

Páramos Andinos

**Ecología,
hidrología
y suelos
de páramos**

Luis Daniel Llambí

Alejandra Soto-W

Rolando Céleri

Bert De Bievre

Boris Ochoa

Pablo Borja

PROYECTO PÁRAMO ANDINO

Agosto 2012

ECOLOGÍA, HIDROLOGÍA Y SUELOS DE PÁRAMOS
Proyecto Páramo Andino

Autores:

Luis Daniel Llambí
Alejandra Soto-W
Rolando Célleri
Bert De Bievre
Boris Ochoa
Pablo Borja

Mediación Pedagógica:

María Susana Ruggiero
Tania Calle

Diseño: **El Antebrazo**

Ilustraciones

Ecología: **Luis Daniel Llambí**
Hidrología: **Miguel Almeida**
Suelos: **Pablo Borja**

Fotos: **Proyecto Páramo Andino y autores**

Impresión: **Monsalve Moreno**

ISBN: 9789942115492

Este material se hizo para que sea usado y reproducido con propósitos educativos, no comerciales, mencionando su origen. Agradecemos nos cuente sobre sus proyectos y su experiencia con este material a: ppa@condesan.org



Unidad 2

Clima e hidrología del páramo

Rolando Célleri • Bert De Bièvre • Boris Ochoa





Antes de comenzar...

El páramo es uno de los ecosistemas más importantes de la región andina debido a los múltiples servicios ambientales que presta a la sociedad. Además de la diversidad biológica que alberga, la importancia que tiene para nuestros pueblos lo ha convertido en un elemento fundamental de su historia y de su cultura. Este trascendental valor como ecosistema viene dado precisamente por uno de los elementos más valiosos para la vida: el agua. El agua es posiblemente el elemento más separador y unificador a la vez, y mucho de esta concepción se basa en el poco conocimiento que podemos tener sobre él.

La provisión y regulación de agua de excelente calidad es el servicio más significativo de los ecosistemas andinos para la sociedad. Más de 100 millones de personas se benefician del agua para uso urbano, agrícola, industrial y para la generación eléctrica. Aun así, el conocimiento que tenemos sobre la hidrología del páramo ha sufrido un tardío desarrollo, y la transmisión de información oportuna hacia los tomadores de decisiones y actores directos del agua no ha sido priorizada. Esto se hace más severo cuando nos enfrentamos a fenómenos mayores como el Cambio Climático.

Es por esto que este trabajo es un esfuerzo del Proyecto Páramo Andino para fortalecer el conocimiento de los técnicos locales que trabajan directamente en el uso y la gestión de los ecosistemas andinos y en especial del páramo. Entender el clima como un factor desencadenante del ciclo hidrológico, los procesos ambientales que determinan la hidrología del páramo, los impactos producidos por las actividades humanas sobre el agua, y las certezas e incertidumbres sobre el Cambio Climático, son la base para el entendimiento de este elemento dentro del contexto de todo el ecosistema.

Además, como parte del proceso de formación y de fortalecimiento de capacidades locales, se presenta una sección para comprender la importancia del monitoreo hidrológico y meteorológico de los ecosistemas. Sobre todo, es importante la vinculación de las comunidades dentro de los procesos de generación de conocimientos porque son los principales usuarios, actores y gestores del agua en estos ecosistemas. El término "monitoreo hidrológico participativo" es la finalidad última que busca esta Unidad para compartir e intercambiar información con comunidades que viven y sienten el agua del páramo como un componente vivo.

Esta Unidad está destinada a transmitir el conocimiento generado a través de investigaciones científicas sobre la hidrología del páramo, pero puede ser usada en otros ecosistemas de igual manera. Los conceptos generales sobre meteorología e hidrología están destinados a favorecer el entendimiento de este tema y pueden servir para investigar otros sitios igual de importantes y delicados.

Este material ha sido mediado pedagógicamente con el propósito de facilitar los aprendizajes conservando su rigurosidad científica.

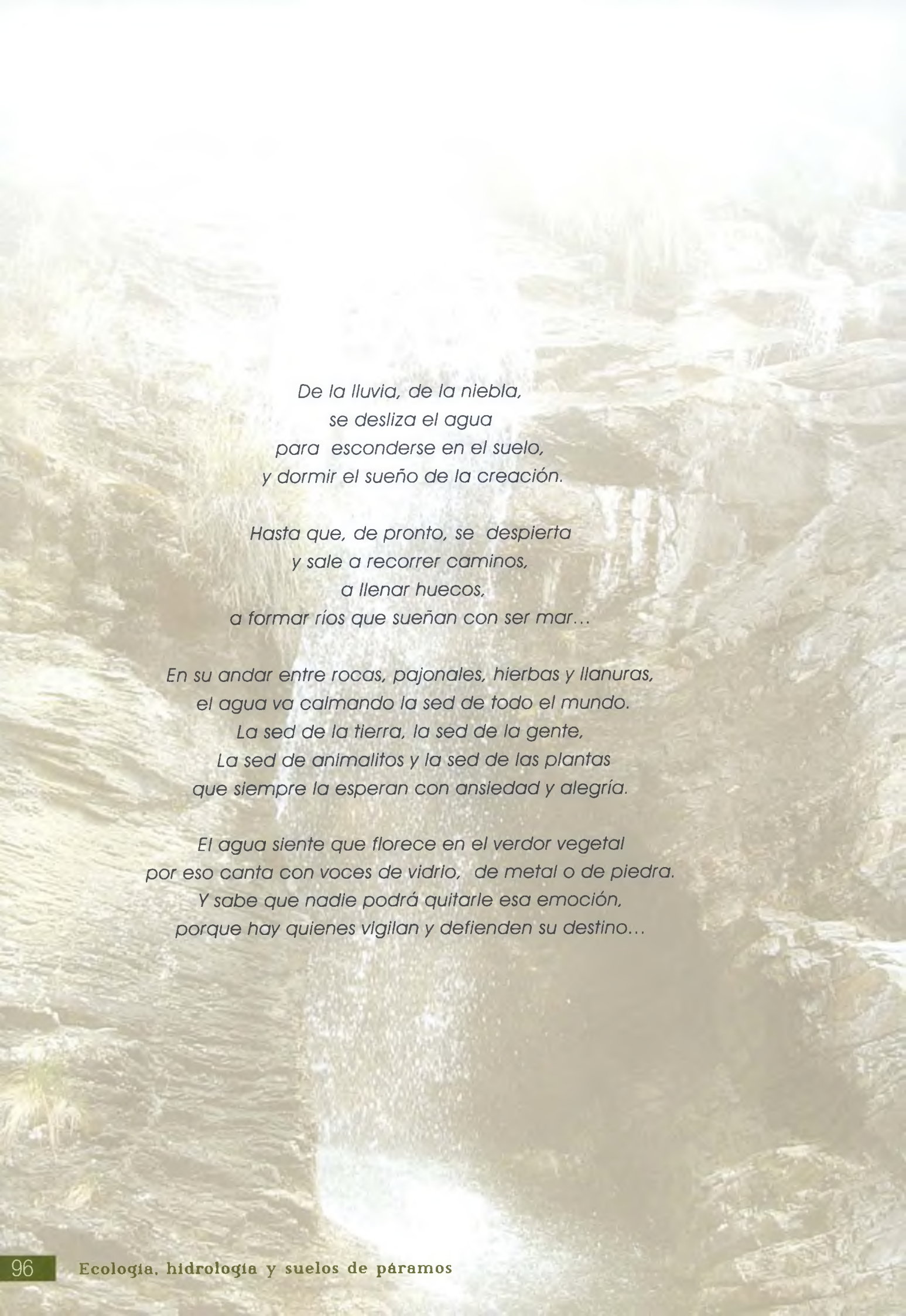
Esperamos que sea un aporte importante y de utilidad para todas aquellas personas, instituciones y organizaciones que trabajan en la hidrología del páramo, en particular, y de los ecosistemas andinos, en general.

Entender la meteorología y la hidrología como base para la toma de decisiones y acciones sobre los ecosistemas, es fundamental para guiar las actividades hacia la conservación y recuperación de los servicios ambientales que prestan, pero, sobre todo, para valorar el agua como un elemento cultural y ambiental significativo, que por años nuestros pueblos, con sabiduría, consideraron como la sangre de la Pachamama.

Los autores.

¿QUÉ NOS PROPONEMOS CON ESTA UNIDAD?

- Entender el clima como un factor desencadenante del ciclo hidrológico y como controlador de varios de sus componentes.
- Describir los procesos ambientales que determinan el funcionamiento hidrológico del páramo y cómo la influencia humana los afecta.
- Analizar:
 - las características del ciclo hidrológico en general y el del páramo en particular.
 - los impactos producidos por las actividades humanas sobre la disponibilidad del agua.
- Comprender la importancia de realizar monitoreos meteorológicos e hidrológicos.
- Desarrollar capacidades para implementar acciones de monitoreo hidrológico teniendo en cuenta la participación de las comunidades.



*De la lluvia, de la niebla,
se desliza el agua
para esconderse en el suelo,
y dormir el sueño de la creación.*

*Hasta que, de pronto, se despierta
y sale a recorrer caminos,
a llenar huecos,
a formar ríos que sueñan con ser mar...*

*En su andar entre rocas, pajonales, hierbas y llanuras,
el agua va calmando la sed de todo el mundo.
La sed de la tierra, la sed de la gente,
La sed de animalitos y la sed de las plantas
que siempre la esperan con ansiedad y alegría.*

*El agua siente que florece en el verdor vegetal
por eso canta con voces de vidrio, de metal o de piedra.
Y sabe que nadie podrá quitarle esa emoción,
porque hay quienes vigilan y defienden su destino...*

Agua y Páramo

"... como nuestra sangre, el agua es la vida. El agua sirve para todo, es como sangre de la Pachamama"⁸.

El agua es una importante razón de ser en la vida de las personas y de los páramos.

Como se sabe, el **páramo** es el **ecosistema principal para el abastecimiento de agua** que consumen las comunidades andinas, tanto rurales como urbanas.

En efecto, uno de los servicios más importantes que presta el páramo a las poblaciones es la **provisión de agua** de excelente calidad y de forma constante a lo largo del año.

¿De dónde viene el agua de los páramos? Ciertamente de la lluvia y de la neblina, que son parte del **clima**. Por eso es necesario profundizar este tema -el clima- para poder entender mejor la situación del agua en los páramos andinos.

Clima y tiempo

Por lo general cuando se habla de **clima** se alude al estado del tiempo: frío, calor, lluvias, vientos, etc.

Clima y tiempo se suelen usar como si fueran la misma cosa, pero no lo son. Ambos se describen a través de algunas variables meteorológicas como:

- temperatura,
- humedad,
- velocidad y dirección del viento,
- nubosidad,
- precipitación y
- presión.

⁸ Bartolo Otavalo, comunidad de Tocagón, Imbabura Ecuador.

La diferencia está en el período de tiempo analizado o sea, en la **escala temporal** con la que se analizan los fenómenos atmosféricos, que son estudiados por la meteorología.

Meteorología es la ciencia que estudia la atmósfera terrestre y los procesos atmosféricos que producen tanto el clima como el tiempo⁹.

El tiempo indica el estado de la atmósfera durante un corto período de tiempo: horas, días o semanas.

Los pronósticos que realizan las agencias meteorológicas por ejemplo, nos indican el posible estado del tiempo del día siguiente:

“... para mañana se espera tiempo seco, con una temperatura promedio de 20 grados centígrados”.

El clima generalmente prevalece en una región determinada, durante un período de tiempo largo: meses, años o siglos.

Por ejemplo: “el **clima** de la costa es cálido y húmedo”, lo cual quiere decir que **normalmente** las temperaturas y la humedad son altas, aunque en determinado momento **el tiempo** en la costa, también puede llegar a ser frío.

Así mismo, al decir que el clima del verano en la sierra de Ecuador es seco y ventoso, se da a entender que, **por lo general**, durante cierto período (Julio-Agosto) hay pocas lluvias y presencia de vientos fuertes; sin embargo, en determinado momento de este período, puede llover.

A pesar de esta diferencia, en algunas regiones es común hablar de clima para todas las escalas temporales, sean cortas o largas.

En latitudes mayores como en Canadá o en la Argentina el tiempo varía fuertemente durante el año. Estas variaciones a través de las estaciones son parte del clima de este lugar.

⁹ Whiteman, 2000.

Elementos básicos de meteorología

Son siete las principales variables meteorológicas que nos indican el estado de la atmósfera y se expresan así:

Variable	Unidad
Temperatura del aire	°C (grados Celsius)
Precipitación	mm (milímetros de agua)
Dirección del viento	° (grados)
Velocidad del viento	m/s (metros por segundo)
Humedad relativa del aire	% (porcentaje)
Presión del aire	mb (milibares)
Radiación solar	W/m ² (Watts por metro cuadrado)

La **temperatura** del aire indica el grado o intensidad de calor presente en las masas de aire.

La **precipitación** es la cantidad de agua que ha caído sobre la superficie terrestre. Existen varias formas de precipitación, siendo las más importantes:

- la lluvia,
- la llovizna,
- el granizo, y,
- la nieve.

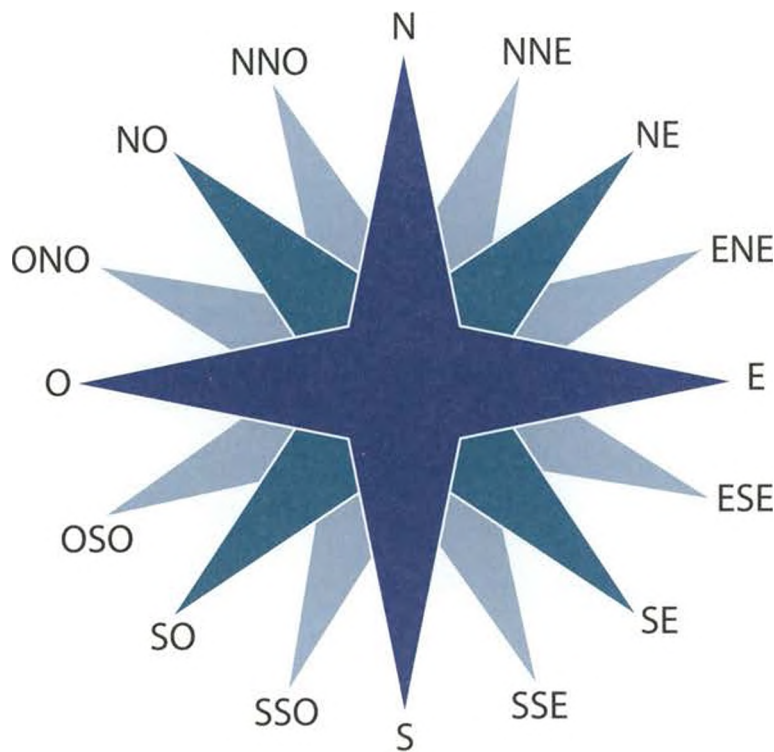
Si se pudiera acumular la cantidad de precipitación que cae, en un intervalo de tiempo determinado, (por ejemplo una hora o un día) se podría ver una capa de agua sobre el suelo. El espesor de esta capa, expresado en milímetros (mm), es **la unidad de medida de la precipitación**.

Un milímetro de lluvia equivale a un litro de agua caída en un metro cuadrado de superficie.

La **dirección del viento** indica hacia donde sopla el viento en un momento determinado. Se mide en sentido de las manecillas del reloj (sentido horario) desde el Norte; así, una dirección de cero grados apunta hacia el Norte y otra de 180 grados hacia el Sur.

La rosa de los vientos es la representación de la dirección del viento, como el viento no sopla siempre en la misma dirección la rosa de los vientos nos permite estimar hacia donde va el viento.

Rosa de los vientos para representar la dirección



La **velocidad del viento** es la velocidad a la cual se desplazan las masas de aire. Se mide en un plano horizontal y no depende de la dirección en la cual sopla el viento.

La **humedad** es la cantidad de vapor de agua que puede contener el aire. Se puede expresar de forma **absoluta** como una relación entre la cantidad de vapor de agua (gramos) por unidad de volumen de aire (m^3), o de forma **relativa** que es la cantidad de vapor que existe en el aire, en relación con la cantidad que el aire puede contener al 100% antes de que empiece la condensación. El aire saturado de vapor de agua tiene una humedad absoluta máxima y el 100% de humedad relativa. La humedad relativa es la forma más habitual de expresar la humedad del aire.

La **presión de aire o presión atmosférica** es la medida del peso de la columna de aire que se encuentra sobre un sitio determinado. En la costa, la columna de aire es mayor que en una zona de montaña, por lo que la **presión del aire** es menor en zonas altas.

La **radiación solar** es la energía emanada por el sol, que incide sobre la Tierra.

Antes de ingresar a la atmósfera de la tierra se conoce como *radiación extraterrestre* y va disminuyendo conforme ingresa a la atmósfera. La nubosidad aumenta esta disminución. El ángulo con el que se reciben los rayos solares también disminuye la radiación solar.

Por lo tanto en sitios elevados la radiación solar es mayor que en sitios bajos. Por ejemplo en el páramo es muy intensa.



