

INFORME

ESTIMACIÓN DEL ESTRÉS BIOCLIMÁTICO DE LOS ECOSISTEMAS DE LA REGIÓN ÁNCASH



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

INFORME

ESTIMACIÓN DEL ESTRÉS BIOCLIMÁTICO DE LOS ECOSISTEMAS DE LA REGIÓN ÁNCASH

ESTIMACIÓN DEL ESTRÉS BIOCLIMÁTICO DE LOS ECOSISTEMAS DE LA REGIÓN ÁNCASH

Autor:

Helder Mallqui

Colaborador:

Cristian Quispe Ccajavilca

Editado por:

© Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)

Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM)

Sede central: Av. Centenario 2656 Independencia, Huaraz, Áncash, Perú

Correo electrónico: diem@inaigem.gob.pe

Fotografía de portada: Alexzander Santiago Martel (ODMRC-INAIGEM)

Corrección de estilo: Jorge Coaguila

Diseño y diagramación: Ana Mercedes Periche Acosta

Por favor citar la publicación de la siguiente manera:

Mallqui H. (2022). Estimación del estrés bioclimático de los ecosistemas de la región Áncash (*Informe*). Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña – Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (DIEM-INAIGEM). (Web publicación online)

► Índice

1. Presentación	6
2. Introducción	7
3. Objetivo	8
3.1. Objetivos específicos	9
4. Metodología	9
4.1. Generación del escenario climático actual	9
4.2. Generación de los escenarios climáticos futuros	9
4.3. Análisis espacial	9
4.4. Estimación del estrés bioclimático	10
5. Resultados	11
5.1. Escenario climático actual y futuro	11
5.2. Análisis espacial	14
5.3. Estimación del estrés bioclimático	15
5.3.1. Perfil bioclimático	15
5.3.2. Estrés bioclimático de los ecosistemas	17
Conclusiones	21
Referencias bibliográficas	22
Anexo	23
1. Escenarios climáticos futuros	23
2. El modelo CNRM-CM6-1	25
3. GAMLSS: Modelo aditivo generalizado para posición, escala y forma	26
4. Generación de escenarios climáticos	27
5. Generación de histogramas	32
6. Modelo de estrés bioclimático	34

1. PRESENTACIÓN

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) es el ente rector en investigación científica en glaciares y ecosistemas de montaña, y busca promover la gestión sostenible de estos ecosistemas para favorecer a las poblaciones que viven en o se benefician de ellos. En el cumplimiento de estas funciones la Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM) tiene el agrado de presentar el informe "Estimación del estrés bioclimático de los ecosistemas de la Región Áncash".

Este informe presenta una primera aproximación de la evaluación del estrés bioclimático sobre los ecosistemas del departamento de Áncash, proyectados para escenarios climático de los años 2040 y 2060. Se entiende por estrés bioclimático a la pérdida de sintonía entre un ecosistema y su clima, dado que los cambios en el clima se están dando a una velocidad mayor de la que requiere el ecosistema y su biodiversidad para adaptarse a las nuevas condiciones.

A través de los resultados de la aplicación de estos modelos, esperamos brindar información que mejore las estrategias de adaptación ante el cambio climático y la gestión de los ecosistemas del departamento de Áncash, priorizando acciones sobre los ecosistemas que podrían ser más afectados. Los impactos en los ecosistemas y los servicios que proveen tendrán una estrecha relación con los medios de vida y calidad de vida de las poblaciones locales. Aún queda mucho por hacer, pero la conservación y recuperación de nuestros ecosistemas es necesaria y prioritaria para asegurar nuestro bienestar y el de las futuras generaciones.

Dra. Beatriz Fuentealba D.

Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña - DIEM

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña - INAIGEM

2. INTRODUCCIÓN

El estrés bioclimático es un indicador de la pérdida de sustentabilidad de un ecosistema por las variaciones climáticas que se escapan de su rango de tolerancia. Los ecosistemas con mayor capacidad de adaptación a nuevas condiciones climáticas podrían persistir en su territorio original, mientras que otros podrían desaparecer y ser reemplazados con el tiempo por nuevas especies invasoras. Podría incluso suceder que se modificara por completo la composición específica de los pisos de vegetación, lo que originaría nuevas comunidades con ventajas para subsistir en esas nuevas condiciones climáticas (Agrimed, 2014).

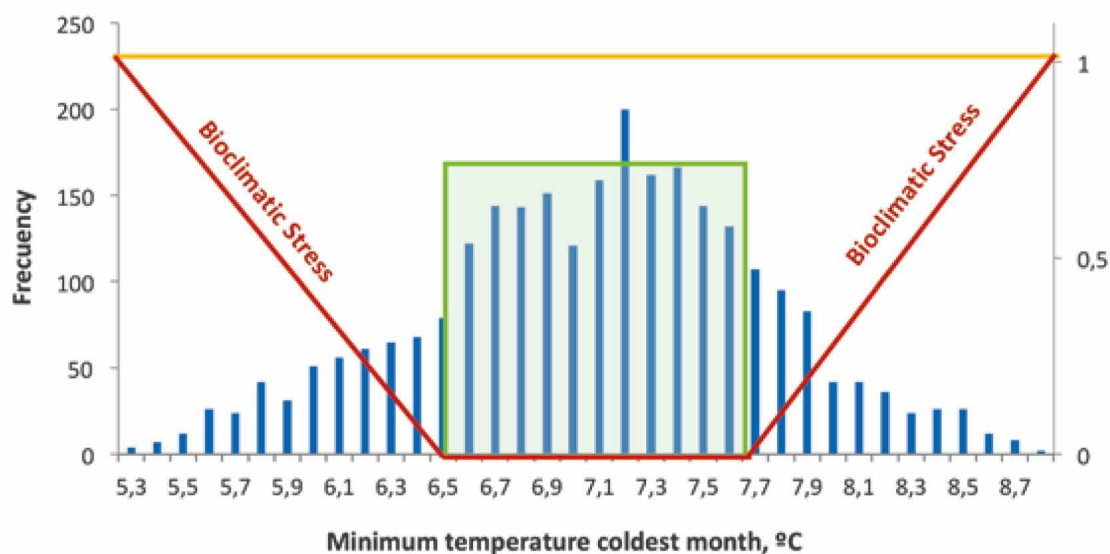
Existen tres rasgos principales del clima que determinan la distribución de las comunidades bióticas: la calidez del verano, el frío del invierno y el régimen de humedad de las estaciones. Cada comunidad vegetal se adapta a una combinación específica de estas variables. Si cualquiera de ellas sufre un cambio fuera de lo tolerado por las especies que la componen, creará problemas de reproducción, sobrevivencia o capacidad de crecimiento, que irá haciendo desaparecer a las especies que no puedan adaptarse a esta nueva situación y la emergencia de nuevas combinaciones de especies, las que pueden tardar centenas de años en alcanzar un nuevo equilibrio (Santibáñez, 2018).

