerados secos (1993-1996) y que condujeron a decretar estado de emergencia agrícola

19 No siempre un año de El Niño implica precipitaciones excepcionalmente altas respecto del promedio. El año 2015 el planeta estuvo bajo el llamado "Niño Godzilla", una fase positiva del ENOS con valores muy altos de TSM y que no provocó un año lluvioso en la zona central de Chile.

en algunas regiones de Chile. Si en Viña del Mar caían en promedio 490 milímetros (mm) de lluvia por año, el año 1997 cayó más de 800 mm de agua. Este incremento de la precipitación no se mantuvo en el tiempo y el año 1998 el agua caída descendió a valores bajo el promedio.

Pues bien, lo descrito acerca del ENOS y el fenómeno de El Niño del 97 es la variabilidad climática, una variación natural de la magnitud de las variables meteorológicas respecto de sus valores medios. Un cambio climático es una historia distinta pues, en este caso, ocurre un cambio en la condición media de las variables meteorológicas, es decir, hay un cambio en el promedio. Por ejemplo, si entre los años 1970-1999 caían en promedio unos 490 mm de agua en un año en la ciudad de Viña del Mar, entre los años 2000-2019²⁰ el promedio de agua caída por año descendió a 390 mm. Nótese que hago referencia a un promedio que se calcula considerando un conjunto de años pues, tal como se mencionó en el capítulo 1, el clima se describe a partir del análisis estadístico de muchos años. Con lo anterior, podríamos entender como cambio climático a un fenómeno que implica un cambio significativo²¹ de la condición media de la atmósfera de un lugar. Esta definición es adecuada en la actualidad pues hoy disponemos de estaciones meteorológicas que miden variables con las cuales podemos calcular medidas estadísticas año a año. No obstante, como veremos un poco más adelante, la información del clima de hace millones de años no tiene un detalle año a año. Un solo dato del clima de hace millones o cientos de millones de años atrás puede representar la condición general de la atmósfera en un periodo de cientos o miles de años. En estos casos, un cambio significativo de ese dato en algún registro de la historia del pasado de la Tierra (como un testigo de hielo) también es manifestación de la ocurrencia de un cambio climático. Por lo tanto, no debemos restringir el concepto de cambio climático solo a un cambio de promedios anuales de mediciones realizadas con estaciones meteorológicas.

Un cambio climático es un fenómeno en el cual la condición de la atmósfera de un lugar o región pasa de un estado (que llamaremos estado

20 El cálculo es realizado con menos de treinta años puesto que las series de precipitación en Viña del Mar no son tan extensas.

21 El concepto de cambio significativo conlleva que ese cambio realmente implica una diferencia. Los datos medidos siempre tienen un error asociado, fenómeno que puede llevar a concluir que existió un cambio cuando realmente no ha ocurrido uno. Por medio de técnicas estadísticas los científicos pueden asegurarse de que efectivamente existe una diferencia entre dos valores, es decir, que efectivamente existe un cambio.

A) a otro estado (que llamaremos estado B), perdurando por un tiempo lo suficientemente largo el estado B. En el estado A, la atmósfera tiene ciertas características generales (o medias) que podemos medir o estimar y que nos permiten describir ese clima. Por ejemplo, podemos describir el estado A calculando los promedios de temperatura y precipitación anual, los valores máximos y mínimos de esas variables, las fluctuaciones de esas variables y la frecuencia e intensidad de determinados eventos meteorológicos (tormentas, huracanes, sequías). Ocurrido un cambio climático, ya en el estado B, el clima tiene otras características y los valores que medimos o estimamos para describir el estado A son significativamente diferentes a los del estado B. Esto es precisamente lo que hoy estamos viviendo en el planeta, con la diferencia de que todavía no hemos llegado al estado B y van a pasar muchos años antes de llegar a ese estado.

FORZANTES

El clima es el resultado del sistema climático, y por lo tanto un cambio climático es un fenómeno que implica modificaciones en los cinco componentes del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera). Por este motivo, también podemos identificar un cambio climático midiendo o estimando modificaciones significativas en la magnitud de parámetros no atmosféricos como la temperatura del océano, el volumen de las capas de hielo o el nivel del mar. De hecho, el actual cambio climático ha implicado variaciones en la cantidad de gases disueltos en cuerpos de agua, velocidad de reacciones químicas, caudales de ríos y cobertura y tipo de vegetación.