Foto: Bernabé Torres

Factores que determinan el clima

Existen cuatro factores básicos que determinan el clima:

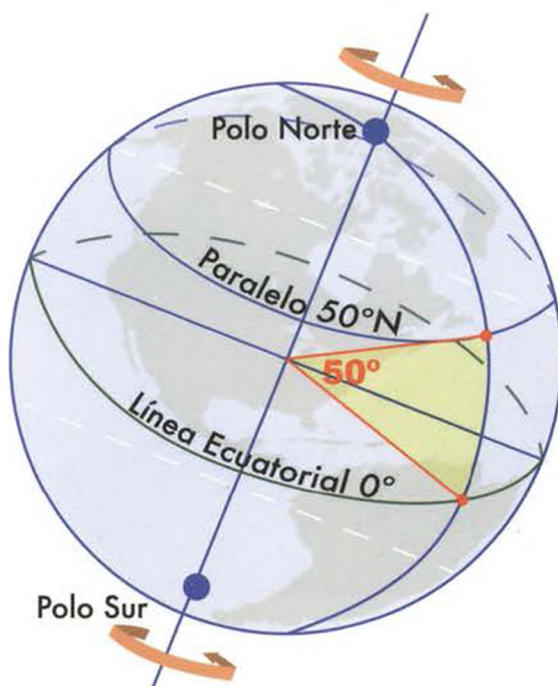
- **latitud,**
- **altitud,**
- **continentalidad y**
- **exposición a circulaciones regionales**¹⁰.

¹⁰ Whiteman, 2000.

Latitud

Es la distancia angular -al Norte o al Sur de la línea ecuatorial- , donde se ubica un determinado sitio. En la figura, por ejemplo, un punto ubicado en cualquier lugar sobre el paralelo 50 norte, estará siempre ubicado a 50° de latitud norte.

Determinación de la latitud

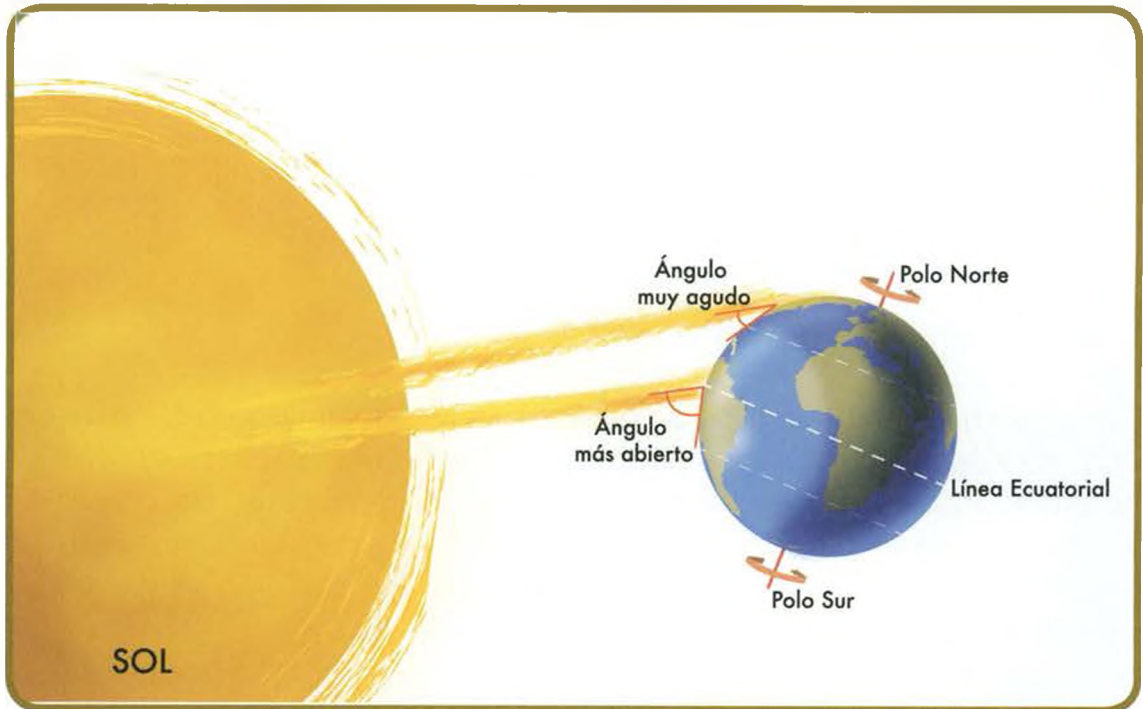


La importancia de la **latitud** radica en que **determina la cantidad de radiación solar** que se recibe en ese sitio y que se establece por el ángulo de inclinación con respecto del sol y por la duración del día.

Por ejemplo, un sitio ubicado en los páramos cercanos a Quito (latitud cero) tiene el sol en posición cercana a perpendicular durante todo el año. Esto, además de que la duración del día sea igual durante todo el año, hace que la radiación solar sea permanentemente muy alta.

A latitudes mayores (sitios mas lejanos de la línea equinoccial), la radiación solar recibida es menor. Por ejemplo, en esta figura, cerca del polo norte el ángulo de inclinación de los rayos solares es muy agudo. En cambio, cerca de la línea ecuatorial el ángulo es más abierto.

Radiación solar en función de la latitud



Los rayos calientan más o menos según se concentren en una superficie más grande o más pequeña.

Las variaciones en la cantidad de radiación recibida, producen variaciones en el clima y en el tiempo, que pueden registrarse en escalas temporales largas y cortas.

En escalas largas (1 año), a mayor latitud, mayor variación entre las estaciones fría y caliente, a lo largo del año. Los extremos ocurren en estaciones con mucha radiación (verano) y estaciones con poca radiación (invierno) como en Canadá y Argentina.

Altitud

Es uno de los factores más determinantes del clima y del tiempo en nuestras zonas de montaña, ya que la mayoría de **las variables meteorológicas, varían con la altitud.**

La temperatura, la radiación solar de onda corta, la humedad atmosférica, la precipitación, la velocidad del viento y la presión del aire, varían con la altitud.

En la capa más baja de la atmósfera (la troposfera de 0 - 11 km de altura) la **temperatura** del aire **disminuye** con la elevación, por lo que los sitios elevados son más fríos que los sitios a nivel del mar.

La temperatura disminuye entre 0.5 y 1 grado Celsius por cada 100 metros de aumento de altitud, en promedio.

La radiación solar se incrementa con la altitud.

Como para llegar a los sitios bajos, la radiación solar tiene que atravesar una capa más gruesa de la atmósfera, los rayos solares tienen más oportunidad de perder su intensidad, debido a procesos de absorción y reflexión que se producen en la masa de aire especialmente -pero no únicamente-, cuando hay nubes, por lo cual, la radiación es menor en sitios bajos que en los sitios más altos.

La humedad atmosférica o humedad del aire, depende en gran medida, de la cercanía de una fuente de agua.

En sitios costeros, la **cercanía al mar** permite que la **humedad** en la atmósfera sea **alta**. De la misma manera, la humedad sobre la selva amazónica es alta, porque la selva es fuente de humedad a través de la transpiración de la vegetación. Mientras en sitios **más altos**, la cantidad de **humedad** atmosférica **es menor** porque hay mayor distancia con la fuente de humedad.

Sin embargo, en altitudes mayores, se observa generalmente mayor cantidad de precipitación.

Esto se debe a que, cuando una masa de aire caliente y húmedo asciende, la masa de aire se enfría. Lo que disminuye la capacidad del aire de contener vapor y una gran parte de su humedad se condensa y se forma la precipitación. Pero hay muchos factores que localmente pueden cambiar esta relación entre precipitación y altura como por ejemplo la topografía local que facilita o impide los movimientos de las masas de aire.

La velocidad del viento generalmente se incrementa con la altitud.

Esto se debe a que en elevaciones altas existe muy poca resistencia al movimiento del aire. En cambio, en elevaciones bajas, existe una mayor fricción entre la capa de aire y la superficie de la tierra.

En las zonas altas, la presión atmosférica es menor.

En el cuadro siguiente encontrará un resumen de las variables meteorológicas y su relación con la altitud.

Variables meteorológicas por altitud

Variables Altitud	Temperatura	Radiación solar	Humedad del aire	Precipitación	Velocidad del viento	Presión del aire
En zonas altas	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Mayor	Menor
A nivel del mar	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Menor	Mayor

Continentalidad

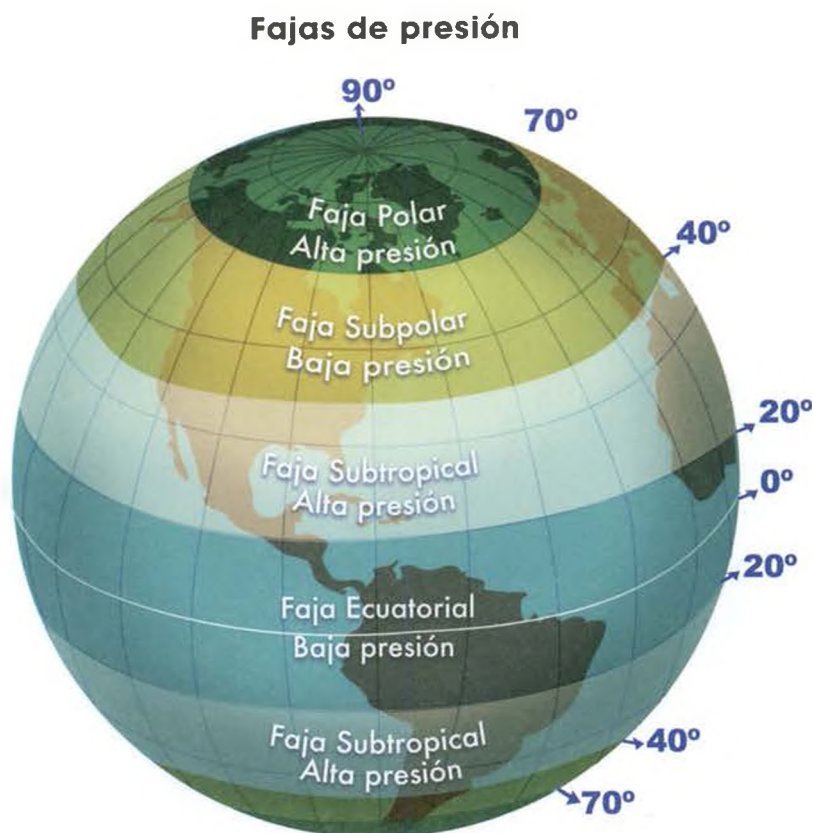
Se refiere a la ubicación del sitio de interés, dentro del continente, en relación con su distancia a los océanos. Sitios ubicados **cerca de océanos** tienen una **menor variación de la temperatura**, tanto estacional como en el día, debido a que las masas de agua se calientan y enfrían más lentamente que la superficie terrestre.

Por otro lado, sitios ubicados en el centro del continente, normalmente presentan menor nubosidad, menor humedad y menor precipitación, pero mayor radiación que los sitios cercanos al mar.

Exposición a Circulaciones Regionales

Son producidas por los sistemas de presiones atmosféricas altas y bajas. Estos sistemas son responsables de formar lo que se llama **fajas latitudinales** que circunvalan la tierra.

En la figura se pueden observar las fajas de presión en el globo terráqueo. Zonas de baja presión ocurren en la faja ecuatorial (0-20° de latitud) y en las fajas subpolares (40-70°). Se alternan con zonas de alta presión, que ocurren en las fajas subtropicales (20-40°) y polares (70-90°).



Las fajas de **bajas presiones** están asociadas con: **movimientos ascendentes** del aire en la atmósfera, nubosidad, precipitación y fuertes vientos.

Las fajas de **altas presiones**, se relacionan con **movimientos descendentes** del aire en la atmósfera: cielos despejados, aire seco y vientos ligeros.

Estos sistemas de presión no son constantes durante el año, sino que presentan modificaciones con las estaciones que hacen variar el clima.

Mapa climático

En el mapa se observan los tipos de clima en América del Sur.



¿Por qué la gran variedad de climas?¹¹

La gran variedad de climas se produce por:

- **La amplitud de latitudes que ocupa el continente.**
- La mayor parte de Sudamérica se encuentra dentro de las zonas tropicales.
- La línea equinoccial la atraviesa por la parte norte y el trópico de Capricornio pasa cerca de su latitud media.

¹¹ Editado de Wikipedia.

Por debajo del trópico de Capricornio, predomina el clima templado en Uruguay, centro de Argentina y sur de Brasil; y el clima mediterráneo en el centro de Chile. Finalmente en la Patagonia se encuentran climas fríos (húmedo en la zona cordillerana y secos en la zona oriental). El extremo sur penetra en la zona subantártica.

- **La diferencia de temperaturas entre los océanos Atlántico y Pacífico.** Generalmente el lado Atlántico es más cálido y el Pacífico es más frío por la presencia de la corriente de Humboldt, procedente del continente Antártico.
- **La presencia de la Cordillera de los Andes,** que actúa como biombo climático, y presenta grandes diferencias térmicas según la altitud (cuenta con hielos eternos incluso en la zona ecuatorial).

Los extremos son tales que en la costa del Pacífico, entre los Andes y el Océano Pacífico, se encuentran tanto las zonas más húmedas -la zona del Chocó que cubre Panamá, Colombia y el norte del Ecuador- como las más secas del planeta -el desierto de Atacama en Chile que limita con Perú, Bolivia y Argentina.

El clima a escala de los Andes tropicales

Los Andes Tropicales, desde Venezuela hasta Bolivia, se caracterizan por ser uno de los sistemas climáticos más complejos del mundo, con gradientes extremos de precipitación y temperatura.

El régimen de temperatura es dominado por los grandes gradientes altitudinales, y en las latitudes mayores de la zona tropical, por una muy moderada estacionalidad. Los patrones de precipitación tienen su origen en sistemas climáticos de gran escala sobre el Océano Pacífico y la Amazonía, y en el caso de los Andes colombianos y venezolanos, adicionalmente por el Caribe.

Estos sistemas climáticos en muchos sitios se superponen unos con otros. La extensión de la influencia desde uno u otro sistema también varía según la estación del año. Aunque esas variaciones le dan una complejidad extrema a la distribución espacial y temporal de la precipitación en los Andes Tropicales, se pueden señalar algunas tendencias generales:

- La **Amazonía** envía masas húmedas de aire hacia los flancos orientales de los Andes, mecanismo que en el hemisferio norte se presenta con baja variación durante el año. En el hemisferio sur, la cordillera peruana y boliviana reciben mucha mayor humedad desde la Amazonía durante el período diciembre-abril, que durante el resto del año.
- El **Océano Pacífico**, desde el occidente, envía masas húmedas de aire por la zona de convergencia intertropical, proceso que es amplificado por la corriente cálida del Niño. Estas masas se presentan todo el año en la Cordillera Occidental colombiana, y con estacionalidad, en la Cordillera Occidental ecuatoriana. Más al sur, en la costa peruana, es bien conocido que la corriente fría de Humboldt impide que se transporte humedad desde el océano a la zona costera y al flanco occidental de la Cordillera.
- **Las masas húmedas de origen caribeño** en el Norte de los Andes, traídas por los vientos alisios, añaden un factor adicional a estos patrones.

En los valles interandinos puede existir mayor o menor influencia desde los diferentes orígenes de humedad, en función de la topografía de las cordilleras, que impida o no el ingreso de masas húmedas a la zona interandina. Ciertas zonas interandinas son áridas debido a que no puede ingresar humedad desde ninguno de los dos lados, y otras tienen presencia de lluvias casi todo el año o tienen un régimen bimodal, o sea dos épocas de lluvias en el año, provenientes una de cada lado.

Esa gran variedad en el régimen de precipitación, da origen a expresiones locales tales como el “veranillo del Niño” en Ecuador, y otras del mismo estilo. El veranillo del Niño es resultado de cambios atmosféricos y climáticos producidos por el “Fenómeno del Niño”, en particular por la presencia de la “Corriente del Niño” que se origina en el Golfo de Guayaquil.

En general, se puede decir que la estacionalidad de la lluvia es mayor en el sur (Perú, Bolivia) y menor en el norte (Ecuador, Colombia), debido principalmente a que el origen de la humedad en el sur es solamente Amazónico y no proveniente del océano Pacífico. En la Cordillera de Mérida en Venezuela, existe una marcada estacionalidad.

Meteorología de alta montaña: Características del clima en el páramo

Las montañas influyen el clima en múltiples escalas, desde la local, hasta las escalas globales.

A escala local, el aire es forzado a elevarse por las pendientes de las montañas, por lo que se produce la formación de nubes y la posterior precipitación. Por eso las zonas de montaña, especialmente en los Andes tropicales, tienden a tener un clima más húmedo que las regiones bajas.

A escala global, las cordilleras modifican el flujo de los vientos de las grandes circulaciones, creando condiciones totalmente distintas a las que se presentarían de no existir estas grandes barreras naturales.



Foto: Julia Smith

Páramo de Gavidia, Venezuela

El clima en el páramo

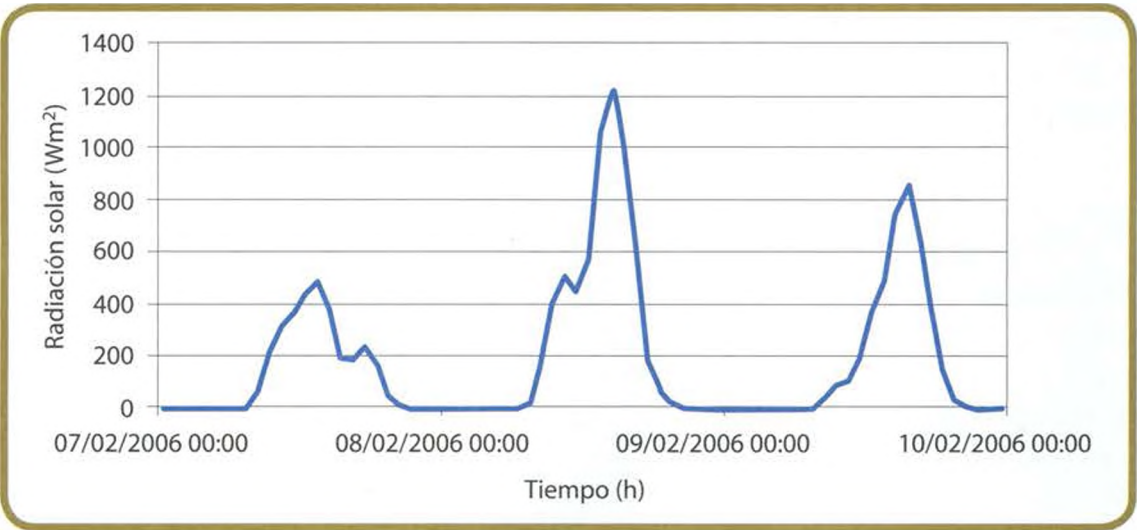
Las variables: radiación solar, temperatura y precipitación tienen características específicas en los páramos.