Se pueden prever múltiples posibles escenarios ante esta situación. Es muy difícil anticipar cómo podría ser la dinámica de adaptación y sucesión en respuesta a una modificación del clima. Lo único que se puede afirmar es el deterioro de la funcionalidad de las comunidades respecto a cómo las conocemos hoy.

Por razones adaptativas, los rangos de tolerancia se han sintonizado mediante la evolución con los rangos de variación de cada variable climática dentro del territorio ocupado por un ecosistema. El estrés bioclimático comienza a aparecer cuando una variable escapa de estos rangos de tolerancia, creando una condición para la cual la especie no tiene respuestas (Vennetier, 2010). Así, se genera una situación adversa que degrada las funciones ecofisiológicas de las especies que reduce su capacidad competitiva, reproductiva o, incluso, de sobrevivencia.

Sobre esta base, es importante evaluar los rangos bioclimáticos extremos de tolerancia de cada ecosistema, derivados de su distribución geográfica actual. En la medida que estos rangos sean más estrechos, se supone que las especies que componen el ecosistema poseen menos tolerancia frente a la variación de una variable. Contrariamente, cuando el rango se amplía, existe mayor capacidad de las especies para aceptar valores extremos de una variable (Turner y Kramer, 1980). Así, surge el concepto de «capacidad de sustentación» de especies o ecosistemas, el cual corresponde al grado de coincidencias entre el bioclima de un territorio y los rangos de tolerancia de una comunidad vegetal.

► Figura 1. Tendencia del estrés bioclimático.



El estrés bioclimático sigue una tendencia inversa con respecto al histograma de tolerancia de una variable específica. En la parte central de la distribución, las condiciones no son estresantes para el ecosistema. A medida que nos alejamos de la parte central, el estrés bioclimático aumenta hasta alcanzar un nivel máximo en los extremos.

Tomado de Agrimed, 2014

Las especies vegetales desarrollan respuestas eco-morfo-anato-fisiológicas para enfrentar condiciones medioambientales desfavorables. Por otro lado, es importante saber que un factor o ambiente limitante para una planta puede que no lo sea para otra. Además, no todos los factores medioambientales limitantes ejercen su efecto sobre la vegetación en un mismo periodo de tiempo. Algunos, como la temperatura, lo ejercen solo en unos pocos minutos. Otros pueden tardar días o semanas, incluso meses (Peña, 2018).

3. OBJETIVO

Proyectar el nivel de estrés bioclimático que podrían generar los escenarios climáticos futuros basado en supuestos socioeconómicos, denominados «Rutas Socioeconómicas Compartidas» (SSP) para los años 2040 y 2060, en los ecosistemas del departamento de Áncash.

3.1. Objetivos específicos

- Generar bases de datos climáticos originados a través de **downscaling** estadístico.
- Elaborar el perfil bioclimático de ecosistemas.
- Evaluar el perfil bioclimático mediante el **software** Bioclima, que evalúa los niveles de estrés que las modificaciones del escenario climático podrían producir en el área de distribución de los ecosistemas.
- Elaborar modelos espaciales de niveles de estrés bioclimático de ecosistemas en el territorio, tanto en el escenario climático actual como en el futuro.

4. METODOLOGÍA

La metodología se ha desarrollado en cuatro grupos de actividades, los cuales se explican a continuación y cuyos detalles técnicos se pueden consultar en el anexo del presente documento.

4.1. Generación del escenario climático actual

Para el escenario base (actual), se han tomado los datos del PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) versión 2.0 para la precipitación y versión 1.0 para la temperatura.

Para reducir la resolución espacial de estas capas a 30 segundos, se realizó un **downscaling** estadístico mediante el empleo de regresiones lineales múltiples (RLM), para el caso de las variables de temperatura, y la aplicación del modelo aditivo generalizado para posición, escala y forma (GAMLSS), para precipitación. Las cinco variables independientes consideradas para el modelamiento han sido altitud, latitud, longitud, distancia a la línea de costa y distancia a la cuenca amazónica.

4.2. Generación de los escenarios climáticos futuros

Para la construcción de la base de datos espacial del clima futuro (2040 y 2060) para Áncash, se trabajó con los datos disponibles de las proyecciones climáticas del proyecto Coupled Model Intercomparison Projects-CMIP6. Las proyecciones utilizadas en el presente estudio han sido el ssp585 (peor escenario posible, poco probable) y el ssp245 (escenario intermedio, probable). Esta información ha presentado una resolución espacial de 2,5 minutos llevada mediante **downscaling** a 30 segundos bajo la misma metodología descrita para el escenario climático actual. Los datos descargados de WorldClim (www.worldclim.org/) han sido del modelo CNRM-CM6-1 con sensibilidad climática de equilibrio (ECS) 4.9. Las variables que han sido trabajadas para el modelamiento han sido la temperatura mínima del mes más frío, la temperatura máxima del mes más cálido, la evapotranspiración potencial y la precipitación anual.