De acuerdo con los informes del IPCC²², el actual cambio climático tiene un origen antropogénico, es decir, son las actividades humanas las que sacaron al planeta de su estado A y lo conducen a un estado B. El consumo de combustibles fósiles y el cambio del uso del suelo han provocado que la concentración de gases de efecto invernadero haya ido aumentando desde la Revolución Industrial, desequilibrando el balance de energía del sistema Tierra-atmósfera. Para poder concluir que es el ser humano el responsable del actual cambio climático, los científicos han tenido que descartar agentes naturales que pueden producir cambios climáticos. El agente o fuerza que produce un cambio climático recibe el

nombre de forzante. Cuando es el ser humano el que está detrás de un cambio climático decimos que el agente causante es el forzante antropogénico. Cuando son fuerzas naturales las causantes de un cambio climático hablamos de forzante natural, reconociendo tres forzantes naturales: el forzante solar, el forzante orbital y el forzante tectónico. Podríamos hablar de un cuarto agente de cambio climático, pero que no es externo sino es parte del sistema climático. Este agente son los seres vivos no humanos. En el libro se abordarán algunos ejemplos donde los seres vivos jugaron un papel importante en el inicio de un cambio climático, no siendo tan claro el papel de un agente externo.

Considerando que el Sol es el gran motor del sistema climático, un cambio en la energía que el Sol emite puede producir un cambio climático. Este es el forzante solar. El Sol es una estrella que está convirtiendo el hidrógeno en helio en su núcleo por medio de un proceso de fusión nuclear²³. Cada segundo el Sol fusiona aproximadamente seiscientos millones de toneladas de hidrógeno en helio convirtiendo cerca de cuatro millones de toneladas de materia en energía. La energía que produce el Sol se transporta como radiación electromagnética por el espacio hasta llegar al planeta Tierra. El viaje de esta radiación desde el Sol hasta la Tierra demora ocho minutos y veinte segundos y la cantidad de energía solar que llega al tope de la atmósfera después de este viaje de ocho minutos se llama constante solar, siendo su valor 1361 W/m^2 en la actualidad. Si bien la constante solar incorpora la palabra constante, la verdad es que este valor no es constante y experimenta variaciones en el tiempo. Algunas de estas variaciones son de muy largo plazo y solo podrían ser percibidas por nosotros si viviéramos millones de años. Se tratará este tema en el capítulo 4 y veremos cómo influyen en el clima los cambios de largo plazo de la energía que emite el Sol. También existen variaciones de la constante solar que ocurren en periodos más cortos de tiempo. Cuando estas variaciones son cíclicas (se repiten cada cierto tiempo) y duran solo un par de años, no producen un cambio climático. Si estas fluctuaciones tienen fases que duran muchos años (treinta), tienen el potencial de producir un cambio climático. En el capítulo 22 se abordará un cambio climático que potencialmente pudo haber estado influenciado por estas variaciones cortas de la constante solar.

22 Panel Intergubernamental del Cambio climático.

23 La fusión nuclear es el proceso por el cual varios núcleos atómicos de carga similar se unen y forman un núcleo más pesado.

El forzante orbital es aquel que está relacionado con cambios en los parámetros orbitales del planeta Tierra. Los parámetros orbitales son una serie de cantidades que permiten describir cómo es la órbita que tiene el planeta alrededor del Sol. Estos parámetros controlan cuánta energía solar llega a la Tierra en cada estación del año y cuánta radiación llega a cada latitud²⁴ del planeta. Los cambios en los parámetros orbitales se originan por efectos gravitacionales de los planetas de nuestro sistema solar y tardan cientos o decenas de miles de años en ser significativos. Hablaremos más de este forzante en el capítulo 19.

Finalmente, el forzante tectónico hace referencia a cambios derivados de la actividad interna del planeta. El interior de la Tierra está constituido por varias capas de distinta composición. Puntualmente, el manto interno y externo se encuentra en constante movimiento generando cambios en la corteza del planeta. Así, el forzante tectónico implica el movimiento de las placas tectónicas, cambios en la orografía (formación de montañas) y creación o destrucción de corteza oceánica. Los cambios tectónicos son muy lentos, haciendo que los cambios climáticos inducidos por este forzante también sean muy lentos. No obstante, algunos eventos volcánicos relacionados con la actividad tectónica provocaron cambios climáticos que fueron lo suficientemente rápidos para tener efectos drásticos en la vida en el planeta. A lo largo del libro describiré varios ejemplos.