Radiación solar

Al existir una menor capa atmosférica en las zonas altoandinas, la cantidad de **radiación** que llega al suelo por metro cuadrado es **mayor** allí, que en las zonas costeras. A esto se suma el hecho de que los páramos se encuentran cerca de la línea ecuatorial y, por lo tanto, la cantidad de radiación solar incidente, es aún mayor que en el resto de zonas montañosas.

En el gráfico se observa la variación diaria en la radiación solar incidente, para la estación meteorológica Zhurucay (Ecuador), típica de la zona de páramo. Los picos más altos, se registran durante el medio día. Por la noche, la radiación incidente es cero.

Variación de la radiación solar en la estación Zhurucay, Ecuador



También puede observarse que **la radiación depende de la nubosidad**: durante el primer día -nublado- la radiación al medio día llega solamente a 500 W/m^2 . En tanto, al día siguiente -despejado-, a la misma hora aumenta sobre los 1200 W/m^2 (lo que es cercano al máximo teórico en el planeta: 1367 W/m^2). En días despejados la cantidad de radiación incidente es muy elevada.

Temperatura

A pesar de que existe una mayor incidencia de radiación solar en zonas altas, su efecto sobre la temperatura es bajo. Esto se debe a que solo una pequeña fracción de la radiación es absorbida por la atmósfera, llegando casi en su totalidad a impactar el suelo o la superficie terrestre, que se calienta; o sea, esta radiación no calienta el aire pero sí el suelo (y a nosotros, las personas, si estamos en el medio).

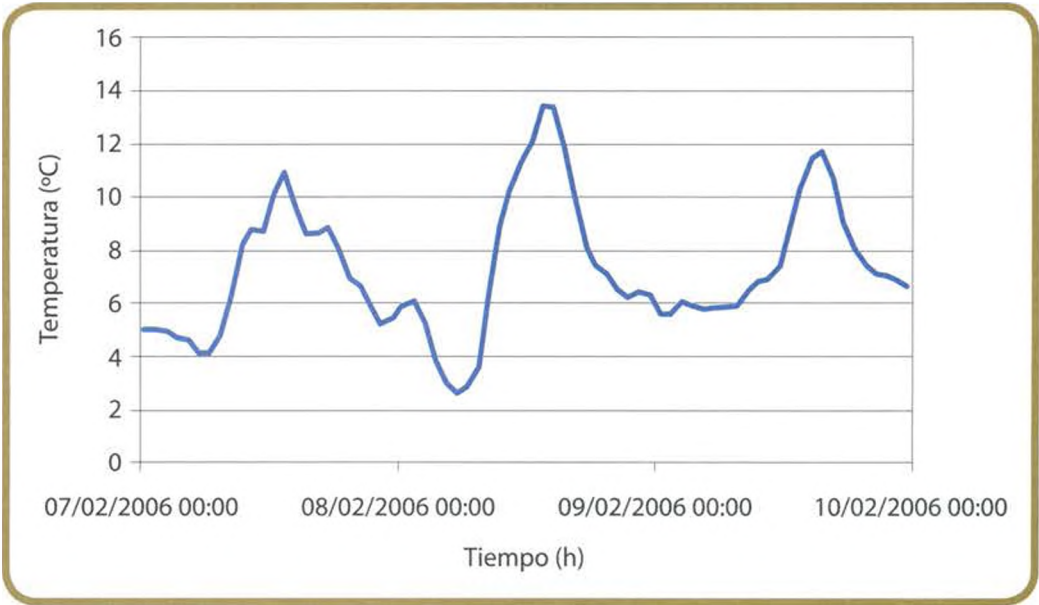
Por lo tanto, la atmósfera se calienta principalmente desde abajo, por el calor emanado desde la superficie del suelo.

En zonas montañosas existe una gran diferencia de elevación en pequeñas distancias, en comparación con zonas costeras, hay una pequeña cantidad de superficie en una franja determinada (por ejemplo entre 3600 y 3700 m). Esto hace que la **temperatura** del aire no suba tanto, a pesar de las altas radiaciones recibidas.

En los páramos existe suficiente energía para crear grandes diferencias de temperatura entre el día y la noche. Esta diferencia se conoce como **amplitud térmica**. Esta variación ha llevado a describir el clima del páramo como: "invierno todas las noches, verano todos los días".

El gráfico siguiente, **Variación de la temperatura en la estación Zhurucay**, muestra un ejemplo de variación de la temperatura dentro del día, donde se puede observar cómo, después de la salida del sol, la temperatura puede incrementarse mucho hasta el medio día. En el segundo día (08/02/2006), se puede observar un incremento de 11 °C (de 3 en la madrugada hasta 14 °C en el medio día) en un lapso de 8 horas. En algunas épocas del año, son comunes diferencias mayores.

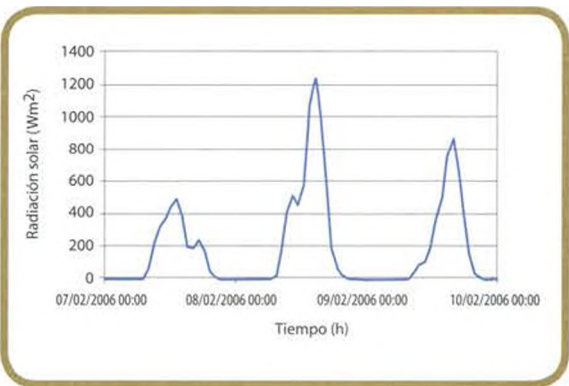
Variación de la temperatura en la estación Zhurucay, Ecuador



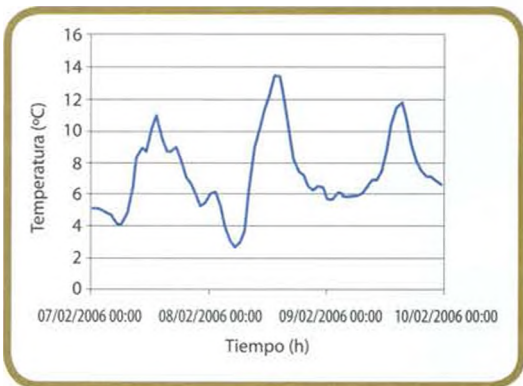
Dijimos que a pesar de que existe una mayor incidencia de radiación solar en zonas altas, su efecto sobre la temperatura es bajo.

Esto se puede comprobar observando los gráficos siguientes. El incremento de radiación al medio día, de 500 a 1200 W/m² de un día a otro (Gráfico de la izquierda), únicamente produjo un incremento aproximado a 3 °C en la temperatura de medio día (Gráfico de la derecha).

Variación de la radiación solar en la estación Zhurucay, Ecuador



Variación de la temperatura en la estación Zhurucay, Ecuador



Ambos gráficos corresponden a datos registrados en la misma estación durante el mismo periodo de tiempo.

Debido a que los páramos se encuentran en las zonas altas de la región tropical, las variaciones estacionales de la temperatura y de la radiación

solar, son mínimas. Esto significa que la temperatura promedio es bastante uniforme durante el año, siendo más alto el rango de variaciones entre el día y la noche.

Precipitación

La radiación y el calentamiento del aire en los valles de las zonas andinas, también producen una mayor evaporación que aumenta la humedad del aire.

En un día normal, al mediodía, el aire de los valles se calienta y su densidad ha disminuido lo suficiente -comparado con el aire de las zonas altas- , como para que se produzca un sistema de vientos ascendentes denominado **valle-montaña**. Este viento húmedo asciende por el valle hacia los páramos, hasta un punto en el cual la temperatura es lo suficientemente baja como para producir su condensación y la consecuente precipitación.

Es por estos procesos que en los páramos se presentan **precipitaciones frecuentes** en las tardes, aunque se pueden dar también, durante la mañana y la noche, dependiendo de las condiciones meteorológicas existentes.

Por otro lado, la temperatura, en un sitio determinado, no depende solamente de la altitud, sino también de la orientación de la ladera.

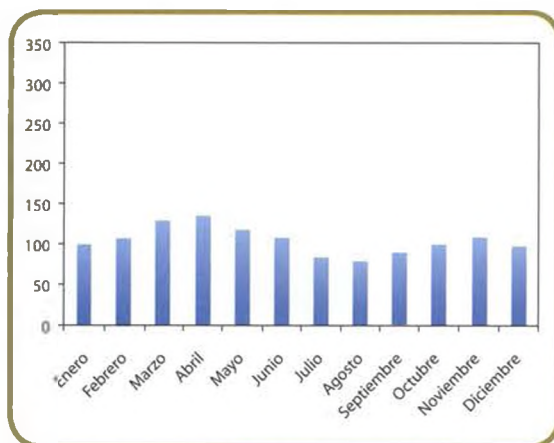
Durante las mañanas, las laderas orientadas hacia el Este se calientan más que las orientadas hacia el Oeste, debido a la acción de la radiación sobre la superficie. Estas diferencias de temperatura son importantes, debido a que pueden originar vientos locales, que a su vez pueden desencadenar precipitaciones.

Estos procesos (valle-montaña, calentamiento disparate de laderas) en un punto dado se superponen con la dinámica de los grandes sistemas climáticos regionales (los de la Amazonía, del Pacífico y del Caribe). Así por ejemplo tenemos una mayor precipitación en la zona ecuatorial de la Amazonía desde julio hasta septiembre. Y tenemos que la corriente fría de Humboldt, que causa sequía en la costa del Pacífico, sube hasta la línea equinoccial durante los meses de junio a noviembre, mientras que sube solamente hasta la frontera de Ecuador con Perú durante los meses de diciembre hasta abril.

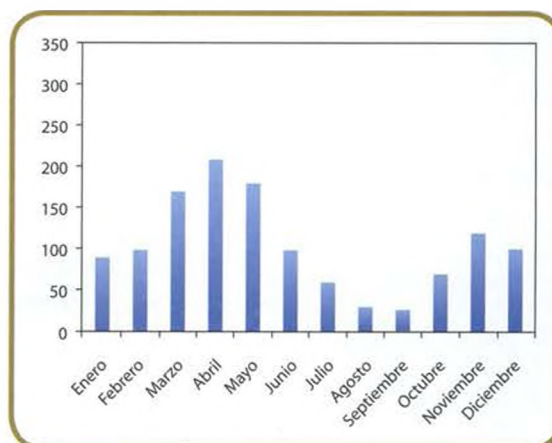
Sin embargo, la **estacionalidad en la precipitación** es generalmente reducida.

La estacionalidad es la manera en la cual la precipitación anual, se encuentra distribuida entre todos los meses del año.

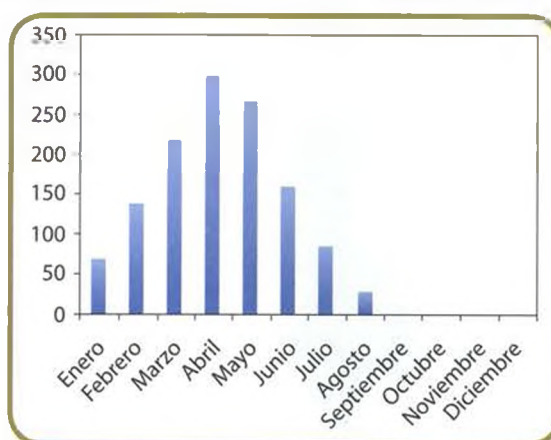
Observe los gráficos de la Estacionalidad de la Lluvia en 3 sitios:



Sitio 1: Poco estacional



Sitio 2: Claramente estacional



Sitio 3: Altamente estacional

Los 3 registran la misma cantidad de lluvia anual total (sumando la lluvia de cada mes).

Sin embargo se observa que:

- En el sitio 1, la lluvia se encuentra bien distribuida durante todos los meses del año.
- En el sitio 2 se pueden notar claramente una estación lluviosa (entre Marzo y Mayo) y una estación seca (entre Julio y Septiembre).

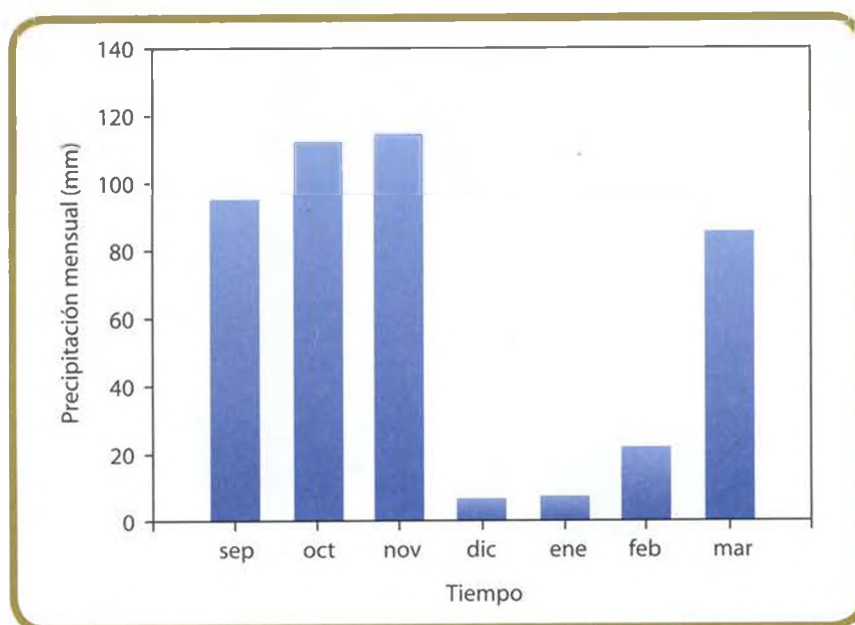
- En el sitio 3 toda la lluvia cae entre Enero y Agosto. El resto del año es totalmente seco.

El sitio 1 tiene una estacionalidad baja, el sitio 2 una clara estacionalidad, mientras que el sitio 3 es altamente estacional.

Generalmente las lluvias en los páramos se asemejan al sitio 1, mientras que los sitios 2 y 3 son representativos de la región interandina y de la costa ecuatoriana respectivamente.

Sin embargo, no todos los páramos son iguales y, por lo tanto, la disponibilidad de lluvia puede ser muy distinta a lo largo de los páramos andinos. Esto se puede ver en el gráfico de barras siguiente para los páramos de Venezuela.

Variabilidad en la precipitación del páramo de Mixteque, Venezuela¹²



Como se ve, hay mucha precipitación en los meses de septiembre a noviembre. En cambio, de diciembre a febrero la precipitación es mucho menor lo que indica una estación seca. En marzo nuevamente se registra un valor alto de precipitación que indica una nueva estación de lluvias en los meses siguientes.

¹² Rodríguez, 2010.



Mixteque, Venezuela

Debido a su latitud y altura, los páramos están afectados por muchísimos factores que dan origen a la precipitación, desde sistemas regionales de clima hasta procesos muy locales, los que determinan la cantidad y variabilidad de precipitación registrada en cada sitio.

Así se pueden encontrar desde páramos superhúmedos con precipitaciones anuales sobre los 3000 mm, por ejemplo en la Cordillera Occidental de Colombia, hasta páramos relativamente secos con precipitaciones anuales de menos de 800 mm, como en Venezuela, y en la Cordillera Occidental en el centro del Ecuador. Sin embargo, generalmente los valores registrados en un páramo determinado son mayores a los registrados en las zonas aledañas más bajas.

En cuanto a la **intensidad de precipitación**, se ha encontrado que es generalmente más baja en el páramo que en zonas aledañas más bajas. Es decir, en el páramo la lluvia cae en forma más suave durante períodos prolongados de tiempo, y con poca frecuencia en forma de tormentas cortas de alta intensidad. Hasta tal punto que la palabra "páramo" también es usada para indicar una lluvia suave: "está paramando" se dice.

Monitoreo meteorológico

El **monitoreo meteorológico** comprende la **observación** permanente **de las variables meteorológicas** de interés para los objetivos de un determinado proyecto. Esta observación puede realizarse mediante estaciones meteorológicas manuales o automáticas.

Estación Convencional



Foto: INAMHI

Estación convencional en Sulupali, Ecuador

En la estación convencional de la fotografía puede observarse una caseta donde se alojan los termómetros y otros sensores. También puede observarse el poste donde se encuentran ubicados en la parte alta la veleta que indica la dirección del viento y el anemómetro que mide la velocidad del viento. En este caso, es necesario contar con un **operador** u observador permanente, encargado de realizar las lecturas de los instrumentos en ciertos momentos específicos de cada día. Por ejemplo, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) realiza las observaciones (mediciones) a las 7h00 y 19h00 de cada día en ciertas estaciones denominadas Ordinarias.