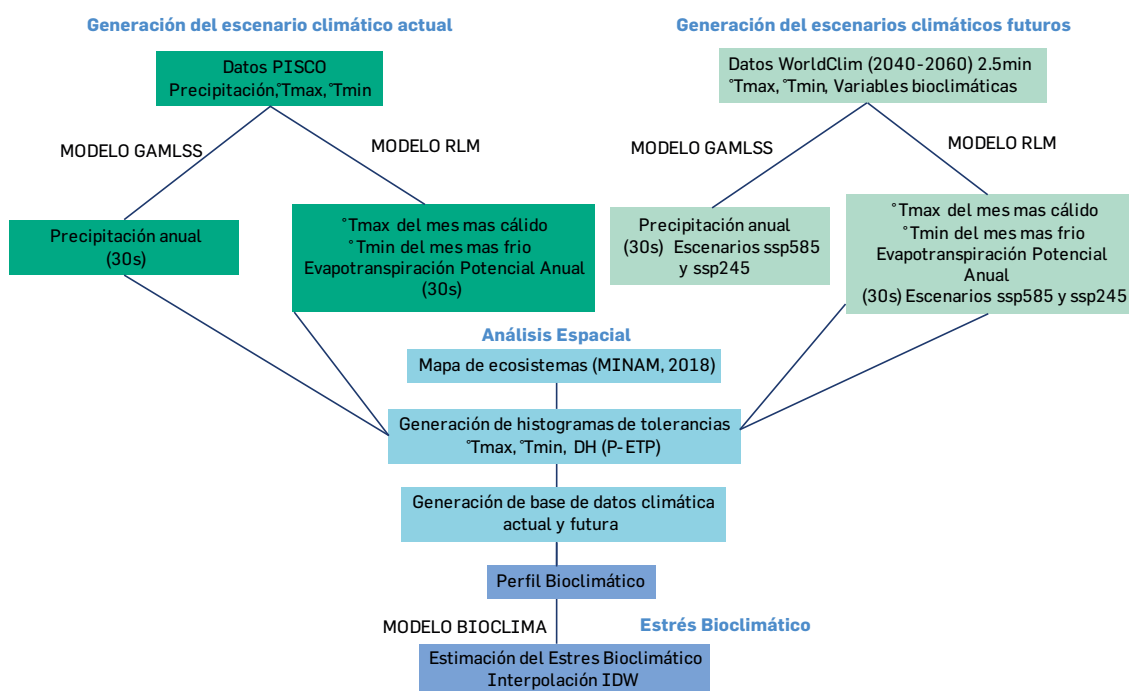
4.3. Análisis espacial

La actividad desarrollada en el análisis espacial comprende la extracción de información espacio temporal de las variables climáticas que tienen relación con las zonas de distribución de los ecosistemas de montaña del departamento de Áncash, mediante la superposición de estas capas con la información vectorial del mapa de ecosistemas (Minam, 2018). Con los datos resultantes, se ha construido una base de datos geográfica de 42.262 puntos y los histogramas de tolerancia para cada ecosistema y variable climática, de donde se estima el mínimo, máximo y rango óptimo de tolerancia. Este proceso se ha desarrollado con el **software** QGIS.

4.4. Estimación del estrés bioclimático

Para evaluar el estrés bioclimático de los ecosistemas frente a los escenarios climáticos, se ha utilizado un modelo que integra dos dimensiones del estrés: el estrés térmico y el estrés hídrico. Este último particularmente originado en la acentuación de la aridez y del déficit hídrico. Para ello, se ha hecho un primer análisis del perfil bioclimático de los ecosistemas para conocer las tolerancias de estos frente a las variables climáticas. Posteriormente, mediante el uso del **software** Bioclíma (Agrimed, 2014), se ha estimado el estrés bioclimático. Este modelo se basa en uno multiplicativo donde el desempeño o capacidad de sustentación de los ecosistemas se va reduciendo gradualmente en la medida que los estreses sean más intensos y numerosos. El resultado de este proceso es una base de datos espacio temporal para los años 2040 y 2060 y para los escenarios ssp585 y ssp245 con los niveles de estrés bioclimático (valores de 0-1) que se han integrado para su representación cartográfica mediante una interpolación por el método de distancia inversa ponderada (IDW).

► **Figura 2. Procedimiento metodológico para la estimación del estrés bioclimático.**