TIEMPO DE RESPUESTA

Todos los días experimentamos un ciclo de la temperatura que se llama ciclo diario y que está controlado principalmente por la radiación solar. Durante la noche, cuando no llega radiación solar, la superficie pierde energía calentando las capas más bajas de la atmósfera. A medida que avanza la noche la superficie va disminuyendo su energía, calentando cada vez menos a la atmósfera. Así, un par de minutos después del amanecer, el calentamiento desde la superficie es tan bajo que la temperatura alcanza su mínimo en el día. Ya con el Sol ascendiendo poco a poco en el horizonte

en la mañana, comienza a llegar la radiación, la cual otorga la energía para que la superficie pueda calentar al aire. Un par de horas después del máximo de radiación, la superficie calienta en su grado máximo al aire produciendo el máximo de temperatura del aire que se alcanza durante el día. El tiempo que tarda en responder un parámetro de un componente del sistema climático a un forzante del clima lo llamamos tiempo de respuesta y en el ejemplo del ciclo diario se ilustra que la temperatura del aire responde en un par de horas al cambio de la radiación solar, es decir, la temperatura del aire responde con rapidez a un cambio en la radiación solar.

La atmósfera tarda poco en responder a un forzamiento, desde horas hasta semanas. Parámetros de otros componentes del sistema climático tienen otros tiempos de respuesta. Por ejemplo, frente a la ciudad de Valparaíso, Chile, la temperatura media superficial del mar o TSM es más alta en marzo (16 °C); sin embargo, el mes en el cual el mar recibe más radiación (energía) es enero. En otras palabras, el océano superficial tarda un par de meses en responder totalmente a un forzamiento. Por el contrario, la temperatura del océano profundo responde muy lento, del orden de décadas o siglos, debido a que la mezcla vertical de agua es muy lenta y a que la capacidad calorífica del agua es alta. La biósfera es un componente del sistema climático que puede tardar mucho tiempo en responder frente a un forzante, desde décadas hasta siglos. Y por su parte, la criósfera tiene tiempos de respuesta muy variables. Por ejemplo, los glaciares de montaña pueden tardar décadas o siglos en responder totalmente a un forzante, mientras que la capa superficial de hielo en océanos tarda relativamente poco, de semanas a años (es cosa de observar cómo se congela y descongela parte de la capa superficial de hielos oceánicos del Ártico todos los años). Finalmente, los hielos polares como los que están sobre la superficie de la Antártida pueden tardar en experimentar cambios importantes entre cientos a decenas de miles de años.

El tiempo de respuesta de los componentes del sistema climático es algo que debe tenerse en cuenta cuando se proyectan los impactos del actual cambio climático. Muchos de los impactos del calentamiento global van a tardar años, décadas o siglos en manifestarse. Algunas de las alteraciones que hoy estamos observando en componentes como la hidrósfera, biósfera o criósfera son apenas la respuesta a las emisiones de gases de efecto invernadero de principios o mediados del siglo pasado. Podremos ver gran parte de los impactos de los gases que hoy estamos emitiendo recién a finales de este siglo.

²⁴ Hay que recordar que la latitud es la distancia angular entre la línea ecuatorial (el ecuador), y un punto determinado de la Tierra, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto. La latitud proporciona la localización de un lugar, en dirección norte o sur desde el ecuador.