Estación Automática

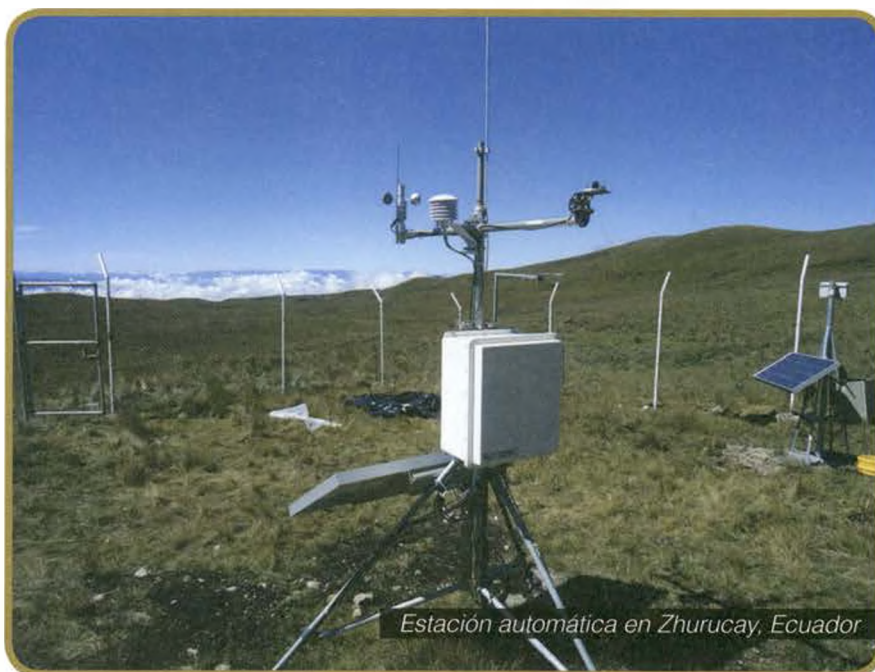


Foto: Diego Mejía

Estación automática en Zhurucay, Ecuador

Las **estaciones automáticas**, como aquella mostrada en la fotografía, están equipadas con sensores electrónicos que realizan la **toma de datos en forma automática**, sin la necesidad de un operador permanente. Los datos son almacenados en una memoria ubicada dentro del sistema electrónico de la estación. Sin embargo esto no evita la necesidad de un operador, ya que las labores de mantenimiento, calibración y descarga de la información, tienen que realizarse de manera periódica.

Muchas veces se piensa que, una vez instalado un sensor automático, ya no se requiere de un observador porque sus mediciones son perfectas: inada más equivocado! Los sensores pueden descalibrarse, ensuciarse, desgastarse o moverse por efectos de fuertes vientos. Si esto no se advierte, los datos registrados serían de muy poca utilidad por lo que se podrían cometer equivocaciones en los cálculos.

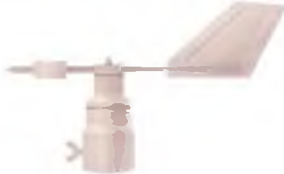
Un problema generalizado del monitoreo meteorológico en zonas de páramo y alta montaña, es la falta de estaciones ubicadas en los sitios de interés. Esto se debe principalmente a que se trata de sitios remotos, por lo cual es difícil encontrar operadores permanentes para las estaciones.

Se considera que para poder determinar la climatología de una zona es necesario contar con datos de al menos un período de 10 años.

Esto porque, año tras año, existen variaciones normales del clima y por ende es necesario contar con varios años de observación para poder establecer las condiciones promedio del clima.

En el cuadro se muestran las 7 variables meteorológicas más importantes con el respectivo instrumento o sensor utilizado para realizar las observaciones.

Variables meteorológicas típicas de una estación automática

Variable	Instrumento o Sensor
Temperatura	Cobertura para el sensor  Sensor de temperatura y humedad relativa (termómetro e higrómetro)
Humedad relativa	
Presión atmosférica	 Barómetro
Radiación solar	 Piranómetro
Velocidad del viento	 Anemómetro
Dirección del viento	 Veleta
Precipitación	 Pluviógrafo



Cuentan los abuelos:

*"Cuando en alguna comunidad no llueve
los mayores dicen que el agua se ha cansado
y se hace necesario refrescarla con aguas jóvenes.
Entonces todos emplezan a traer vasijas
con el agua de ríos y vertientes lejanas.
Y en medio de fiestas, ritos, carnavales, chicha y alegría,
se hace "el casamiento de las aguas"
que nos dará la regeneración de nuestra sagrada Pachamama,
que nos devolverá la esperanza y la vida..."¹³.*

La Hidrología

La Hidrología es la ciencia específica que estudia el agua y se ocupa de:

- su distribución y su circulación en la atmósfera y en la corteza terrestre,
- sus propiedades físicas y químicas, y
- su relación con el ambiente, incluyendo los organismos vivos.

La Hidrología es considerada la columna vertebral de la gestión de cuencas hidrográficas y de recursos hídricos.

A través de la historia...

El interés por el conocimiento y estudio de las aguas sobre los continentes, comienza casi en el principio de los tiempos. Una de las referencias más antiguas se puede encontrar en La Biblia:

*"Todos los ríos van al mar,
pero el mar no se llena.
Al lugar de donde los ríos vinieron,
allí vuelven para correr de nuevo"¹⁴.*

Esto demuestra que el conocimiento acerca del movimiento del agua sobre la superficie no es nuevo. Sin embargo, por muchos siglos permaneció como un misterio, la forma en la cual el agua regresaba a las cuencas de captación o de origen de los ríos.

De hecho, hasta la Edad Media, se pensaba que existían ríos subterráneos que corrían hacia arriba, lo que daba origen a los ríos superficiales. Este tipo de creencias era común también en varias culturas ancestrales.

La percepción se originó, porque se pensaba que la lluvia, por sí sola, no era capaz de producir los caudales permanentes de los ríos en las zonas bajas, dado que estos ríos, tienen agua durante todo el año, aún en períodos en los que no hay lluvias.

¹⁴ Eclesiastés 1:7.

Hubo que esperar hasta el siglo XVII para realizar las primeras mediciones de caudales y de precipitación, en Francia, que arrojaron un resultado sorprendente: el volumen de agua que pasaba por el Sena era “inferior” al volumen de agua que había llovido en la cuenca hidrográfica: solamente entre un 60-70 % de la lluvia se había convertido en caudal.

El ciclo hidrológico y sus procesos principales

Las observaciones científicas respecto de la distribución y circulación del agua continuaron hasta llegar a descubrir el denominado **ciclo hidrológico o ciclo del agua**. Este describe el movimiento tanto vertical como horizontal del agua, en estado gaseoso, líquido o sólido, entre la superficie, el subsuelo, la atmósfera y los océanos terrestres.

Para el estudio del ciclo hidrológico, se separa el movimiento del agua sobre los continentes (también denominada como la *fase terrestre* del ciclo hidrológico) del movimiento del agua sobre los océanos (que es materia de la oceanografía).

*“El agua, desde el principio,
viaja en círculos:
baja del cielo con la lluvia
vuelve al cielo evaporada.
Y comienza de nuevo,
Su trabajo de rueda
de rueda de cristal...”¹⁵*

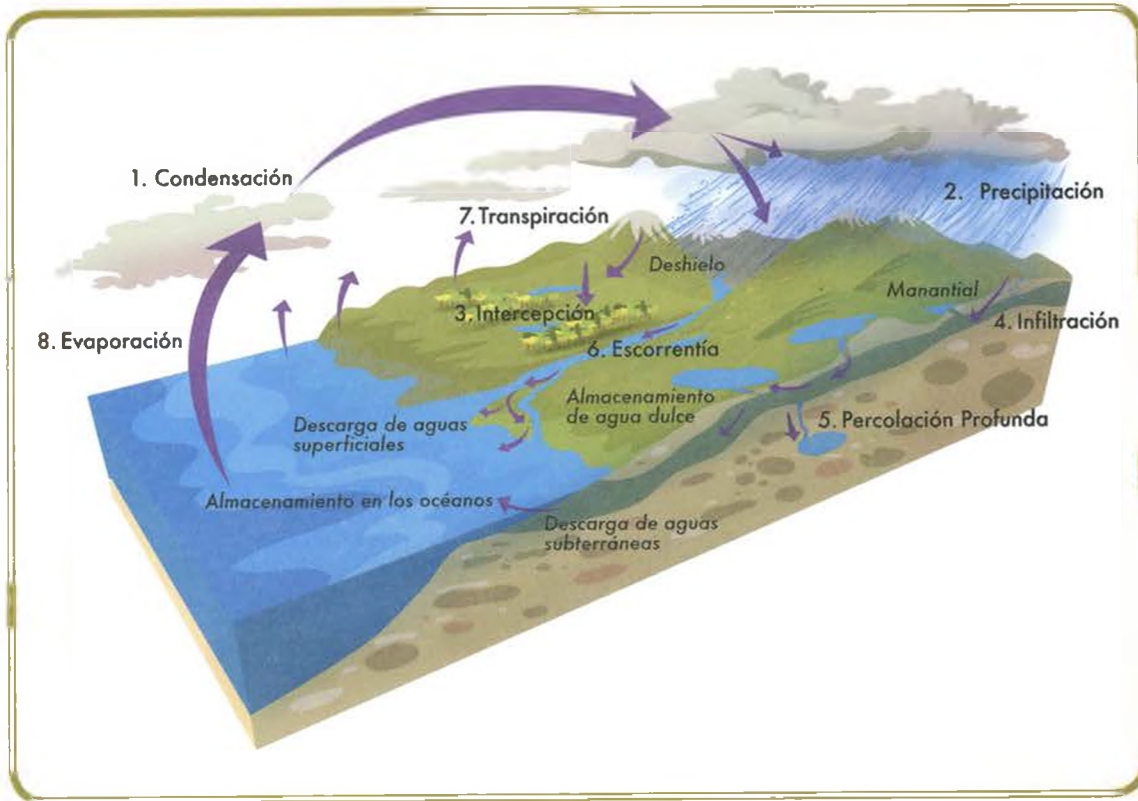
Los componentes del ciclo hidrológico

Los componentes del ciclo hidrológico son:

- condensación,
- precipitación,
- intercepción,
- infiltración,
- percolación profunda,
- escorrentía,
- transpiración, y,
- evaporación.

¹⁵ Castro Saavedra y Samper Martínez. Agua viva, Bogotá, 1988.

Componentes del ciclo hidrológico



Como su nombre indica, el ciclo hidrológico es un proceso continuo de fases por las que se pasa el agua periódicamente. El gráfico de los componentes del ciclo hidrológico muestra la conexión entre estas fases y su concepción puede empezar desde cualquier de ellas. Es común iniciar la explicación del ciclo hidrológico por la **evaporación** del agua desde los océanos y su posterior transporte hacia las zonas altas de las cuencas, donde, por las bajas temperaturas se produce la **condensación**. Aquí es donde empezaremos nuestra explicación.

El primer proceso hidrológico es la condensación: el paso del agua del estado gaseoso al estado líquido.

Inicialmente, el vapor de agua condensado forma gotas de agua de tamaño muy, muy pequeño, que por si mismas no tienen el peso suficiente para precipitarse hacia la tierra. Por eso, muchas nubes no causan lluvia y más bien, una gran cantidad de estas nubes, son evaporadas. Un observador perspicaz, puede ver cómo las nubes aparecen y desaparecen en el cielo.

Una vez que las pequeñas gotas de lluvia se unen, pueden llegar a tener un peso suficiente para precipitarse.

La precipitación es la entrada de agua desde la atmósfera a las cuencas hidrográficas. Esta entrada puede producirse principalmente en forma de lluvia, llovizna, nieve o granizo.

La entrada de agua hacia la cuenca puede darse también por otros procesos como la captura de niebla y el rocío. Estos fenómenos son formas de **condensación**.

Sin embargo, no toda la precipitación llega al suelo, ya que una gran cantidad de agua puede ser **interceptada** por la vegetación y quedarse allí almacenada.

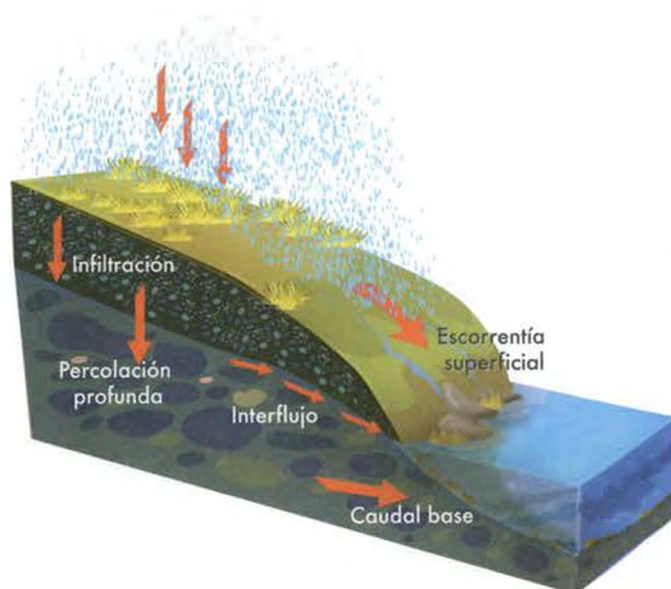
Los pequeños eventos de precipitación pueden ser totalmente interceptados en zonas con abundante vegetación. Sin embargo, la capacidad de intercepción de la vegetación es limitada y basta un evento de volumen considerable (una lluvia larga, una tormenta con lluvia intensa o una secuencia de varios episodios de lluvias breves) para que la capacidad se sobrepase. Entonces una parte del agua no es interceptada y cae al suelo.

Cuando el agua llega al suelo, comienza a humedecerlo. Si la cantidad de agua es pequeña podrá **infiltrarse** hacia capas inferiores del suelo. Pero si el agua cae muy rápidamente (alta intensidad), una parte del agua no podrá infiltrarse y empezará a acumularse sobre la superficie, creando charcos en las concavidades y depresiones.

Si la lluvia continúa, los charcos empezarán a rebosar y el agua escurrirá por las pendientes hacia los cursos de agua (riachuelos, quebradas) en forma de **escorrentía superficial**.

En el dibujo se puede observar:

- **infiltración** de agua en el suelo,
- **percolación profunda** hacia capas interiores,
- **interflujo** o **flujo subsuperficial**, que es relativamente rápido hacia el cauce fluvial por debajo de la superficie,
- **caudal base** que está determinado por la permeabilidad de las capas interiores y más profundas, y
- **escorrentía superficial** que es el flujo que comúnmente observamos.

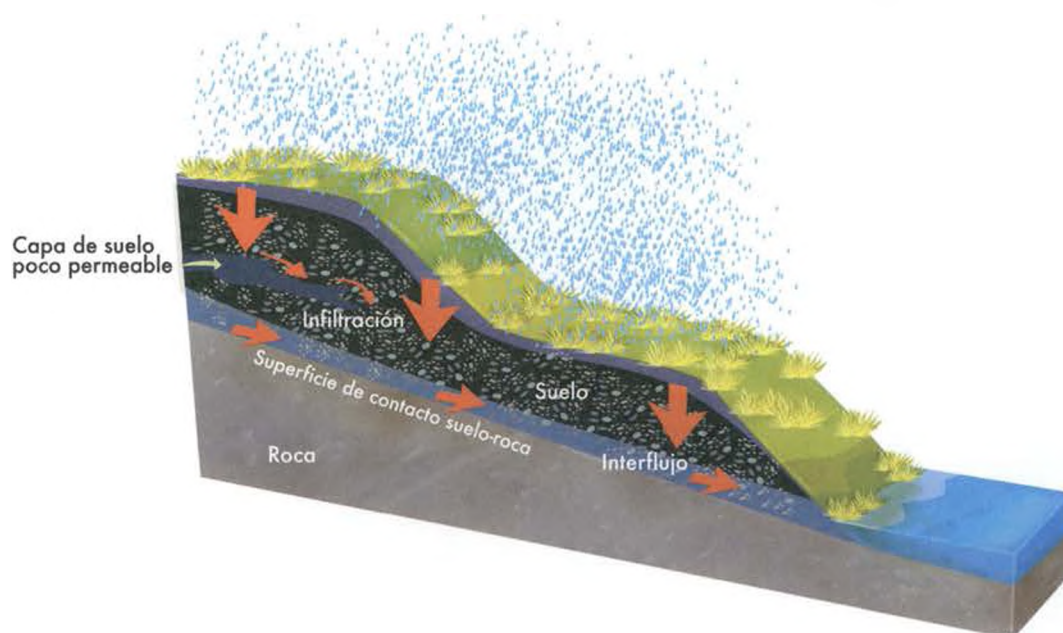


Este mismo proceso ocurre cuando el suelo se ha saturado con varios eventos de precipitación: no puede almacenar más agua y la que queda en la superficie, forma los charcos en depresiones, y escorrentía superficial en las pendientes.

Normalmente el proceso de **saturación** se da en sitios cercanos a los cauces, donde es más probable que el agua que baja de las laderas se acumule, haciendo que estos sitios estén húmedos en forma permanente. La saturación también se da en zonas planas al pie de laderas, donde es común que se formen los humedales.

El agua infiltrada puede llegar a una capa poco permeable del suelo, o a la roca, donde ya no puede infiltrarse con facilidad. Si existe una gran cantidad de agua que llega a esta capa, el agua se acumulará y empezará a fluir ladera abajo, hacia los cursos de agua en forma de **escorrentía subsuperficial**.

Flujo en la superficie de contacto suelo-roca



Parte del agua que permanece dentro del suelo, puede ser utilizada por la vegetación y ser absorbida por sus raíces y, posteriormente cuando es **transpirada**, puede volver a la atmósfera en forma de vapor de agua. La mayor parte del agua tomada del suelo, no es utilizada por la vegetación, sino que retorna como vapor de agua.

Otra parte del agua infiltrada puede continuar penetrando las capas del suelo en forma de **percolación profunda**, que va a recargar los acuíferos de aguas subterráneas, los que, en algún momento, también llegan a fluir hacia los cauces.