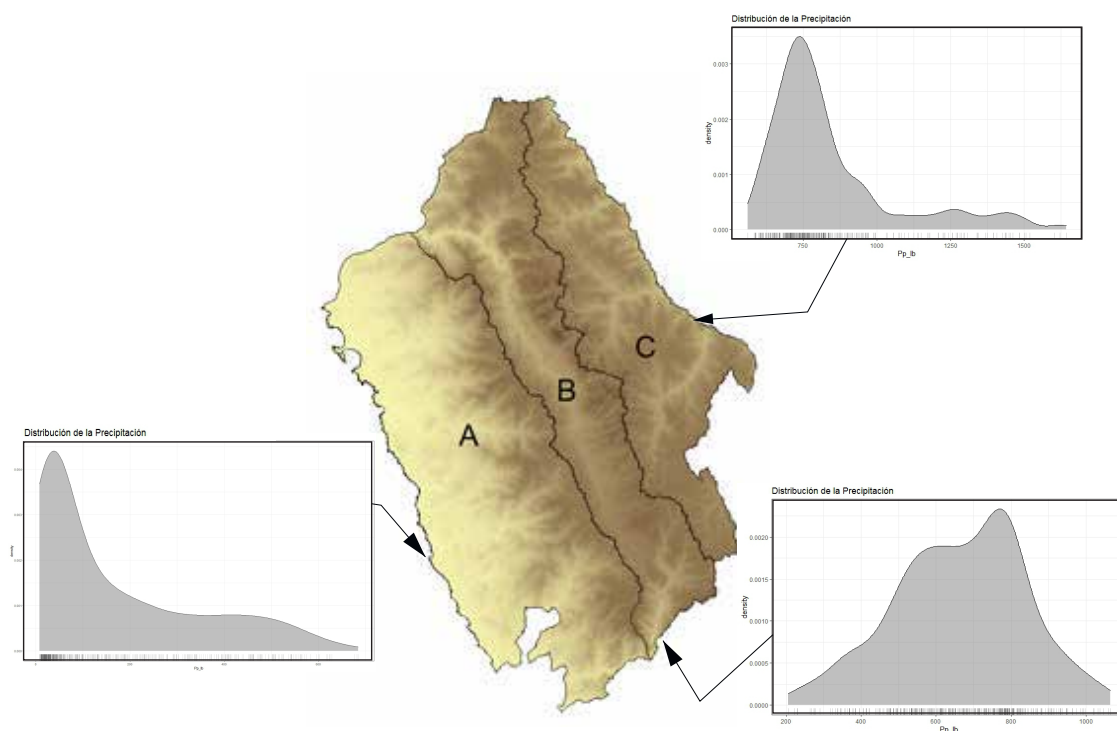


5. RESULTADOS

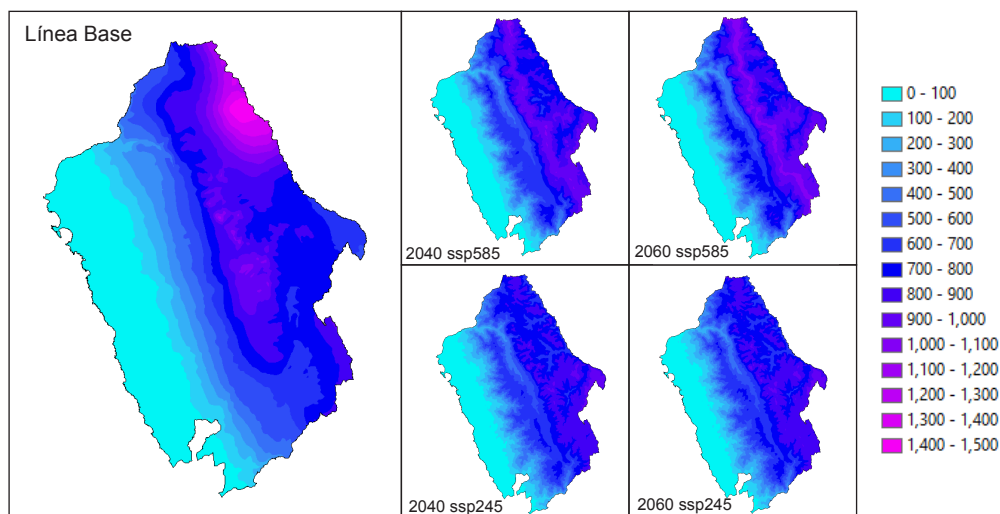
5.1. Escenario climático actual y futuro

El departamento de Áncash se encuentra fuertemente influenciado por la presencia de la cordillera Blanca, factor que determina un clima variado, de características locales definidas debido al relieve tan irregular y por la posición misma de la cadena de montañas que incluye también a la cordillera Negra, lo cual hace que se generen condiciones climáticas distintas que varían tanto en latitud como altitud. Por ello, existe una compleja distribución espacial de la precipitación, para lo cual se modeló esta variable tanto para el escenario actual como para el futuro, mediante GAMLSS, separándola por sectores, basados en aspectos orográficos según se muestra en la figura 3: A) de la línea costera al flanco occidental de la cordillera Negra (vertiente costera), B) del flanco oriental de la cordillera Negra al flanco occidental de la cordillera Blanca (callejón de Huaylas) y C) del flanco oriental de la cordillera Blanca al límite departamental (vertiente amazónica).

► **Figura 3. Sectores considerados para el modelamiento de precipitación.**



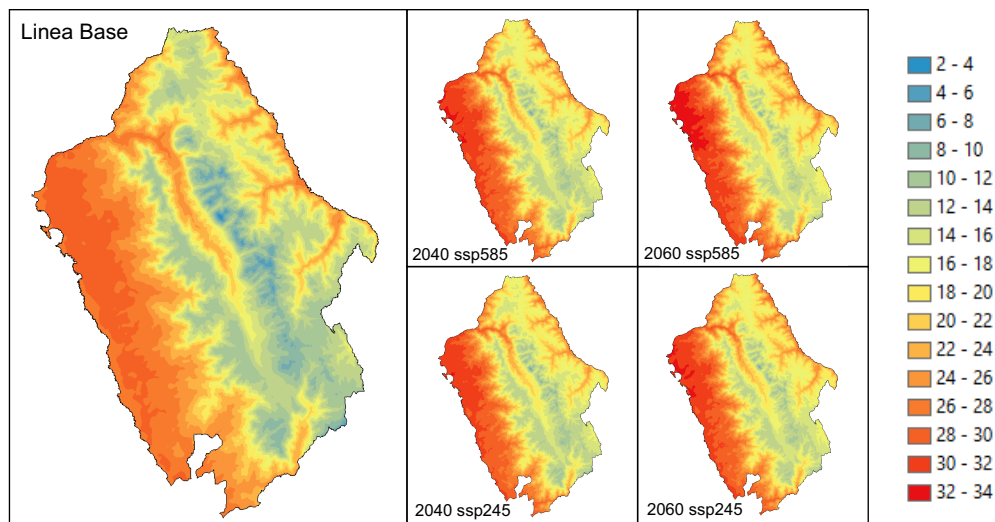
Los resultados muestran que la precipitación promedio anual en el escenario actual varía en la vertiente costera de 10 a 737 milímetros, en el callejón de Huaylas de 188 a 1.164 milímetros y en la vertiente amazónica de 586 a 1.490 milímetros. Para el caso de 2040 y 2060, tanto para los escenarios ssp585 y ssp245, no se observa una tendencia marcada de esta variable. Existen áreas en que la precipitación anual puede aumentar en promedio 90 milímetros, como otras en que disminuye en promedio de 118 a 160 milímetros respecto al escenario actual.

► **Figura 4. Distribución espacial de precipitación.**

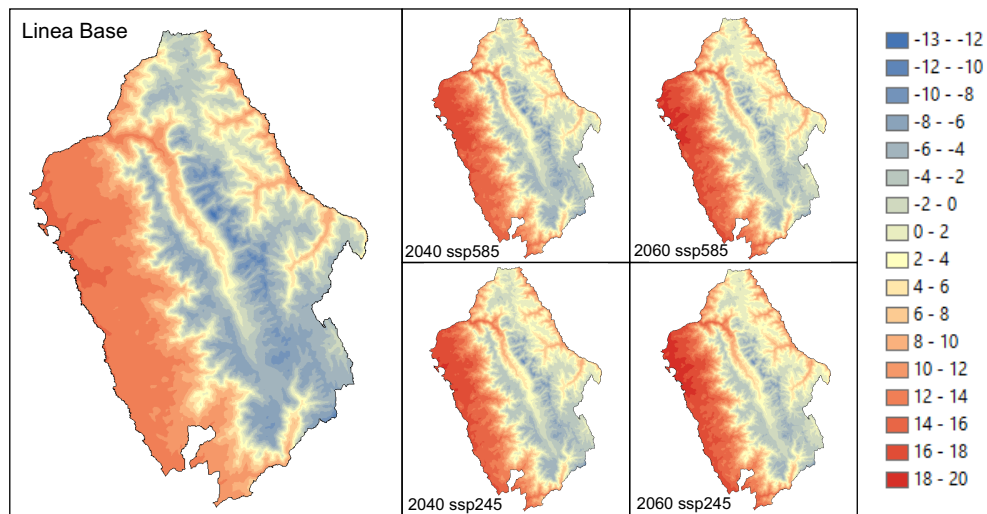
Con respecto a la temperatura máxima del mes más cálido para 2040 y 2060 (ssp585 y ssp245), se observa un incremento en los promedios de temperatura de 1,6 a 2,2 °C. Por otro lado, la temperatura mínima del mes más frío registra un incremento en los promedios de 1,6 a 1,8 °C. Estos incrementos se evidencian respecto al escenario actual.