RETROALIMENTACIÓN

Ya vimos que el causante de un cambio climático se denomina forzante. Este forzante produce una respuesta en los distintos componentes del sistema climático. Por ejemplo, para el actual cambio climático el forzante son los gases de efecto invernadero que los seres humanos hemos inyectado a la atmósfera los últimos ciento cincuenta años. Una respuesta que ha tenido el sistema climático frente a ese forzante ha sido el aumento de la temperatura media del planeta. Podríamos ahora hacernos esta pregunta: ¿cuánto aumentará la temperatura del planeta como consecuencia de todos los gases de efecto invernadero que los seres humanos hemos emitido hasta ahora? Responder no es fácil y los científicos llevan decenas de años haciendo cálculos para estimar un valor y comprobar que ese valor se puede tomar como creíble. Una de las razones por las que estimar cuánto va a aumentar la temperatura del planeta es un proceso que requiere mucho trabajo es que el sistema climático es un sistema muy complejo en donde se presentan las retroalimentaciones. Para entender este concepto es bueno ir a un ejemplo simple. Supongamos que por algún motivo el Sol comienza poco a poco a emitir menos energía. Evidentemente, podemos esperar que la temperatura del aire en gran parte del planeta se reduzca, ya que la superficie de la Tierra comenzaría a recibir menos cantidad de radiación solar y por lo tanto habría menos energía para calentar el aire. Pues bien, si el descenso de la temperatura del aire es de gran magnitud, en algunas regiones podrían formarse capas de hielo. El hielo refleja (devuelve) la radiación que viene desde el Sol y por lo tanto contribuye a que la superficie tenga aún menos energía para calentar el aire. De esta forma, ya no solo el debilitamiento del Sol está enfriando al planeta, sino que también las nuevas capas de hielo están ayudando al enfriamiento. Cuando tenemos un fenómeno como el descrito hablamos de que existe una retroalimentación positiva o *feedback* positivo (**Figura 6**). En este caso, una respuesta inicial (el descenso de las temperaturas) desencadenó procesos que terminaron produciendo un enfriamiento aún mayor. En palabras más técnicas, se amplificó la respuesta.

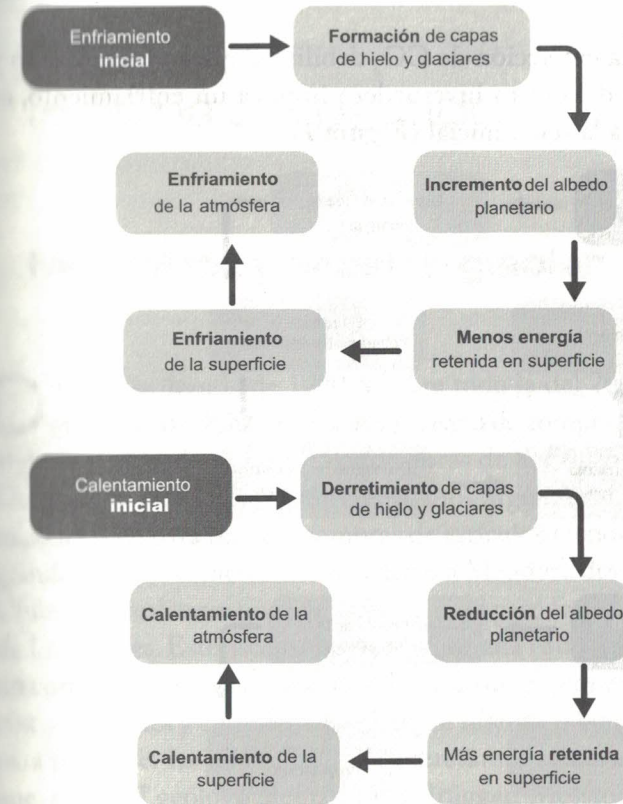


Figura 6. Retroalimentación positiva asociada al albedo del hielo.

El sistema climático tiene muchos ciclos de retroalimentación positiva, siendo un ejemplo de este tipo de *feedback* el ciclo de retroalimentación del vapor de agua. El vapor de agua es un gas de efecto invernadero, por lo que si su concentración en el aire se incrementa, la temperatura media del aire se eleva también. Cuando aumenta la temperatura del aire, más agua es evaporada desde los cuerpos de agua y océanos, lo que a su vez produce que más vapor de agua ingrese a la atmósfera. Esto contribuye a un efecto invernadero más intenso que deriva en un calentamiento que refuerza la evaporación. En el sistema climático también se establecen interacciones en donde una señal inicial produce alteraciones que neutralizan o reducen la magnitud de la señal inicial. Aquí hablamos de una retroalimentación negativa o *feedback* negativo. Por ejemplo, si se produce inicialmente una señal de calentamiento, aumenta la evaporación, se incrementa la precipitación y el clima se hace más húmedo. Esto favorece el crecimiento de vegetación, la cual para desarrollarse extrae CO₂ desde el aire por medio de

la fotosíntesis. Esta extracción de CO_2 debilita el efecto invernadero y un debilitamiento del efecto invernadero implica un enfriamiento, es decir, lo contrario a la señal inicial (**Figura 7**).