Por eso, el agua puede **escurrir** hacia los cauces por tres caminos distintos:

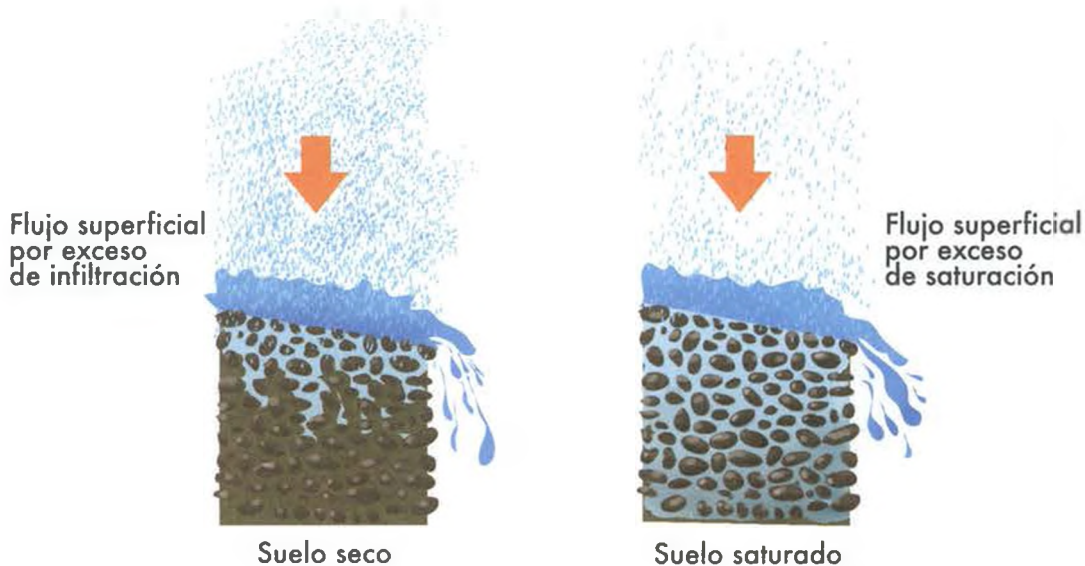
- 1.- **Escorrentía superficial.**
- 2.- **Escorrentía subsuperficial.**
- 3.- **Escorrentía subterránea.**

1. Escorrentía superficial que se produce por dos motivos:

- **por exceso de infiltración**, cuando la lluvia cae con una intensidad mayor a la capacidad del suelo para absorberla. Como no puede ser infiltrada en el suelo, se acumula en forma de charcos y escurre hacia las quebradas o arroyos, y

- **por exceso de saturación**, cuando el suelo llega a su límite de capacidad de retención de agua y ya no puede aceptar más, produce un encharcamiento y un posterior escurrimiento hacia quebradas.

Tipos de escorrentía superficial



2.- Escorrentía subsuperficial que se produce cuando el agua infiltrada escurre bajo la superficie, a poca profundidad. Puede ser un aporte muy importante en zonas con suelos muy permeables y bajas intensidades de precipitación.

3.- Escorrentía subterránea se produce cuando el agua de los acuíferos profundos puede fluir hacia los ríos. En las cuencas hidrográficas donde existen acuíferos, a este flujo también se lo conoce como **flujo base**.

En el caso de los ecosistemas altoandinos, especialmente en los páramos, el **flujo base** se produce por escorrentía subsuperficial debido a la geología.

De estas tres, la más rápida es la escorrentía superficial, seguida por la subsuperficial y finalmente por la subterránea. La velocidad de respuesta de los dos primeros tipos de escurrimiento es de minutos y horas, mientras que para el caso de acuíferos, el agua puede permanecer muchísimo más tiempo (semanas, varios años o incluso décadas) antes de salir hacia los cauces.

De los ríos, el agua fluye hacia grandes cuerpos de agua -ya sean lagos o el mar-. El agua que ha ingresado a la cuenca hidrográfica puede **evaporarse** y retornar a la atmósfera.

La evaporación es el proceso mediante el cual el agua líquida pasa a ser vapor de agua.

Tanto el agua que fue interceptada por la vegetación, como el agua que se ha acumulado en los charcos, puede evaporarse. Esto se produce principalmente por la acción de la radiación solar y la temperatura. Los fuertes vientos también apoyan el proceso de evaporación, así como el estado de humedad del aire.

Un aire más seco puede recibir más vapor de agua, mientras que un aire saturado tiene un límite y no puede recibir más.

Desde allí, el ciclo del agua se inicia nuevamente retomando su destino de rueda, como dice el poeta.

El balance hídrico

El **balance hídrico** es la herramienta más útil para los hidrólogos. Se deriva del concepto de continuidad o conservación de la masa, que se refiere al hecho de saber que el agua no desaparece ni se “produce”, sino que fluye y cambia de estado, debido a los procesos hidrológicos.

Por medio del balance hídrico se puede **calcular la cantidad de agua existente, en un lugar en particular de la cuenca hidrográfica, en un determinado espacio de tiempo.**

De acuerdo con eso, el volumen de agua, en cualquier punto de un sistema hidrológico, puede ser determinado en función:

- del caudal entrante,
- del caudal saliente del sistema y,
- de la cantidad de agua que almacena la cuenca.

En otras palabras:

El caudal entrante menos el caudal saliente, equivale al cambio en almacenamiento dentro de la cuenca.

Esto es:

$$E - S = \pm \Delta A$$

donde: **E** es el caudal entrante,
S el caudal saliente, y,
 ΔA el cambio positivo o negativo ($\pm$) en almacenamiento.

Las **entradas** al sistema hidrológico (generalmente a la cuenca hidrográfica) son producidas por la condensación -rocío, neblina- y las diversas formas de precipitación -lluvia, llovizna, granizo y nieve, entre las más importantes.

Las **salidas** se dan:

- por **evaporación** (de agua del suelo, de cuerpos de agua y del agua interceptada por la vegetación),
- por **transpiración**,
- por **percolación profunda** en algunos casos, y,
- por el **caudal circulante** a través del sitio de interés en el río estudiado (la salida o cierre de la cuenca).

Normalmente a la **evaporación** y a la **transpiración** se les conoce como **pérdidas de agua**, debido a que son **fracciones de agua que retornan a la atmósfera** y, por lo tanto, **no van a contribuir con los caudales de los ríos**.

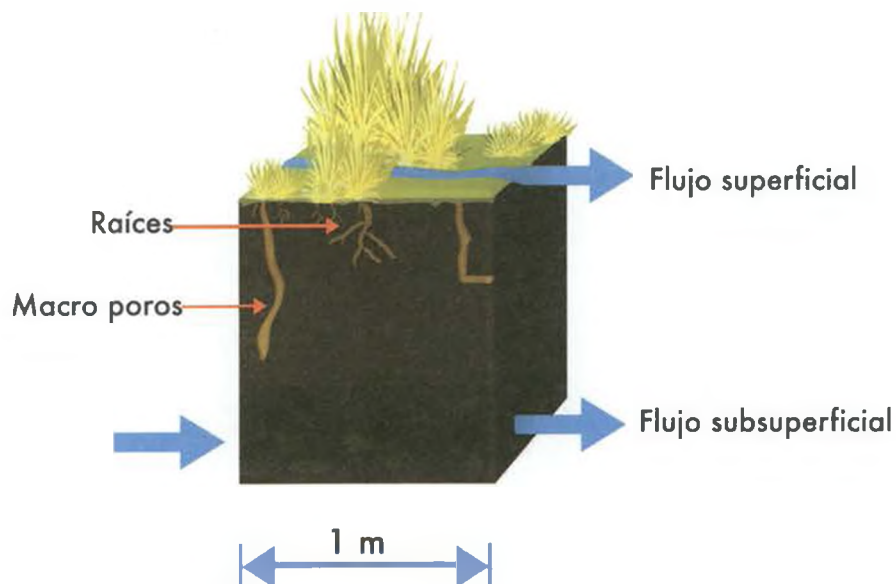
El **cambio en almacenamiento**, representa la variación del agua almacenada en el suelo y en cuerpos de agua dentro de la cuenca estudiada durante un período.

A menudo las personas se preguntan qué componentes del ciclo hidrológico son los más importantes. La respuesta a esta pregunta no es simple, pues depende de muchos **factores** que inciden sobre los procesos o componentes, entre los que se citan:

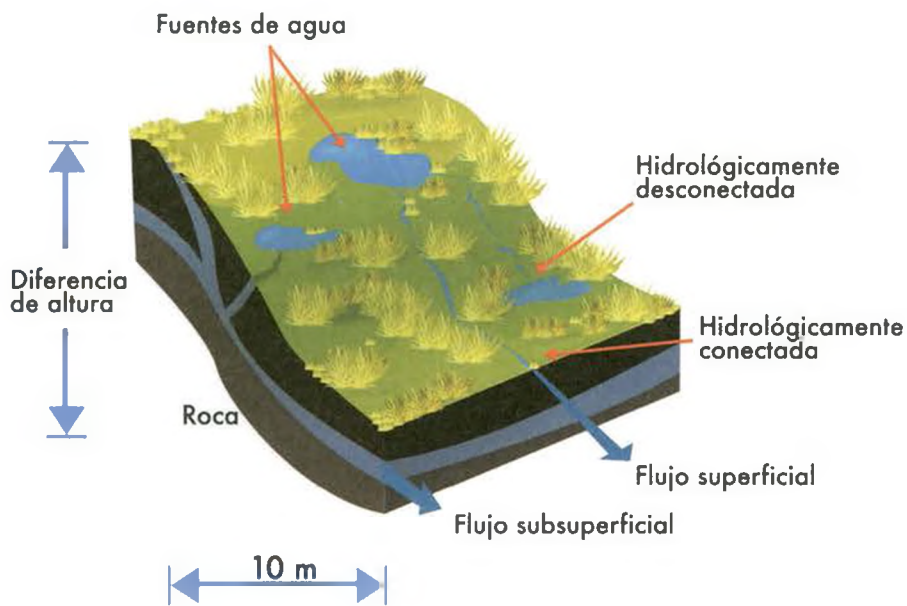
- el **tamaño** de la cuenca o sistema hidrológico de interés, y,
- las **características biofísicas** de la cuenca, entre las que son de particular importancia: el tipo de suelo, la vegetación o uso de la tierra y la topografía (pendientes) del área de interés.

Las escalas frecuentes para la realización de estudios hidrológicos son:

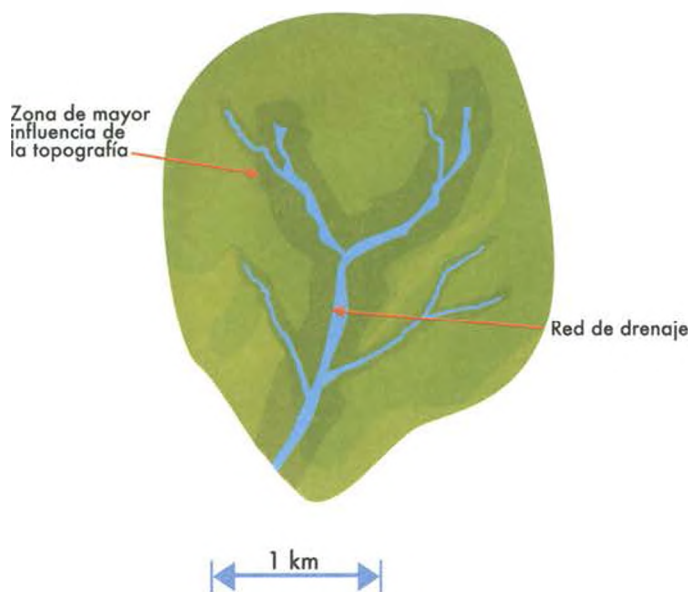
Escala de parcela o pequeña, la respuesta hidrológica está gobernada por la micro-topografía, el tipo de suelos (en relación con su capacidad de infiltración y retención de agua) y la presencia de macro-poros en el suelo (sitios por donde el agua puede infiltrarse mucho más rápidamente) y por donde corre la escorrentía subsuperficial.



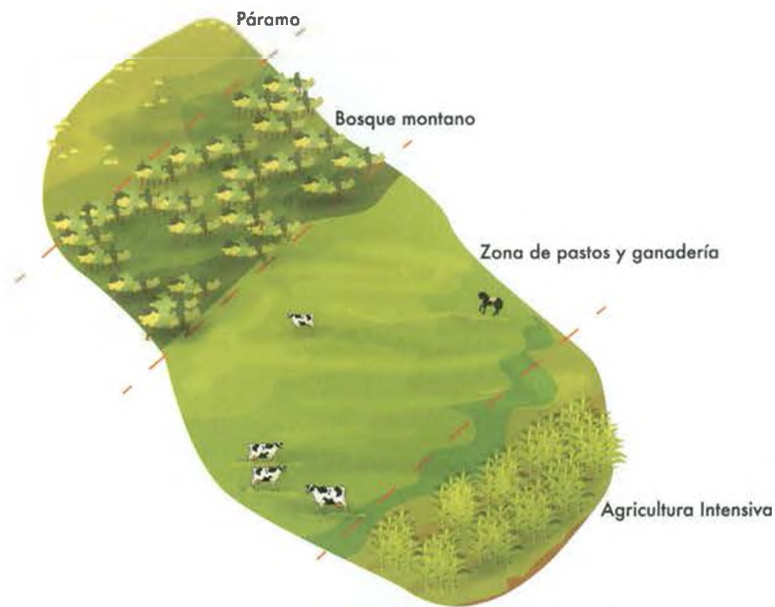
Escala de ladera los factores que la controlan son la topografía (laderas empinadas versus laderas de poca pendiente), la existencia de zonas hidrológicamente desconectadas (por ejemplo, zonas donde el agua se acumula pero no llega a escurrir a una quebrada) y drenajes.



Escala de microcuenca entre 1 y 50 km², es muy importante la topografía (a mayor pendiente mayor velocidad del flujo de agua) y la densidad de la red de drenaje compuesta por quebradas y arroyos (a mayor densidad de drenaje mayor velocidad de salida de agua).



Escala de cuenca o mayores se vuelve más importante la presencia de distintos ecosistemas y usos de la tierra.



El ciclo hidrológico aplicado a la alta montaña: el caso del páramo

En zonas altoandinas el ciclo hidrológico también pasa por los procesos de:

- condensación,
- precipitación,
- intercepción,
- infiltración,
- percolación profunda,
- escorrentía,
- transpiración, y,
- evaporación.

Vamos a describir con mayor detalle cada uno de ellos y su relación con el páramo andino.



En las cuencas que tienen glaciares -siempre que el área de glaciar sea importante-, el mayor control sobre el ciclo hidrológico, se encuentra en los procesos de acumulación de nieve y deshielo, los cuales dependen fuertemente de la radiación solar, la temperatura y de sus variaciones diurnas y estacionales.

Sin embargo, la mayoría de páramos no tienen glaciar por encima, por lo que en este caso, la descripción se realizará para cuencas desprovistas de glaciares.

En los páramos, la **condensación** se produce principalmente por efectos de relieve (orográficos) cuando nubes de aire caliente son empujadas hacia las zonas altas y frías (proceso de convección de masas de aire "valle-montaña") produciendo la formación de gotas de agua por el enfriamiento y su consiguiente precipitación.

La **precipitación**, normalmente, se produce en forma de lluvia, aunque no es rara la formación de granizo. Por lo general, las lluvias no son torrenciales sino que más bien son de baja intensidad y larga duración.

También la neblina produce una entrada adicional de agua por condensación, cuando entra en contacto con la vegetación. Esta forma de entrada de agua, es muy poco considerada en estudios hidrológicos. Todavía hay desconocimiento sobre su magnitud, debido a que es muy difícil de medir (no hay estandarización de instrumentos ni de métodos).



Foto: Rolando Céllez

Intercepción de la lluvia en el pajonal

Por lo tanto, si se considera solamente la lluvia como entrada de agua, se está subestimando la precipitación total.

En muchos páramos, la precipitación es relativamente uniforme a lo largo del año, lo cual comprueba la noción de que los páramos son auténticas **torres de agua**. Esto también favorece la presencia permanente de agua en los ríos.

Cuando la lluvia es interceptada por la vegetación, como se observa en la fotografía, puede evaporarse rápidamente, debido a la acción de la radiación solar y del viento.

Debido a que las lluvias son de baja intensidad, es probable que un buen porcentaje -en relación con otros ecosistemas ubicados montaña abajo- que fue interceptado por la vegetación retorne a la atmósfera. Sin embargo no hay estudios que cuantifiquen estos valores por lo que quedan postulados a manera de hipótesis.

El agua que llega al suelo del páramo, puede infiltrarse rápidamente.

Los suelos del páramo, generalmente del tipo Andosol (el suelo negro encontrado en los páramos), tienen una estructura porosa que facilita la infiltración y además poseen una extraordinaria capacidad para retener el agua.

La mayor parte de los eventos de lluvia tienen intensidades menores a la capacidad de infiltración del suelo, por lo que casi toda el agua lluvia puede infiltrarse, salvo en los humedales o sitios que están saturados.

El contenido de agua en el suelo saturado sobrepasa el 80% de su volumen, lo cual es excepcional si se compara con valores de suelos minerales (de cuencas medias y bajas) que registran valores entre 30 y 40%. Esta alta capacidad de retención de agua se explica en buena medida debido al alto contenido de materia orgánica del suelo.

Por estos motivos, el agua lluvia puede infiltrarse con facilidad en el suelo y permanecer almacenada allí.

Por otro lado, aunque no se reportan mediciones, se estima que el consumo de agua del pajonal es bajo.

En épocas de lluvias permanentes, la capacidad de almacenamiento del suelo se sobrepasa y entonces se forman charcos en todo el paisaje paramero, debido a la presencia de pequeñas depresiones, como se observa en la fotografía.