► **Figura 5. Distribución espacial de temperatura.**

Temperatura máxima del mes más cálido

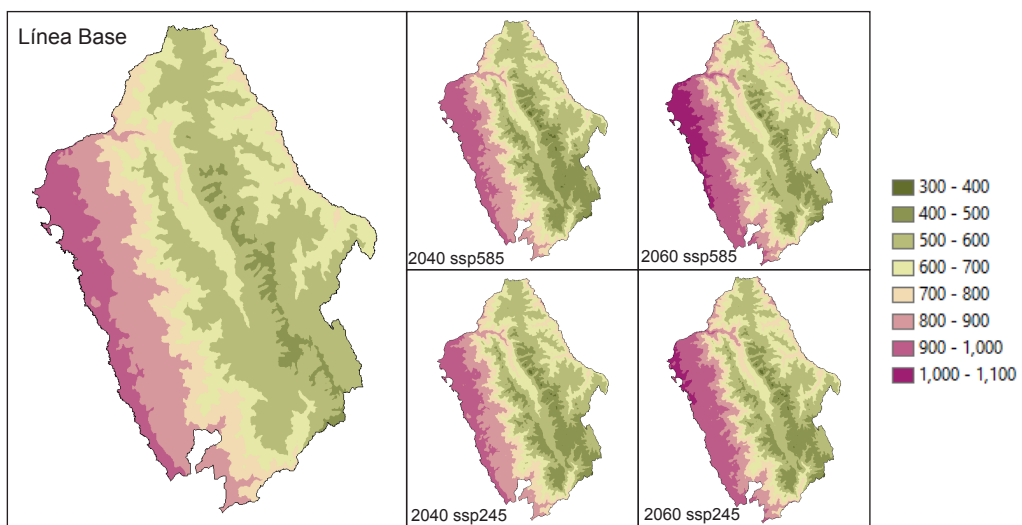


Temperatura mínima del mes más frío



La evapotranspiración potencial promedio anual en el escenario actual tiene un valor promedio de 654 milímetros. Para el escenario ssp585 año 2040 de 637 milímetros y para el año 2060 de 682 milímetros. Para ssp245 de 664 milímetros para el año 2040 y de 685 milímetros para el 2060.

► **Figura 6. Distribución espacial de evapotranspiración potencial.**



5.2. Análisis espacial

La información base para esta etapa de la metodología ha sido el mapa de ecosistemas publicado por el Ministerio del Ambiente (Minam) en 2018. Se ha considerado para el análisis 12 clases informacionales para el departamento de Áncash, de las cuales siete corresponden a ecosistemas de la región andina, cuatro de la región costa y una zona intervenida. Respecto a esta última, corresponde a la zona agrícola que ha sido dividida en agricultura costera (Agri-c) y agricultura de la sierra (Agri-s). En la tabla 1, se muestran algunas características de las zonas de distribución de los ecosistemas estudiados.

► Tabla 1. Características espaciales de las zonas de distribución de los ecosistemas estudiados.

Ecosistema	Altitud (metros sobre el nivel del mar)		Superficie (hectáreas)
	Mínimo	Máximo	
Agri-c	2	2.000	94.193,7
Agri-s	2.002	4.273	336.854,6
Bes-cm	1.711	2.730	2.985,0
Bes-in	1.609	2.553	9.967,7
Bo	3.229	4.918	20.400,6
Br-a	3.249	4.747	20.830,1
Dc	0	1.357	517.684,3
Hc	4	33	1.816,7
Jal	3.450	4.678	39.312,2
Lo	156	916	8.147,9
Ma	436	4.376	1.236.202,5
Pjph	2.946	4.966	1.033.887,5
Zp-gla	3.701	6.557	245.851,8

Agri-c = Agricultura-costa, Agri-s = Agricultura-sierra, Bes-cm = Bosque estacionalmente seco de colina y montaña, Bes-in = Bosque estacionalmente seco interandino, Bo = Bofedal, Br-a = Bosque relicto altoandino, Dc = Desierto costero, Hc = Humedal costero, Jal = Jalca, Lo = Loma, Ma = Matorral, Pjph = Pajonal de puna húmeda, Zp-gla = Zona periglaciaria y glaciar

► Tabla 2. Rangos de tolerancia de cada zona de distribución por ecosistema de la línea base.

Ecosistema	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)				Temperatura mínima del mes más frío (°C)				Deficit Hídrico (mm)			
	Mínimo	Inferior rango óptimo	Superior rango óptimo	Máximo	Mínimo	Inferior rango óptimo	Superior rango óptimo	Máximo	Mínimo	Inferior rango óptimo	Superior rango óptimo	Máximo
Agri-c	24,8	27,2	28,8	29,5	12,4	13,4	14,1	14,5	-944	-915	-793	-350
Agri-s	11,5	17,2	21,3	26,1	-5,6	0,9	5,5	10,6	-380	-86	0	0
Bes-cm	21,8	22,6	23,9	24,6	6,9	8	9,8	10,7	-592	-560	-474	-443
Bes-in	24,6	25,6	26,3	26,9	9,5	10,7	11,5	12,5	-71	-26	0	0
Bo	8,9	11,5	13,3	15,1	-7,6	-5,7	-4,4	-2,5	-10	-5	0	0
Br-a	9,3	11,6	13,8	17	-6,9	-4,7	-2,5	0,8	-45	-5	0	0
Dc	25,6	27,4	28,6	29,8	11,2	12,7	13,7	14,5	-942	-894	-839	-758
Hc	27,9	28,1	28,4	28,6	14,4	14,4	14,5	14,5	-940	-934	-932	-929
Jal	11,7	13,6	14,9	16,8	-5,1	-2,7	-1,1	1,3	-10	-5	0	0
Lo	26	26,8	27,6	28,7	11,8	12,2	12,9	13,6	-901	-881	-861	-837
Ma	12,3	19,8	25	28,5	-5,3	4	10,9	13,8	-868	-631	-300	0
Pjph	8,6	11,6	14,2	18	-8,3	-5,5	-2,4	2,2	-437	-303	-30	0
Zp-gla	4,8	8,3	10,7	14,2	-11,3	-8	-5,8	-2,5	-868	-631	-300	0

Con los resultados de integrar la información espacial de ecosistemas y variables climáticas, se han construido 39 histogramas de tolerancia. En la tabla 2, se muestran los rangos de tolerancia de cada zona de distribución del ecosistema analizado para el escenario actual o base.