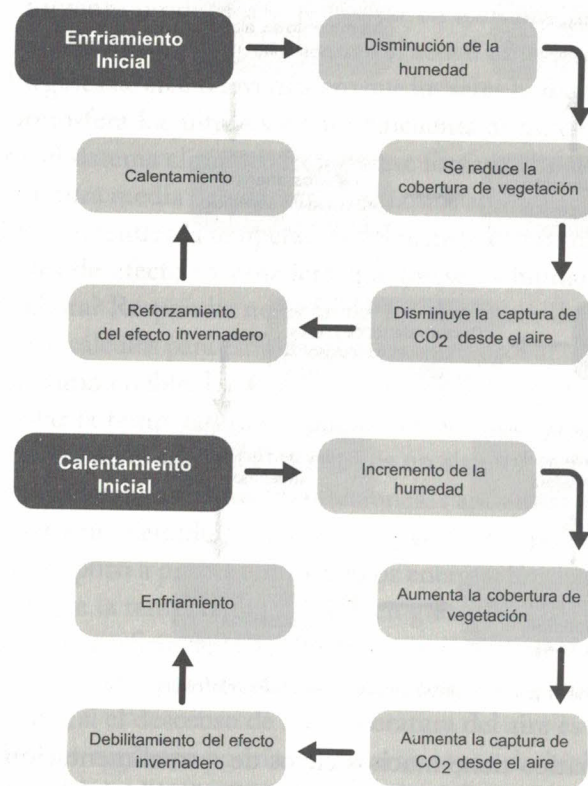


Figura 7. Retroalimentación negativa asociada a la vegetación.

Las retroalimentaciones son una de las explicaciones de por qué el sistema climático no responde de forma proporcional o lineal a un forzante. Por lo tanto, para imaginarnos como puede ser la respuesta que tendrá todo el sistema climático frente a un forzante, se hace necesario analizar todos los potenciales ciclos de retroalimentación, ponderar cuáles de ellos tienen más importancia, cuáles operan en el corto plazo, cuáles operan en el largo plazo y en qué condiciones operan. Pero las retroalimentaciones no solo deben considerarse si queremos saber qué puede suceder en el futuro con el clima. Prácticamente todas las hipótesis planteadas para explicar cambios climáticos que han ocurrido en el pasado consideran en algún grado el papel de las retroalimentaciones, situación que nos llevará a que este concepto aparezca regularmente en el relato de este libro.

Capítulo 3. El clima del pasado

Morrenas y erosión glacial

Durante la década de 1990, y sobre todo la del 2000, era muy común que muchos chilenos fuesen a pasear o de compras a Mendoza, ciudad argentina ubicada solo a un par de horas de Santiago y de Viña del Mar. Después de 2010 fueron los ciudadanos argentinos los que llegaron en masa a Chile para realizar compras de artículos tecnológicos y de ropa en grandes centros comerciales. Para llegar a Mendoza desde la zona central de Chile debe realizarse un viaje ascendente al paso fronterizo desde la ciudad de Los Andes. Este ascenso se realiza por una ruta que está acompañada a un costado por el río Aconcagua. He transitado por este trayecto en unas cinco ocasiones y en todas ellas siempre intento estar al lado de la ventana para poder ver las montañas y las interesantes características de este valle que, según el geólogo alemán Juan Brüggemmes, es un muy buen escenario para observar los efectos del avance glacial en un valle. A unos 15 km de la ciudad de Los Andes, ascendiendo por el valle, se halla una de las primeras evidencias del avance glacial, el Salto del Soldado, una angostura de roca que constituye un umbral glacial que fue cortado por acción del río Aconcagua. Un umbral glacial es un relieve transversal a la dirección de desplazamiento de un glaciar que obstruye un valle que fue formado por la acción del mismo. Desde este punto hacia arriba el valle del río tiene la forma de U característica de los valles glaciares mientras que a los costados pueden observarse marcas y surcos hechos sobre rocas por el paso de un glaciar. En el trayecto también es posible identificar sedimentos llamados *till*, pilas de material muy variado que incluyen arenas, arcillas, grava y cantos rodados que fueron arrastrados por el glaciar. Cuando estos sedimentos se acumulan formando una colina o loma se tiene una morrena. Quizás la morrena más visible del valle es la que hay que subir para llegar a la Laguna del Inca. Sobre esta morrena está construida la cuesta Juncal-Portillo, conocida popularmente como Caracoles. La morrena de la cuesta Caracoles se formó por el avance de un glaciar