Por esto no es raro encontrar charcos, aun en zonas de ladera, aunque son mucho más frecuentes en las zonas planas, cercanas a los cauces, donde se forman grandes humedales.



Foto: Rolando Céleri

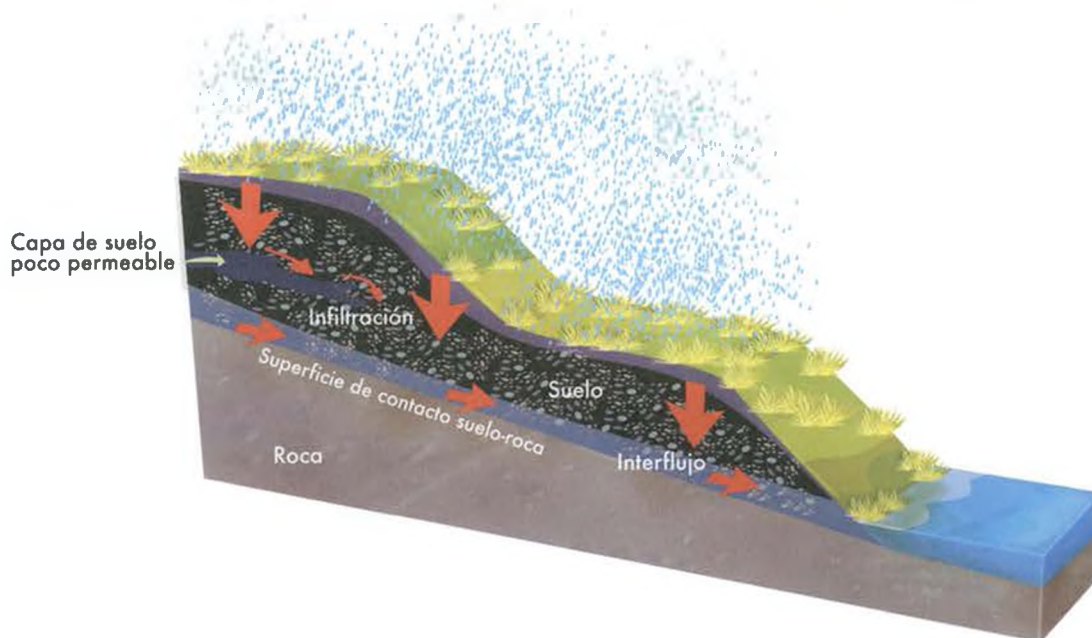
En épocas de lluvias permanentes, la evaporación y transpiración son bajas, por:

- la baja radiación disponible por alta nubosidad,
- las bajas temperaturas, y a que,
- el aire está siempre cerca de la saturación.

Si bien los Andosoles parameros tienen excelentes características hidrológicas, por lo general son suelos poco profundos. Por lo tanto, el agua infiltrada a través de ellos, puede llegar rápidamente al material geológico que tiene una permeabilidad mucho más baja.

Esto ocasiona que el agua empiece a escurrir ladera abajo (flujo subsuperficial), en la zona de contacto entre el Andosol y la capa geológica o roca, como se observa en la figura.

Flujo en la superficie de contacto entre Andosol y roca



La recarga de los acuíferos depende mucho de las condiciones locales y se limita a las zonas donde el material geológico es más permeable, o en las depresiones, donde el agua puede permanecer estancada por más tiempo.

Por eso no se puede asegurar que los páramos sean zonas de recarga. Más bien se puede señalar, que **los páramos alimentan las zonas de recarga ubicadas río abajo, en terrazas y otros depósitos aluviales.**

Con esto, el agua llega a los cauces de páramo por 2 caminos principales:

- **escorrentía subsuperficial**, la más común, que corresponde al aporte de las laderas hacia las quebradas y ríos;
- **escorrentía superficial**, que se produce solamente por lluvia caída en zonas saturadas, normalmente en los humedales cercanos a ríos.

La regulación hidrológica y el rendimiento hídrico

La **regulación hidrológica** es una de las funciones hidrológicas más importantes de los ecosistemas altoandinos.

La regulación del ciclo hidrológico se produce cuando un ecosistema almacena agua durante períodos húmedos, para liberarla durante los períodos secos.

Esta regulación es más fuerte en cuencas provistas de acuíferos profundos, donde el agua puede ser almacenada por décadas y hasta por siglos.

En cuencas con glaciares, el almacenamiento también se produce en el glaciar, en forma de nieve o hielo.

En los páramos, el agua no es almacenada en acuíferos ni en la vegetación (como comúnmente se piensa) sino en el suelo.

La alta regulación hidrológica del páramo se explica principalmente por:

- la alta capacidad de almacenamiento de los suelos, y,
- la morfología de las cuencas.

Debido a su gran capacidad de almacenamiento de agua, los **suelos del páramo** se constituyen en un gran **reservorio**, los que proporcionan un balance natural entre épocas lluviosas y secas.

De no existir estos suelos, los caudales en las épocas lluviosas serían más altos y en las épocas secas los ríos estarían secos.

Por otro lado, la presencia de **depresiones topográficas** en la cuenca, permite la creación de **reservorios naturales**, que acumulan agua por períodos considerables de tiempo. Las zonas altas de páramo pueden tener una cantidad importante de lagunas y charcos que aportan agua a los cauces de quebradas y ríos en forma mantenida y constante.

Igual que los bosques andinos, los páramos son ecosistemas que regulan muy bien el ciclo hidrológico.

Otro aspecto importante es el rendimiento hídrico, que es la relación entre el volumen de agua que ha salido de una cuenca en forma de caudales y el volumen de precipitación que ingresó a ella a lo largo del año.

Las cuencas de páramo presentan un alto rendimiento hídrico (60 - 70 %), mientras que otras cuencas en zonas bajas, presentan rendimientos mucho más bajos.

El alto rendimiento hídrico del páramo se debe principalmente a:

- la baja evapotranspiración de la vegetación, causada por el clima frío y húmedo, y,
- las características especiales de la vegetación paramera.

Si bien un alto rendimiento hídrico es importante para una cuenca, la regulación hidrológica es más importante todavía.

Por ejemplo, una cuenca degradada donde los suelos se han erosionado, puede tener un alto rendimiento hídrico, pero tiene una bajísima regulación. Esto se debe a que el reservorio natural se ha perdido y por lo tanto la cuenca no puede almacenar agua durante la época de lluvias.

Este ejemplo puede ilustrar mejor la diferencia entre rendimiento y regulación:

En una cuenca pavimentada, toda la lluvia sale en forma de caudales, con lo que se tiene un rendimiento del 100%.

Sin embargo, luego de un corto tiempo de finalizada la lluvia, no habría ni una sola gota que salga de la cuenca, con lo que su regulación es nula porque no hay ninguna posibilidad de almacenamiento.

Por ello se encuentra que la función de regulación es más importante que el rendimiento total de una cuenca.

Impactos del cambio de uso de tierras sobre la hidrología del páramo¹⁶

Cuando el ecosistema natural es alterado por la acción humana, se producen cambios significativos en el ciclo hidrológico, debido a que los procesos biofísicos que lo controlan, se alteran, y en consecuencia los servicios hidrológicos se degradan.

¹⁶ Editado del documento Síntesis CONDESAN, Producto 1. Céleri, 2008.

Las acciones más frecuentes que alteran los procesos biofísicos son:

- Quemas,
- Conversión de pajonales en cultivos,
- Conversión de pajonales en plantaciones forestales con especies exóticas, y,
- Conversión de pajonales en pastos para ganadería intensiva o extensiva.



Foto: Pablo Bojita



Foto: Adolfo Correa



Plantación de pinos



Páramo con efectos de sobrepastoreo

Quemas

Los efectos de las **quemadas** son principalmente el aumento de la escorrentía rápida y la erosión del suelo. Esto se debe a la eliminación de la vegetación que lo protege, por lo que las precipitaciones fuertes pueden producir escorrentía superficial que fácilmente arrastra partículas de suelo.

La densidad aparente de los Andosoles es aproximadamente 0.4 g/cm^3 . Esto quiere decir que es más liviano que el agua (1 g/cm^3). Por eso, cuando

el suelo se seca y su estructura se rompe (por ejemplo por arado), es fácilmente transportado por la escorrentía superficial, lo cual explica las altas tasas de erosión en páramos cultivados.

Investigando...

Se estudiaron¹⁷ los **efectos de la quema y la labranza** a escala de parcela, usando un simulador de lluvia. Se encontró un incremento de los coeficientes de escorrentía (relación entre el volumen de escorrentía superficial sobre volumen de lluvia) de entre un 10-15% para una cobertura de pajonales (valor testigo) a valores de entre 30-50% para el primer evento de lluvia, en el sitio quemado, y entre 65-75% para otros eventos de precipitación.

Mientras las pérdidas del suelo en los sitios con pajonal fueron despreciables (aproximadamente 100 g), para los sitios quemados o cultivados, la erosión aumentó en un rango de entre 200 y 1400 g.

Conversión de pajonales en cultivos

Como consecuencia de las **prácticas agrícolas**, los suelos permanecen descubiertos (en barbecho) por algunos periodos de tiempo durante el año. Esta exposición directa a la radiación solar, produce un secamiento del suelo y la correspondiente pérdida irreversible de capacidad de retención de agua, de hasta el 40%, así como también *hidrofobicidad* (el suelo repele o “rechaza” el agua)¹⁸.

En sitios descubiertos, se ha observado que después de un período seco prolongado e intenso, se reduce el volumen del suelo superficial, formando pequeños grumos endurecidos, que han perdido su capacidad de retención de agua.

Las labores de labranza, también ocasionan una reducción de la capacidad de retención de agua en el suelo.

Estudios realizados¹⁹ encontraron una reducción en la capacidad de retención de agua desde valores de 100 y 77% (para saturación y punto

¹⁷ Poulenard et al. 2001.

¹⁸ Buytaert et al., 2002.

¹⁹ Díaz y Paz, 2002.

de marchitez, respectivamente) en páramos naturales hasta 85 y 63%, respectivamente, en cultivos permanentes.

Al estudiar parcelas cultivadas²⁰, se encontró que el balance hídrico está dominado por la evapotranspiración, llegando a constituir hasta un 66% de las salidas de agua del sistema, lo que significa una reducción importante del rendimiento hídrico.

A escala de microcuenca, los efectos de los cultivos son:

- el incremento de los caudales de crecida,
- la reducción de los caudales base (de verano), y,
- el incremento en la erosión.

El problema fundamental es que la capacidad de regulación de la cuenca se ve severamente reducida.

Investigando...

Los estudios en microcuencas se han realizado mediante el monitoreo de cuencas pareadas: se identifican 2 microcuencas muy cercanas una de la otra, lo que asegura que las condiciones climáticas sean muy similares, al igual que los suelos y la topografía. El único aspecto que las diferencia notablemente es la cobertura vegetal o de uso del suelo.

La Universidad de Cuenca²¹, Ecuador, investigó 2 microcuencas en la parte alta de la subcuenca del río Machángara, provincia de Azuay.

Una microcuenca tenía una cobertura natural, mientras la otra estaba cultivada con papas.

Los investigadores monitorearon el caudal y el clima encontrando:

- un cambio significativo en el régimen hidrológico, con un incremento en flujos pico (promedio de 20%), y,
- una reducción fuerte de los caudales base, de hasta un 50%.

De esta manera, la relación entre caudales pico y base, aumentaba de 5 para la cuenca inalterada a 12 en la cuenca agrícola. Así mismo, se encontró una reducción en la capacidad de regulación, estimada en un 40%.

²⁰ Sarmiento, 2000, citado por Buytaert et al., 2006.

²¹ Buytaert et al., 2004 y 2005a, b.

La explicación radica en que **las actividades agrícolas aumentan significativamente la red de drenaje** (para evitar que el suelo se sature), **conectando pequeñas depresiones antes desconectadas y uniéndolas con las quebradas naturales** (la red de drenaje principal).

Por eso también se observó una reducción significativa en el tiempo de respuesta de los caudales a eventos de precipitación: el agua lluvia salía más rápido de la cuenca luego de construir los drenajes.

Aunque no se realizaron mediciones de producción de sedimentos, la cantidad observada de sedimentos en la micro-cuenca con cultivos, fue muchísimo mayor, lo cual se reflejó en el número de ocasiones en que el vertedero, donde se medían los caudales, se llenaba de sedimentos y era necesario hacer la limpieza.

Conversión de pajonales en plantaciones forestales con especies exóticas

A escala de microcuenca las plantaciones de pinos también reducen notoriamente los caudales tanto base como de crecida.

Investigando...

A semejanza del estudio realizado para conocer los efectos de los cultivos, en este caso, se identificaron 2 microcuencas aledañas: una con cobertura natural y otra con plantación de pino patula (*Pinus patula*) de aproximadamente 15 años de edad, con una alta densidad de plantas y sin manejo.

Se encontró que el rendimiento hídrico anual de la microcuenca con pinos fue un 50% menor al observado en la cuenca de pajonales, lo que indica que las pérdidas por evapotranspiración fueron del 50% (despreciando las pérdidas por percolación profunda).

Así mismo, el cambio en el régimen hidrológico fue total, pero, a diferencia del impacto de la agricultura, en este caso, se produjo una reducción significativa tanto de caudales pico como de caudales base. Se observó que los caudales base, en general, llegaban a ser un tercio de aquellos registrados en la microcuenca de pajonales, y el cauce llegó a secarse por completo en ciertas épocas del año.

Si bien los caudales pico fueron reducidos durante años normales, en un evento extremo, registrado en el 2007, los caudales específicos pico, generados en las dos micro-cuencas, fueron de similar magnitud, lo que significa que el posible servicio ambiental de los pinos, de atenuar crecidas excepcionales, quedó descartado.

Esto último se debe a que los suelos de ambas cuencas llegaron a saturarse debido a la lluvia persistente y de elevado volumen. Por lo tanto los suelos de las dos microcuencas ya no tenían capacidad para almacenar más agua, por lo que su respuesta a la lluvia produjo caudales idénticos.

Conversión de pajonales en pastos para ganadería intensiva o extensiva

En el caso de **cambio de pajonales a ganadería**, el principal efecto es un aumento en la densidad aparente del suelo, de 0.4 g/cm^3 en pajonal a 0.62 g/cm^3 en pastos²².

Este fenómeno se explica por la compactación que sufre el suelo, debido al pisoteo por los animales. Se encuentran aumentos en la densidad aparente desde valores entre:

- $0.2\text{-}0.31 \text{ g/cm}^3$ en páramos naturales a $0.34\text{-}0.41 \text{ g/cm}^3$ para ganadería extensiva, y,
- fuertes aumentos de $0.19\text{-}0.3 \text{ g/cm}^3$ a $0.81\text{-}0.86 \text{ g/cm}^3$, en ganaderías permanentes intensivas (aunque valores de hasta 0.99 g/cm^3 fueron encontrados en ganaderías intensivas recientes)²³.

Esta compactación del suelo, ocasiona una reducción en la capacidad de retención de agua y por lo tanto en su cantidad.

Conclusiones similares obtuvieron otros estudios²⁴: una marcada reducción en la capacidad de retención de agua, en zonas con ganadería permanente, **aunque en menor grado** que en zonas cultivadas.

²² Quichimbo, 2008.

²³ Díaz y Paz, 2002.

²⁴ Díaz y Paz, 2002.

Relación entre la provisión de agua y otros servicios ambientales proporcionados por el páramo

Como se dijo, la regulación hidrológica del páramo está dada principalmente por los suelos, entre otras cosas, por sus altos contenidos de materia orgánica.

De hecho, los Andosoles se constituyen en un enorme reservorio de carbono orgánico.

Mientras, en páramos húmedos se pueden tener contenidos de carbono orgánico superiores al 40%, en páramos más jóvenes, se encuentran contenidos de entre 2 y 10% (3.5-10 kg/m²), magnitud similar a la encontrada en páramos más secos.

Las plantaciones de pinos aumentan la evapotranspiración y afectan al suelo.

Investigaciones realizadas en escala puntual²⁵, encontraron que los suelos bajo plantaciones de pino, registraron reducciones en la retención del agua y en el contenido de carbono orgánico del suelo.

En este estudio, los horizontes superior e inferior del **suelo bajo plantaciones de pino**, de 25 años de edad, tuvieron respectivamente un **35 y 57% menos carbono orgánico que los suelos con pajonales**. Mientras que el contenido de humedad del suelo para humedades de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez, se redujo en un 14, 55 y 62%, respectivamente.

El hecho que las humedades de saturación sean muy similares entre pajonal y pinos, mientras que se produce una reducción significativa en el suelo bajo pinos, para la humedad de capacidad de campo y de punto de marchitez, es indicativo de un cambio en la distribución del tamaño de poros y quizás una reducción de poros finos.

La pérdida de materia orgánica del suelo puede ser la causante de la reducción de su capacidad de retención de agua.

²⁵ Farley et al., 2004.

Las plantaciones de pinos, si bien contribuyen a la acumulación de carbono en los árboles, reducen la cantidad de carbono almacenada en el suelo²⁶.

La preocupación es que el carbono está siendo transferido de un reservorio más estable y seguro (el suelo) a otro (plantación) que puede desaparecer por quemas.

Finalmente, cuando la plantación sea cosechada, el efecto neto en el ecosistema será negativo, pues incluso la capa de hojarasca suele ser quemada antes de realizar una nueva plantación.

Entonces:

Existe una estrecha relación entre el servicio hidrológico y el servicio de acumulación de carbono.

²⁶ Farley et al., 2004.