5.3. Estimación del estrés bioclimático

5.3.1. Perfil bioclimático

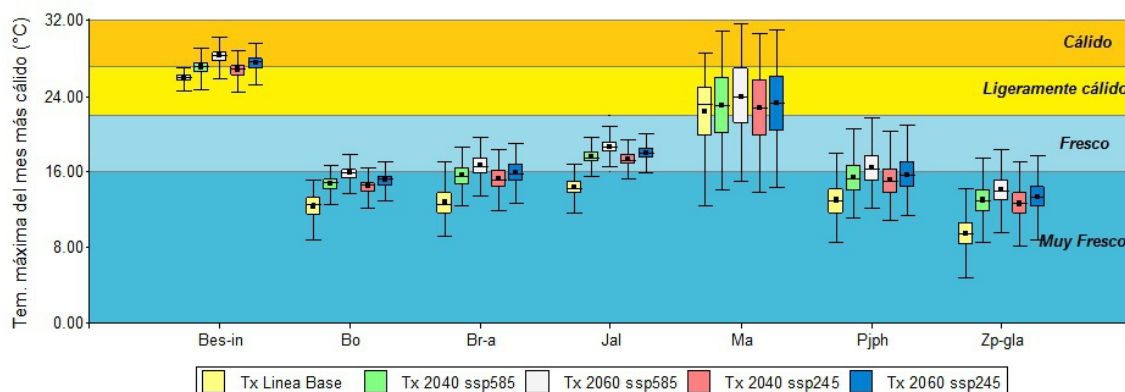
Para evaluar el efecto que los cambios climáticos podrían generar sobre los distintos ecosistemas de la región andina de Áncash, ha sido necesario conocer las tolerancias de estos frente a las variables climáticas. Para ello, es fundamental evaluar la amplitud de variación de cada variable climática en el territorio ocupado por cada ecosistema, pues ello permite establecer, de una forma empírica, el intervalo máximo de tolerancia frente a cada variable.

a. La calidez del verano

La temperatura máxima del mes más cálido es un buen indicador de cuán cálida es la estación cálida. Muchas especies tienen problemas de crecimiento cuando las temperaturas exceden un límite superior de temperatura. Por el contrario, otras especies encuentran mejores condiciones de poblamiento cuando el verano se hace más cálido.

En el gráfico de la figura 7, se observa cuánto se espera que varíe la calidez en cada uno de los ecosistemas, en relación con la línea base o situación actual. Como se nota, en todos los ecosistemas habría un incremento de la temperatura para el año 2040, el cual se incrementaría aún más para el año 2060, tanto para ssp585 como para ssp245.

► **Figura 7. Intervalos de tolerancia de los ecosistemas frente a la temperatura máxima**



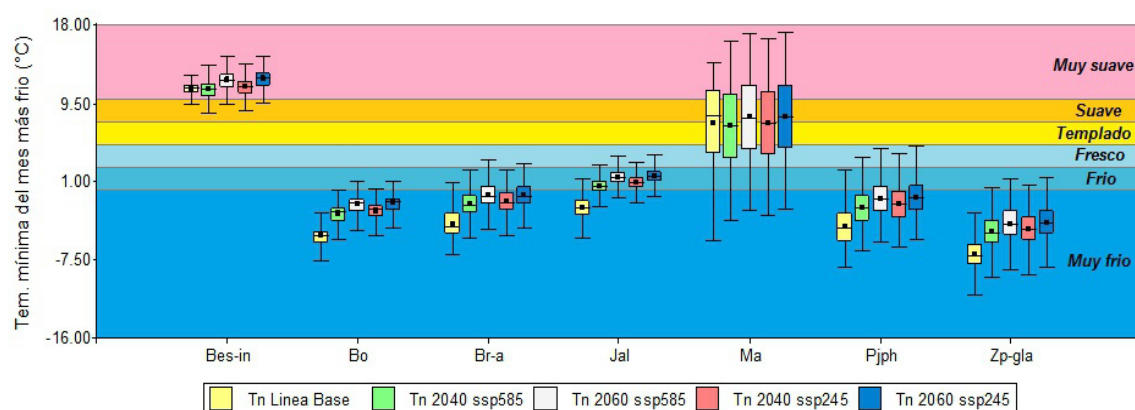
El ecosistema que presenta un rango mayor, como el matorral (Ma), presenta mayor grado de tolerancia frente a las variaciones de la temperatura máxima. Los ecosistemas de mayor rango de tolerancia están adaptados a mayores variaciones de temperatura, lo que además les facilita tener una distribución geográfica más extensa. El caso es distinto para los otros ecosistemas mostrados en el gráfico, que tienen una amplitud de rango entre los valores máximos y mínimos más restringido y, por ende, con mayor vulnerabilidad ante cambios de la temperatura máxima.

b. El rigor del invierno

Las temperaturas más bajas pueden actuar en general como un limitante severo para la sobrevivencia de ciertas especies. Contrariamente a esto, otras pocas requieren del frío invernal para generar flores fértiles y garantizar su reproducción. Así, si el frío invernal varía, puede favorecer o desfavorecer a diversas especies, según sea el origen de estas.

La temperatura mínima del mes más frío, al igual que la temperatura máxima, en términos generales, se elevaría en los escenarios futuros, haciendo que el rigor del invierno sea menos intenso en todos los ecosistemas de la zona de estudio. Así, algunos ecosistemas pasarían de tener un invierno muy frío a un invierno entre frío y fresco.

► Figura 8. Intervalos de tolerancia de los ecosistemas frente a la temperatura mínima

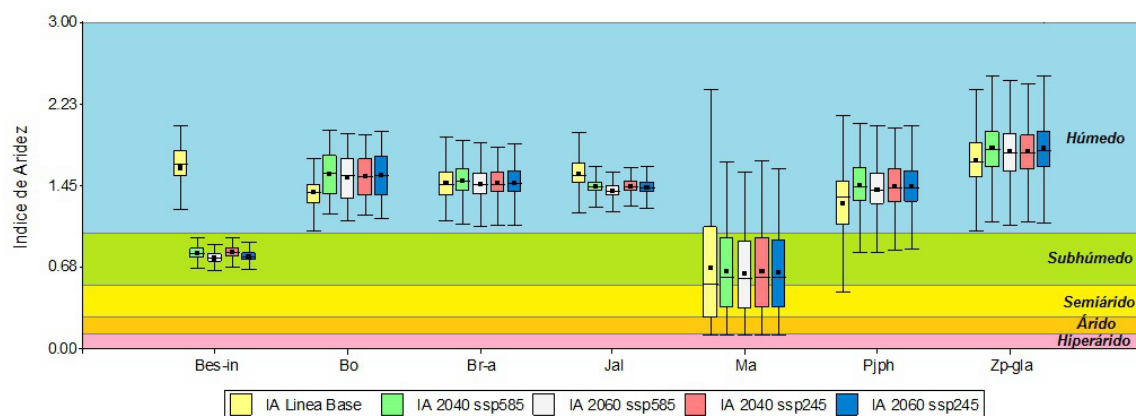


c. Régimen de humedad

El grado de aridez del clima es uno de los factores más determinantes de la distribución de las especies. Las especies presentan diversas estrategias de adaptación a la aridez. Cada una es capaz de tolerar un cierto nivel de déficit hídrico. Por sobre ciertos niveles de aridez estas especies tienden a ser reemplazadas por otras más xerofíticas (que toleran aridez). Uno de los indicadores más extensamente utilizados es el índice de aridez, que corresponde al cociente precipitación/evapotranspiración anual.

En el caso del bosque estacionalmente seco interandino (Bes-In), se evidencia un incremento de la aridez muy marcado tendiendo en los escenarios futuros hacia un régimen subhúmedo. Los demás ecosistemas se mantendrían dentro de sus zonas iniciales sin mucha diferencia en el régimen de humedad entre los escenarios ssp585 y ssp245, pero con incrementos respecto al escenario actual o línea base. Un caso particular es el de la jalca (Jal), que, si bien se mantendrá en un régimen húmedo, se observa que en los escenarios futuros podría haber un descenso de la humedad en su área de distribución. Igual que en los casos anteriores, solo los ecosistemas de mayor amplitud de rango serán menos susceptibles a estos cambios.

► Figura 9. Intervalos de tolerancia de los ecosistemas frente a la aridez



5.3.2. Estrés bioclimático de los ecosistemas

De los resultados producto del modelamiento mediante el **software** Bioclima, se estima que para 2040 y 2060 la mayoría de los ecosistemas de la región Áncash se encontrarían entre dos de las categorías de estrés presentadas en la tabla 3 correspondiente a alto y muy alto. Detalles en las figuras 10 y 11.

► Tabla 3. Escala de estrés bioclimático de los ecosistemas.

Nivel de estrés bioclimático	Rango
Muy leve	$E_{INT} \leq 0,05$
Leve	$0,05 < E_{INT} \leq 0,1$
Bajo	$0,1 < E_{INT} \leq 0,2$
Moderado	$0,2 < E_{INT} \leq 0,4$
Alto	$0,4 < E_{INT} \leq 0,6$
Muy alto	$0,6 < E_{INT} \leq 0,8$
Extremadamente alto	$E_{INT} > 0,8$

Fuente: Agrimed, 2014.

En términos generales, existen algunas diferencias importantes, aunque no muy marcadas en el estrés bioclimático estimado entre los escenarios ssp585 (peor escenario posible, poco probable) y ssp245 (escenario intermedio, probable). Esto resulta interesante, pues es congruente con las diferencias previstas por los modelos para la línea temporal de un futuro cercano. Estas serían muy poco evidentes en 2040 y más evidentes en 2060.

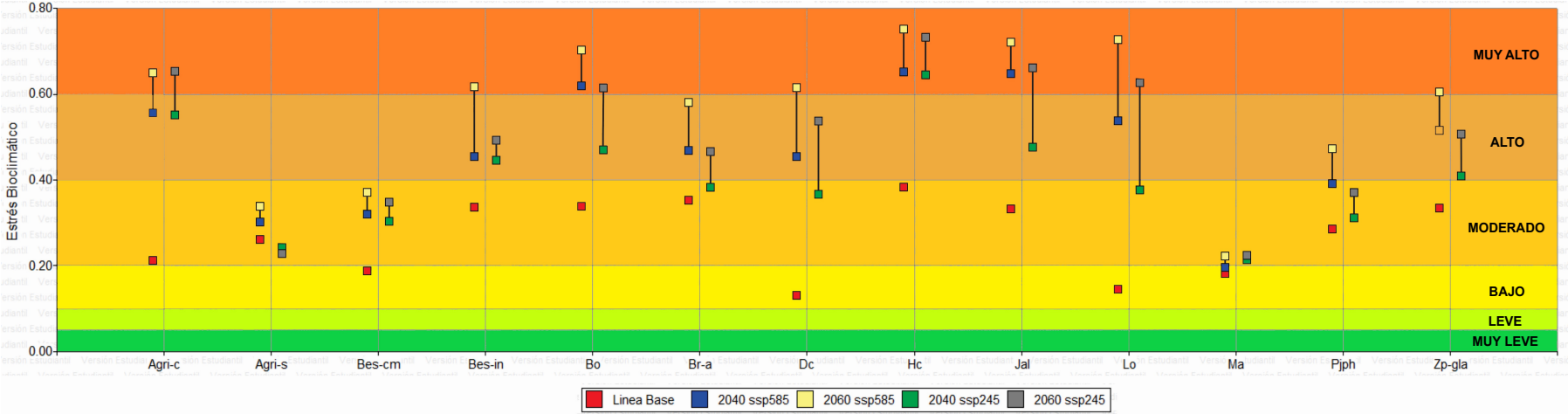
El estrés bioclimático para el escenario ssp245 aumentaría desde la línea base al año 2060 de manera mucho más marcada, especialmente en ecosistemas como bosque estacionalmente seco interandino (Bes-In), bofedal (Bo), bosque relicto altoandino (Br-a) y jalca (Ja). Cabe destacar que principalmente el matorral (Ma) y después el pajonal (Pjph) parecen ser ecosistemas más resilientes, con capacidad de tolerar mejor los nuevos escenarios climáticos. En el caso del ecosistema periglacial y glaciar (Zp-gla), se evidencia un incremento importante del nivel de estrés, debido a que las temperaturas, como factor condicionante, muestran variaciones importantes entre un escenario y otro. Se advierte también de los resultados del modelamiento, un estrés en la agricultura con una mayor sensibilidad en la agricultura de la región costa.