Impactos del cambio climático global sobre el clima en zonas de montaña y el funcionamiento hidrológico

Existe una gran incertidumbre en torno al cambio climático, derivado de lo que sabemos y lo que no sabemos sobre este fenómeno, que crea mitos y certezas en torno a esta situación. En realidad, no estamos en capacidad de describir escenarios futuros precisos, que puedan enmarcar una aplicación uniforme de medidas de adaptación al cambio climático.

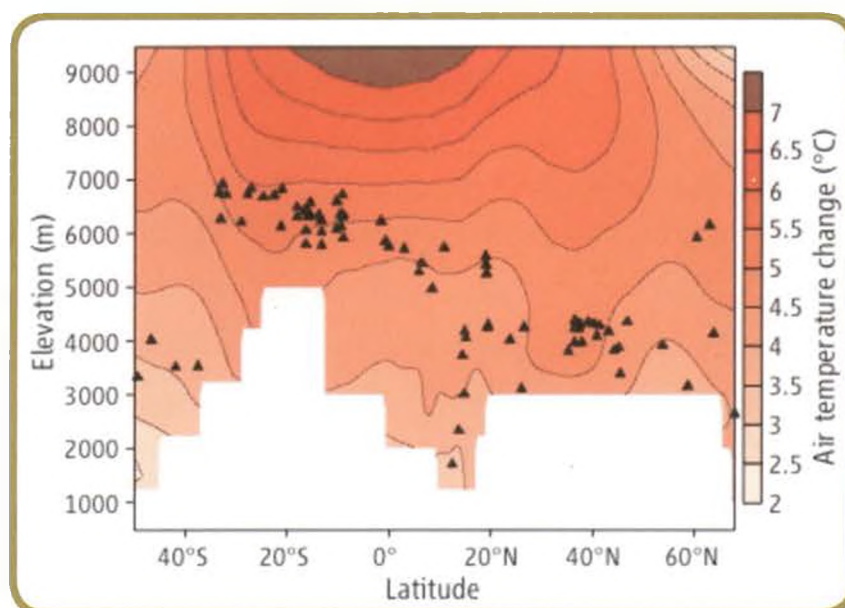
Frente a esta situación, los esfuerzos deben estar dirigidos a fortalecer capacidades, crear sistemas de gestión robustos, mejorar la gobernanza, implementar monitoreo climático e hidrológico, llenar vacíos de información sobre ecosistemas poco conocidos, entre otras acciones que puedan ayudar a enfrentar mejor cualquier evento que venga en el futuro.

La principal certeza sobre los efectos del cambio climático es el aumento de temperatura. Aún con medidas drásticas de reducción de emisiones de CO₂, este efecto seguirá en aumento por un buen tiempo.

Para las zonas de montaña la situación es aún más crítica, hay fuertes indicios que la temperatura aumentará más en la altura que a nivel del mar. Como se observa en la figura, en el eje inferior se representa la latitud, en el eje izquierdo la elevación sobre el nivel del mar, y en el eje derecho el aumento de temperatura atmosférica, los triángulos indican la elevación de las montañas más altas a diferentes latitudes.

Se prevé un aumento en la temperatura a los 3000 msnm del doble que en zonas costaneras.

Cambio proyectado en la temperatura atmosférica a lo largo de la cadena montañosa principal de América del Sur y del Norte²⁷



Las predicciones más optimistas señalan un aumento de 1.5 °C aproximadamente entre los años 2040 y 2070, mientras las más pesimistas indican un aumento de 4.5 a 5 °C.

Los glaciares son excelentes indicadores de cambio climático. Si bien su importancia dentro del aporte hídrico de una cuenca no es tan significativa como el de los ecosistemas altoandinos (páramo, jalca, puna), al menos en la zona tropical, de cierta manera se han ganado un protagonismo en la concienciación de los efectos del aumento de temperatura, por la puesta en evidencia que muestran en su retroceso.

Aún así, el deterioro de los glaciares se limita a áreas cercanas y su peso sobre la hidrología de las cuencas andinas tropicales es bajo, pero aumenta conforme avanzamos hacia el sur de Perú, Bolivia, Chile y Argentina.

Los efectos directos del aumento de temperatura en el tema hídrico son múltiples. Sin tomar en cuenta los cambios en la precipitación, las consecuencias del aumento de temperatura son certeras: los límites verticales naturales entre ecosistemas sufrirán una variación vertical. Así, los límites entre nieves perpetuas, páramo, pastos naturales, y bosques andinos todos suben.

²⁷ Bradley et al., 2006.

Un aumento de 1°C en la temperatura representa en principio una subida de 150 m, verticalmente, de los límites ecosistémicos.

Lo más importante en el análisis de este cambio es la identificación de los ecosistemas que remplazan a los que son desplazados.

Si se produjera una subida totalmente natural de **ecosistemas no intervenidos**, en el límite de páramo o puna se remplazarían los ecosistemas altoandinos -de extraordinaria capacidad en retención de agua- por bosque con características hidrológicas igualmente preciosas, lo cual no sería un cambio dramático.

Pero en una **zona intervenida**, con una presión antrópica creciente, el páramo no sería remplazado por bosque, sino por agricultura u otros usos en los que el cambio en las características extraordinarias hidrológicas si sería muy drástico y perjudicial.

En cuanto a la precipitación, los estudios sobre la base de series de tiempo no encuentran cambios coherentes, significativos, lo que produce una incertidumbre enorme alrededor de esta variable.

Aunque los regímenes de lluvia están cambiando, no existen tendencias coherentes, y se encuentran serias contradicciones en las variaciones registradas de sitio a sitio.

La aplicación de modelos de clima actual y futuro, que intentan obtener en forma detallada las variaciones en la precipitación, encuentra problemas enormes en los Andes. Los modelos no coinciden en los cálculos y proyecciones de futuros regímenes de precipitación. Aún así, el promedio de los modelos indica un cambio pequeño ($\pm 10\%$) en la cantidad de lluvia anual que podría registrarse en el futuro.

Una buena parte de la **percepción** que se tiene sobre disminución del agua disponible, no es por cambios en la precipitación, sino por otros cambios no necesariamente relacionados al cambio climático. El aumento de la demanda de agua y el aumento de la extracción de agua de las fuentes produce que aguas abajo haya menos cantidad del líquido vital que antes. Por lo tanto observamos menor caudal que podemos relacionar erróneamente con la menor cantidad de lluvia.

La reducción de la cantidad de agua no necesariamente se debe a que llueva menos, sino al aumento en la extracción de agua más arriba.

También se debe al deterioro de las cabeceras de las cuencas hidrográficas, la degradación de humedales y de ecosistemas. Este deterioro afecta la capacidad de regulación y por lo tanto, reduce el agua disponible en los caudales durante la época seca. Además provoca que la cuenca responda de manera diferente y no porque la precipitación haya cambiado. A esto se suma que no se recuerdan las variables climáticas que cambia con frecuencia naturalmente en nuestro medio.

El cambio climático produce una variación en la demanda de agua de los ecosistemas. El aumento de temperatura produce un incremento en la evapotranspiración que resulta en la disminución del agua que se infiltra y escurre por el suelo. Sin embargo, los **cambios producidos por el aumento de la población pueden ser más significativos**, debido al incremento de la demanda de agua para cultivos, generación hidroeléctrica y consumo humano.

Una de las fuentes de incertidumbre mas importantes, con respecto a los efectos del cambio climático es la existencia de vacíos importantes en el conocimiento sobre los procesos climáticos e hidrológicos actuales de los ecosistemas andinos.

La limitada capacidad predictiva de los modelos de clima se fusiona con la dificultad de traducir las proyecciones climáticas que estos arrojan en proyecciones hidrológicas de caudales resultantes.

Para conocer mejor el futuro, entendamos primero el presente.

Finalmente, la población andina siempre se ha caracterizado por su capacidad de adaptación a la variabilidad climática. La diversificación de los cultivos en distintos pisos ecológicos, las grandes variedades de productos y los sistemas de riego que tienen como fuente un área con régimen hidrológico complementario, son medidas que han permitido el desarrollo de las culturas andinas en situaciones extremas.

La incertidumbre: ¿Cómo actuar frente al Cambio Climático?

Muchos de los problemas que existen actualmente en la gestión de recursos hídricos se deben a fallas en la gobernanza más que a la falta del propio recurso.

La **gobernanza del agua** se refiere a todos los sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que regulan el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos, así como el suministro de servicios del agua en diferentes niveles de la sociedad. Por consiguiente, la gobernanza también abarca la forma en que los actores interactúan a diferentes niveles (desde el local hasta el internacional) y los diversos conjuntos de normas que regulan dicha interacción, ya sean formales (por ejemplo la legislación del agua) o informales (por ejemplo las normas sociales).

En el contexto del cambio climático la gobernanza del agua tendrá que enfrentar cada vez más incertidumbres que no pueden reducirse en el corto plazo (por ejemplo incertidumbres relacionadas con la precipitación y el régimen fluvial, o con la intensidad y la frecuencia de los fenómenos extremos), así como decisiones sobre políticas que no pueden posponerse hasta tener más conocimientos sobre la materia.

En consecuencia, para poder hacer frente a las incertidumbres y sorpresas inevitables se requiere un sistema de gobernanza del agua flexible y sólido.

Últimamente muchos países han emprendido reformas en el sector del agua, que a menudo se basan en el enfoque de la **gestión integral de recursos hídricos** (GIRH).

La GIRH bien aplicada es una buena manera de aumentar la capacidad de respuesta del sistema de gobernanza del agua frente al cambio climático. Además, varios procesos de elaboración de políticas que actualmente se están desarrollando a nivel internacional, ofrecen marcos y oportunidades para introducir una gobernanza del agua más adaptable.

Se concluye que:

- Los sistemas de **gobernanza policéntrica** pueden tener una mayor capacidad de respuesta al cambio climático que los sistemas centralizados o fragmentados.

- Los sistemas de gobernanza de recursos hídricos que han adoptado **enfoques innovadores involucrando las incertidumbres** existentes en la toma de decisiones, tenderán a responder de forma más adecuada al cambio climático que se produzca en el futuro.
- Un **marco legal y administrativo razonable** para la gestión de recursos hídricos es un requisito esencial para obtener buenos resultados en la adaptación relacionada con el agua, pero debe complementarse con una capacidad de implementación adecuada.

Las medidas de conservación hídrica que se han tomado en cuenta antes de la consideración del cambio climático, son válidas para este fenómeno.

Conservar los bosques, ecosistemas altoandinos, páramos y humedales, no invadir áreas conservadas mediante la introducción de vegetación de alto consumo de agua (como pinos o eucaliptos), la restauración de la cobertura vegetal natural en sitios donde se haya perdido, el almacenamiento a nivel macro y micro de agua para satisfacer la demanda y reducir la presión sobre los ecosistemas, la disminución de pérdidas y el aumento en la eficiencia de uso, son todas medidas que se han considerado antes y que ahora dentro de un contexto de cambio climático requieren una mejor y más rigurosa aplicación.

La investigación científica ayudará a reducir la incertidumbre sobre los procesos hidrológicos que aún se desconocen como a potenciar la aplicación de éstas medidas.

Monitoreo hidrológico en microcuencas

El monitoreo hidrológico comprende la observación de los caudales de los ríos y cursos de agua. Esta observación se la realiza sobre la base que los niveles del agua de un sitio determinado del río o curso de agua pueden traducirse en caudales. Sin embargo, hay que dejar en claro que medir el nivel del agua en una sección, no es una medición directa de caudal. La conversión de niveles en caudales, dependerá de varios factores como: la precisión en las mediciones, los cálculos efectuados para esta transformación, pero sobre todo, del tipo de sección del río o curso de agua.

La estimación de caudales mediante la medición de niveles de agua en una sección conocida es más precisa que la realizada sobre una sección natural generalmente irregular.

Al igual que el caso del monitoreo meteorológico, existen estaciones hidrológicas manuales y automáticas.

En las estaciones manuales es necesario contar con un operador u observador permanente, encargado de realizar las lecturas del nivel del agua. En este caso el nivel del agua se puede medir por medio de una regleta graduada (en centímetros) ubicada en una de las márgenes del río. A este tipo de estación se la conoce como **estación limnimétrica**.

Por otro lado, las estaciones automáticas miden el nivel del agua sin la necesidad de un operador permanente. Estas estaciones pueden estar equipadas con equipos mecánicos y/o con sensores electrónicos que realizan la lectura de niveles en forma automática.

En el caso de contar con equipos mecánicos, la estación está provista de un flotador enlazado a un tambor giratorio, equipado con un papel especial. El tambor gira alrededor de su eje y una pluma del sistema del flotador marca las variaciones de nivel de agua. Así, los niveles de agua quedan graficados en el papel. Estas son las **estaciones limnigráficas**, pues grafican la variación del nivel del agua.

Por otro lado, las **estaciones electrónicas** están equipadas con sensores que detectan el nivel de agua. Los datos son almacenados en una memoria ubicada dentro del sistema electrónico de la estación.

En ambos casos, es necesario un operador ya que las labores de mantenimiento, calibración y descarga de la información, tienen que realizarse de manera periódica. Una de las tareas más importantes es la comprobación de la calibración del sensor electrónico, que puede descalibrarse y arrojar datos equivocados.

En cuencas pequeñas, es factible la construcción de un **vertedero** en el cauce.

El **vertedero** es una obra hidráulica que permite una medición bastante precisa del nivel del agua y del caudal. La construcción de esta obra permite tener una sección conocida en el cauce de agua en la cual la estimación del caudal en función de la altura de agua depende únicamente de sus características geométricas e hidráulicas. El vertedero más común es el triangular, aunque en casos de mayor caudal los vertederos rectangulares o de sección combinada (triangular y rectangular) son necesarios. Los caudales bajos se estiman de forma precisa con la altura de agua sobre el vertedero triangular, mientras que los caudales altos pueden ser estimados con la altura sobre la sección rectangular combinada.

Vertederos en ríos y quebradas de páramo

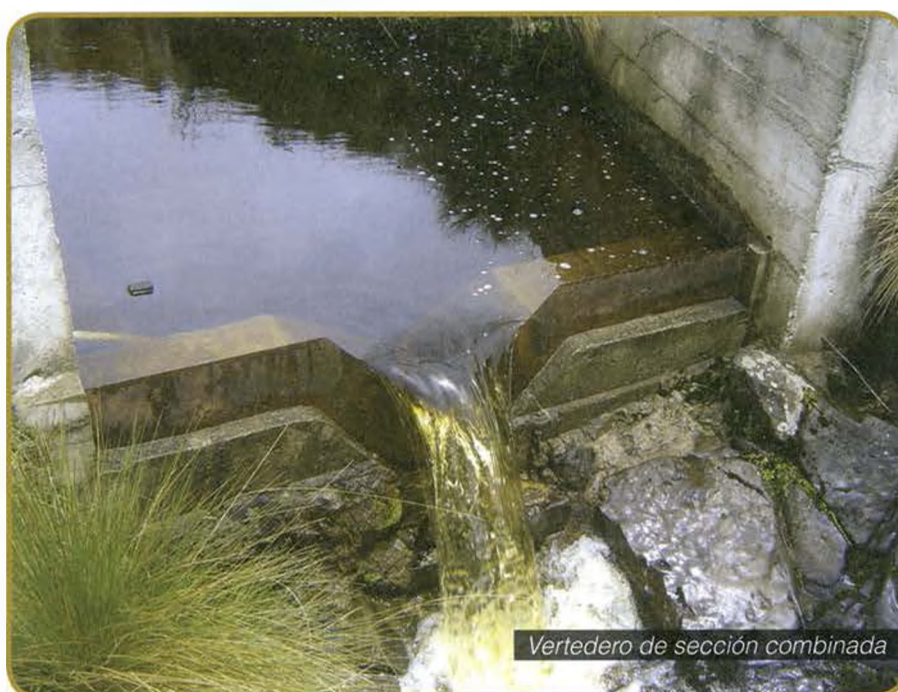


Foto: Henri Hampel

Vertedero de sección combinada



Foto: Rolando Calieri

Vertedero triangular en cauce pequeño

En las fotografías se observan vertederos que forman parte de un observatorio eco-hidrológico del Grupo de Ciencias de la Tierra y del Ambiente de la Universidad de Cuenca, compuesto por 11 vertederos en una misma microcuenca de páramo ubicada en el sector de Quimsacocha, en la cuenca de Zhurucay. Los vertederos mostrados son (a) de hormigón y platina de metal, de sección combinada triangular y rectangular en una microcuenca de 3 km² y (b) de metal, de sección triangular en una microcuenca de 0.2 km² a la salida de un bosque de polylepis.

*Para lograr un monitoreo adecuado con fines de conocer el funcionamiento de una cuenca hidrográfica, es necesario combinar el monitoreo hidrológico con el monitoreo meteorológico, en el denominado: **monitoreo hidrometeorológico**.*

Cuando además el objetivo es determinar los servicios ambientales hidrológicos, se deben conocer también varios detalles de sus aspectos biofísicos como los suelos, su pendiente y sobre todo, sus usos.

Monitoreo hidrológico + monitoreo meteorológico = monitoreo hidrometeorológico

Monitoreo mínimo

El monitoreo básico de una cuenca se denomina **monitoreo mínimo** y consiste en monitorear las **precipitaciones** (principalmente la lluvia) y los **caudales** a la salida de ella.

El número de pluviógrafos necesarios para medir la lluvia, dependerá de:

- las dimensiones de la cuenca,
- la variabilidad espacial de la precipitación, y,
- el número de ecosistemas presentes, aguas arriba del sitio de medición del caudal.

En una microcuenca de menos de 5 km², normalmente, hay un solo ecosistema, pero la variabilidad de la lluvia, puede ser significativa (algunos estudios han demostrado variaciones de un 25% en microcuencas de 1 km²).

Con esta configuración de la red de monitoreo, la evapotranspiración se puede estimar cerrando el balance hídrico, sobre la base de la diferencia entre volúmenes de lluvia y caudal, en un tiempo dado, siempre y cuando las condiciones de humedad del suelo sean similares al inicio y al final del período de estudio.

Por otro lado, si se desea calcular la evapotranspiración, para afinar el estudio, será necesaria la implementación de una estación meteorológica, la cual, además de medir las variables meteorológicas, puede equiparse con sensores para medir la humedad del suelo. Estos últimos datos permitirán reducir la incertidumbre con relación al estado de almacenamiento de agua en el suelo.

Los sensores electrónicos pueden ser programados para registrar datos a cualquier intervalo de tiempo, proporcionando una gran facilidad para las personas que realizarán los cálculos.

Generalmente la frecuencia de toma de datos depende:

- del tamaño de la cuenca,
- de la capacidad de memoria del sensor, y,
- de la frecuencia de recolección de datos de los operadores.

Si en una cuenca pequeña se toman datos con baja frecuencia (por ejemplo diarios) es muy probable que no se registren los picos de las crecidas, con lo cual se puede subestimar la cantidad de agua que sale de la cuenca.

Por otro lado, la toma muy frecuente de datos (algunos sensores permiten tomar datos cada segundo) va a llenar la memoria del sensor muy rápidamente, proporcionando información redundante, que es de poco interés para los estudios, desgasta las baterías del sensor e inclusive, puede ocasionar un desgaste prematuro a algunos sensores.

Para cuencas de 1 a 3 km² se sugiere una toma de datos cada 5 minutos, pero este valor deberá ser escogido según los objetivos de la investigación.

Este monitoreo hidrometeorológico deberá complementarse con datos de la morfología de la cuenca y estudios de suelos (tipos de suelos, su profundidad, propiedades de retención de agua, cantidad de materia orgánica, entre otros) para poder tener el panorama completo del funcionamiento hidrológico de las cuencas.

Finalmente, es muy recomendable conocer los requerimientos de potenciales usuarios de esos datos, aparte de las personas involucradas directamente, quienes podrían cofinanciar la operación de los equipos.

Monitoreo hidrológico participativo



Foto: Henni Hampel

Lectura de datos, comuneras de Mixteque y técnicos de la Universidad de los Andes. Venezuela

El monitoreo participativo es un proceso de colaboración para recoger y analizar datos, y comunicar resultados, en un intento conjunto de identificar y resolver problemas.

La comunidad propietaria de la tierra o que usa el agua en donde se desarrollan las actividades de monitoreo hidrológico, debe resultar beneficiada y participar durante todo el proceso de investigación sobre el funcionamiento hídrico del ecosistema y no únicamente en la aplicación de los resultados.

La vinculación entre comunidad – institución – gobierno – organización, es fundamental para la sostenibilidad del sistema de monitoreo, pero sobre todo para identificar los objetivos y poner en práctica los resultados para la obtención de las metas que efectivamente benefician a los socios involucrados.

Así, la comunidad conoce:

- los elementos causa-efecto de sus acciones sobre la hidrología,
- tiene acceso a información científica y técnica que permita mejorar sus prácticas,
- recibe apoyo presupuestario para el manejo y la gestión de la cuenca,
- puede dar prioridad de acción a los grupos marginados, y,
- logra un mayor vínculo con el gobierno, lo cual le permite el acceso y la influencia sobre los tomadores de decisiones.

La organización, institución o gobierno, por su parte pueden:

- realizar el monitoreo con un presupuesto menor gracias al apoyo de la comunidad,
- trabajar con más información en el planeamiento gubernamental, y,
- fortalecer la vinculación con la colectividad mediante la extensión de redes de monitoreo a diferentes niveles.

La participación de la comunidad en el proceso de monitoreo hidrológico puede ser de forma directa o indirecta, siempre considerando que los fines hacia los cuales apuntan los resultados de este proceso, son para el beneficio de la comunidad.

La inclusión de la población en el proceso garantiza que la toma de conciencia sobre la información resultante sea más fácilmente aceptada y aplicada por los habitantes y que se produzca una retroalimentación

que enriquezca la investigación y la toma de decisiones que involucren al monitoreo.

Así por ejemplo, si una comunidad es vinculada a un proceso de restauración de bosque nativo, mediante la clausura de una zona que anteriormente era usada para pastoreo, el proceso de participación de la población, permitirá que la transformación hacia otras prácticas de uso de suelo y desarrollo sustentable, que justifiquen y suplan su antigua actividad económica, sea aceptada.

Si durante el monitoreo en esta área, la comunidad es testigo del cambio favorable en el funcionamiento hidrológico, su convicción y apoyo a estos procesos se verá altamente fomentada.

La participación de la comunidad en el proceso de monitoreo puede implicar una colaboración sobre un sistema manejado por la institución encargada, como el mantenimiento de los equipos, limpieza, seguridad y su cuidado. O puede ser incluso más directa, mediante la realización de prácticas de monitoreo sencillas que permitan a los habitantes de la comunidad la toma de sus propios datos, que adecuadamente procesados, desemboquen en información valiosa.

Aun así, hay que considerar que la participación de la comunidad no está limitada solamente al uso de equipos de baja tecnología o bajo presupuesto, sino que el fortalecimiento de capacidades debe ser un eje transversal que guíe las propuestas de monitoreo.

Si bien el monitoreo hidrológico mínimo puede ser limitado a la hora de responder preguntas complejas sobre la dinámica del ecosistema, aporta información valiosa sobre procesos aún desconocidos respecto de su funcionamiento hidrológico. Además, la sola comparación entre la respuesta hídrica por diferentes usos de la tierra permite responder preguntas como ¿cuánto de la regulación hidrológica se puede perder si la cuenca es degradada?, o ¿cuánto de la regulación hidrológica se puede recuperar con acciones de restauración de ecosistemas degradados?

Si bien los objetivos que tiene cada institución a la hora de realizar monitoreo hidrológico son diferentes, es fundamental definir metas que estén guiadas hacia el trabajo de la población que depende de la tierra y el agua donde se encuentran los equipos de monitoreo.

Las escalas de monitoreo son altamente variables según los objetivos de un municipio, una ONG o un grupo de investigación y es importante considerar que el factor humano es siempre una constante en todos los casos.

La información que genera la ciencia no siempre es la adecuada para la gestión debido a las agendas aisladas entre científicos y políticos. Este desfase de información ha dado como resultado la generación de mitos sobre los ecosistemas andinos y el comportamiento hidrológico, como la sobrestimación de los glaciares o la falsa certeza sobre los beneficios de la (re)forestación.

El uso de la información científica está sujeto a intereses sectoriales, y ambos actores deben enfrentar problemas complejos que lleven a coordinar su trabajo en una labor conjunta. La gestión de recursos hídricos es un proceso evolutivo, se promueve la creación de una nueva cultura del agua, con enfoque ecosistémico que complemente y fortalezca la gestión.

Es necesario asegurar un ajuste claro entre la información suministrada y la requerida, coordinar agendas comunes, dar acompañamiento continuo, crear una plataforma de comunicación permanente entre la ciencia, la práctica y la toma de decisiones. Hay que ser pragmático en el momento de aceptar que llegar a un consenso es mejor que perseguir una utopía.

ACTIVIDADES

Le proponemos que cuando pueda, y con el propósito de fijar sus conocimientos y realizar comprobaciones que seguro serán nuevos aprendizajes, realice las siguientes actividades en campo, teniendo en cuenta que:

- Dado el clima tan variable que se puede encontrar en el páramo, es muy difícil planificar las acciones a realizar durante un día de campo para observación del clima y la hidrología. Y es que lo ideal es poder observar toda esta variabilidad para entender mejor cómo se dan las interrelaciones clima-vegetación-suelo-agua.
- Es importante la duración de la visita y la hora del día en la cual se realizará. Con suerte, en una visita de un día completo, se podrán observar las variaciones más importantes del clima y la precipitación. Pero en caso de una visita corta, las posibilidades son menores (normalmente se espera lluvia durante la tarde y noche, mientras al medio día puede estar soleado).
- Un día con buen clima (soleado) no es el ideal para observar y comprender las características del páramo.

Por todo lo expuesto, nos pareció importante ofrecerle un listado de actividades que se pueden desarrollar de acuerdo a las circunstancias aprovechando las condiciones existentes.

Hemos incluido varias actividades para ser realizadas en diferentes situaciones climáticas (meteorológicas), de modo que siempre se podrá aprovechar la visita al campo.

¿Qué necesita llevar?

- Cuaderno para realizar anotaciones,
- Cámara de fotos,
- Vailejo, pala o machete (para remover el suelo),
- Ropa apropiada para clima muy frío y húmedo (lluvioso), impermeable, gorra con visera, ropa abrigada y gruesa. Botas de caucho son siempre recomendadas.
- Flexómetro.

Otros artículos recomendados (pero no imprescindibles)

- Altimetro
- GPS

Seleccione la actividad que le interese de acuerdo con las condiciones climáticas:

Componente	Va a observar:	Objetivo	Actividades y Preguntas guía
Meteorología, tiempo	Temperatura, humedad, radiación, nubes, neblina, velocidad del viento.	Identificar cambios claves en el tiempo. Identificar diferencias entre el tiempo del páramo y las regiones bajas cercanas	Describir las condiciones del tiempo (de cada variable) y su variación durante la duración de la visita. ¿Cómo cambian las variables meteorológicas cuando se nubla el cielo? ¿Qué se puede decir acerca de la variabilidad del tiempo? Comparar las condiciones existentes en el páramo con las de la ciudad más cercana. ¿En qué se diferencian y en qué se asemejan?
Precipitación	Lluvia, neblina	Identificar las características de las diferentes formas de precipitación	Opinar sobre la intensidad de la lluvia. ¿Se pueden apreciar diferencias con la intensidad de la lluvia de las zonas más bajas de los alrededores? Muchas personas piensan que la constante llovizna del páramo no es suficiente para llegar al suelo y luego a los cauces. ¿Usted que opina? ¿La neblina llega a topar el pajonal u otra vegetación, o se mantiene por encima de ella? ¿Podrá mojar al pajonal y sumarse así al agua lluvia? ¿En qué casos, es frecuente qué?

Componente	Va a observar:	Objetivo	Actividades y Preguntas guía
Intercepción	Intercepción en pajonal y otras formas vegetales	Determinar la capacidad de la vegetación para interceptar la precipitación	Observar la ocurrencia de agua interceptada por la vegetación: ¿Qué porcentaje de lluvia es interceptada? ¿Cómo se relaciona con la intensidad de la lluvia? ¿El agua interceptada puede escurrirse y llegar al suelo?
Humedad	Humedad del suelo y evaporación	Determinar los efectos de la cobertura/uso de tierras sobre la humedad del suelo	Observar las diferencias de humedad del suelo bajo diferentes coberturas: Bajo pajonal, en humedales, en zonas desprovistas de vegetación, en zonas cultivadas, en plantaciones forestales, en zonas ganaderas (intensivas y extensivas). Responda estas preguntas: ¿Son significativas? ¿Pueden observarse diferencias en la estructura del suelo bajo diferentes coberturas? Si el suelo descubierto está seco, ¿a qué profundidad se encuentra suelo húmedo?

Componente	Va a observar:	Objetivo	Actividades y Preguntas guía
Capas de suelo	Horizontes	Conocer algunas características físicas (infiltración, capacidad de almacenamiento de agua, humedad) de las capas de suelo	En la carretera de acceso, detenerse en un sitio donde exista un corte en el que se pueda observar un perfil de suelo completo (desde suelo negro hasta roca). ¿Qué profundidad tiene el suelo negro? ¿Pueden observarse diferencias en humedad entre los diferentes horizontes/capas de suelo? ¿Pueden observarse sitios con mayor humedad que otros? ¿Dónde están ubicados? ¿Qué se puede decir/inferir sobre la capacidad de infiltración y de almacenamiento de agua en cada horizonte? ¿En qué dirección se mueve el agua que se infiltra desde la superficie hasta llegar a un cauce? Si el suelo negro esta seco, ¿se puede notar alguna diferencia en la textura y estructura del suelo seco con respecto a un suelo negro no expuesto a los efectos del clima? (Es posible que sea necesario remover un poco el material seco para analizar).

Componente	Va a observar:	Objetivo	Actividades y Preguntas guía
Evaporación y evapotranspiración	Evaporación y evapotranspiración	Identificar las principales fuentes de evaporación Reforzar el concepto de evapotranspiración, en especial su variabilidad temporal	Es muy difícil observar la evaporación y evapotranspiración, debido a que son procesos lentos, sin embargo es una buena oportunidad para conversar sobre estos procesos en: • Agua interceptada por vegetación • Charcos • Lagunas y humedales • Suelo cubierto por vegetación • Suelo descubierto (por quemas por ejemplo) • Cultivos • Pastos • Bosquetes • ¿Qué variables meteorológicas afectan la evaporación de cada una de estas superficies? Ordene las superficies de acuerdo con su grado de evaporación potencial. ¿Cómo cambia la evaporación y evapotranspiración potencial en el tiempo (estaciones, meses, años)?
Uso de tierras y ciclo hidrológico	Uso de la tierra, componentes del ciclo hidrológico	Determinar y comprender las interrelaciones entre uso de tierra y ciclo hidrológico	Sobre la base de los procesos observados y las actividades anteriores: ¿Cómo afecta el mosaico de usos de tierra observados al ciclo hidrológico y a los caudales que salen de la cuenca? ¿Qué componente del ciclo hidrológico es el más afectado por el uso de tierras? Plantee estrategias para minimizar los efectos negativos del uso de tierras sobre el ciclo hidrológico.

Glosario

Capacidad de campo: es el contenido de agua o humedad que es capaz de retener el suelo luego de saturación o de haber sido mojado abundantemente y después dejado drenar libremente, evitando pérdida por evapotranspiración hasta que la humedad del suelo se estabilice.

Corriente cálida del Niño: es una corriente marina cálida que se orienta hacia el sur y que se da en la costa occidental del Pacífico, en la zona intertropical, cada mes de diciembre. Sin embargo, en la actualidad, se reserva el nombre de "el Niño" para el fenómeno oceánico y atmosférico que ocurre por el calentamiento de las aguas del Océano Pacífico, con circunstancias excepcionalmente intensas y persistentes que se repiten de forma erráticamente cíclica.

Corriente fría de Humboldt: es una corriente marina originada por el ascenso de aguas profundas muy frías, que se produce en las costas occidentales de América del Sur y que recorre desde la costa central de Chile hacia el norte, pero principalmente a lo largo del litoral peruano. Ejerce influencia determinante sobre el clima de la costa chileno-peruana con cielos cubiertos de neblinas, ausencia de lluvias y temperaturas templadas durante el invierno.

Densidad (símbolo): en física y química, es una magnitud escalar referida a la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

Densidad aparente y densidad real: la densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales porosos como el suelo, los cuales forman cuerpos heterogéneos con presencia de aire u otra sustancia normalmente más ligera, de forma que la densidad total del cuerpo es menor que la densidad del material poroso si se compactase.

Gradiente: es la intensidad de aumento o disminución de una magnitud variable.

Granizo: es un tipo de precipitación que consiste en partículas irregulares de hielo. El granizo se produce en tormentas intensas en las que se producen gotas de agua sobreenfriadas, es decir, aún líquidas pero a temperaturas por debajo de su punto normal de congelación (0 °C).

Hidrometeoros: son partículas acuosas suspendidas en la atmósfera.

Humedad de saturación: es el contenido de agua o humedad máxima que puede contener el suelo en unas condiciones determinadas de presión, compactación, porosidad y estructura.

Intensidad de precipitación: es la razón de incremento de la altura (mm de lluvia) que alcanza la lluvia respecto al tiempo. Por la intensidad, las lluvias se clasifican en débiles (menor a 2 mm/h), moderadas (entre 2 y 15 mm/h), fuertes (entre 15 y 30 mm/h), muy fuertes (entre 30 y 60 mm/h) y torrenciales (mayor a 60 mm/h).

Llovizna: es un tipo de precipitación que se caracteriza por tener un tamaño de gota pequeño, usualmente menos de 0.5 mm de diámetro.

Lluvia: es la precipitación de partículas líquidas de agua, de diámetro mayor de 0,5 mm o de gotas menores, pero muy dispersas. Si no alcanza la superficie terrestre, no sería lluvia sino virga y si el diámetro es menor sería llovizna.

Neblina: es un hidrometeoro que consiste en la suspensión de muy pequeñas gotas de agua en la atmósfera, de un tamaño entre 50 y 200 micrómetros de diámetro, que reducen la visibilidad horizontal a una distancia de un kilómetro o más.

Nieve: es un tipo de precipitación que consiste en pequeños cristales de hielo que se agrupan en copos. La nieve se forma comúnmente cuando el vapor de agua experimenta una alta deposición en la atmósfera a una temperatura menor de 0 °C, y posteriormente cae sobre la tierra.

Precipitación: es cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre.

Punto de marchitez: es el punto de humedad mínima en el cual una planta no puede seguir extrayendo agua del suelo y por lo tanto marchita.

Radiación de onda corta: es la radiación electromagnética proveniente del Sol. La radiación solar tiene una gama de longitudes de onda o "espectro" distintiva que va desde la radiación ultravioleta hasta la radiación infrarroja.

Radiación de onda larga: es en general la radiación electromagnética emitida por la superficie de la Tierra y por la atmósfera, que se ubica en la porción infrarroja del espectro.

Rocío: es un fenómeno físico-meteorológico en el que la humedad del aire se condensa en forma de gotas por la disminución brusca de la temperatura, o el contacto con superficies frías.

Virga: es un hidrometeoro que cae de una nube pero que se evapora antes de alcanzar el suelo.