Los ecosistemas costeros que sufrirán mayor estrés son el humedal costero (Hu) y las lomas costeras (Lo), donde el hecho de encontrarse en unas zonas árida e hiperárida y sumados a los incrementos de temperatura contribuirían a este efecto.

El estrés bioclimático para el escenario ssp585, como es lógico, muestra niveles de estrés mucho más altos, aunque en la agricultura costera (Agri-c), bosque estacionalmente seco de colina y montaña (Bes-cm) y matorral (Ma) no se evidencian diferencias significativas con respecto a ss245 (figura 10).

En la tabla 4, se muestran niveles de estrés bioclimático a nivel de provincias del departamento de Áncash para el escenario probable ssp245. Esta tabla permite ver qué ecosistemas están presentes en cada provincia. Se puntualiza que esta distribución obedece a la información tomada del mapa de ecosistemas del Minam 2018. Aquí resalta, por ejemplo, que los ecosistemas matorral (Ma) y el pajonal de puna húmeda (Pjph) se encuentran presentes en todas las provincias y el bosque estacional seco de colina y montaña (Bes-cm) está presente solo en la provincia de Santa. También la tabla permite ver el cambio en el nivel de estrés entre los años 2040 y 2060, como ocurre en el ecosistema bofedal (Bo), que es de incremento en todas las provincias entre un año y otro. De igual manera, podemos establecer, para un ecosistema determinado, en que provincias este ecosistema se encuentra con mayor o menor estrés. Así tenemos que el nivel de estrés para la zona periglacial y glaciar (Zp-gla) es más alto en las provincias del norte del departamento de Áncash. Además, al verificar el dato numérico, podemos hacernos la idea en cuánto más se da esta situación respecto a las otras provincias.

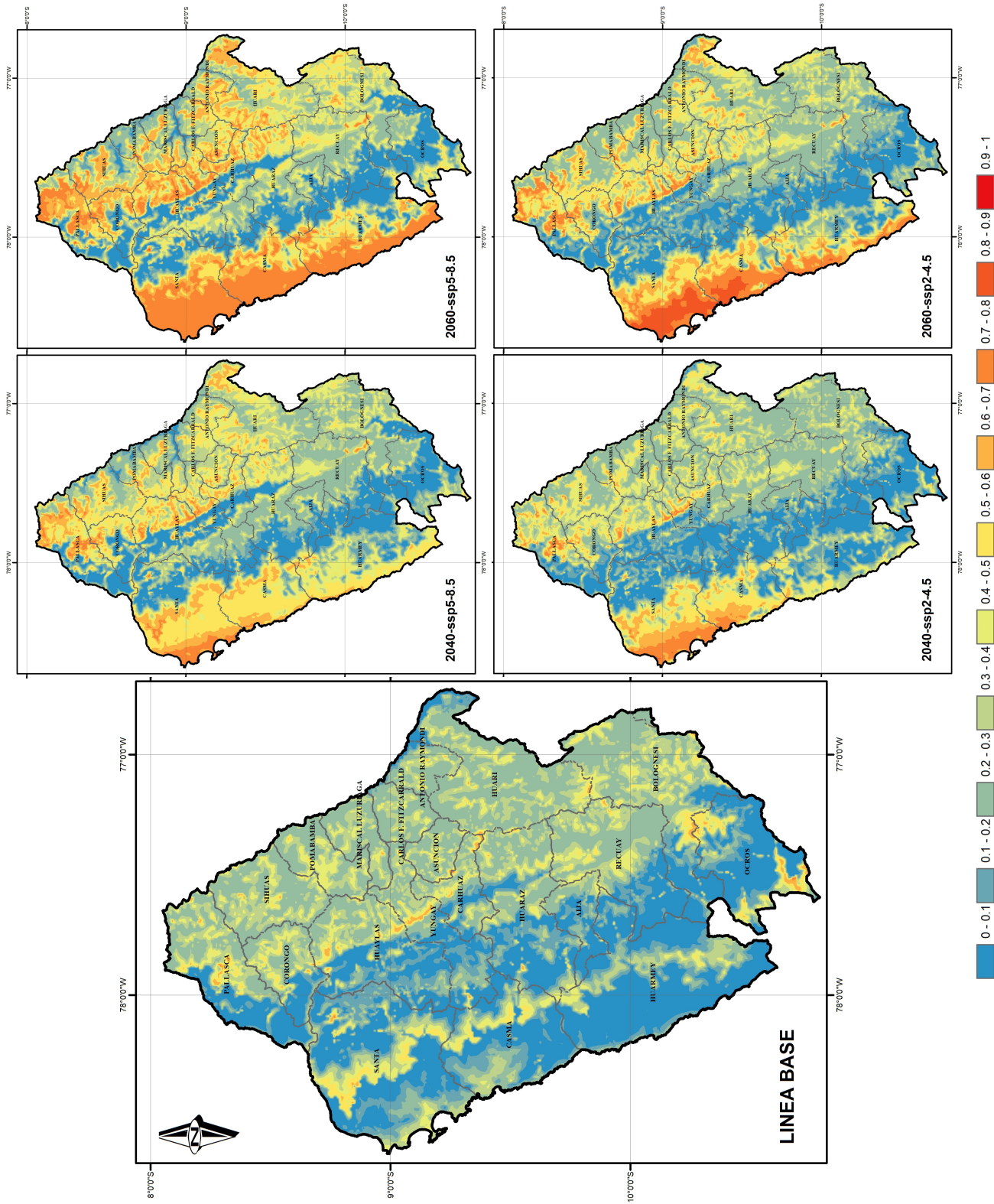
►Figura 10. Niveles de estrés bioclimático del departamento de Áncash en los años 2040 y 2060.



►Tabla 4. Estrés bioclimático de los ecosistemas a nivel provincial.

PROVINCIA	Agri-c		Agri-s		Bes-cm		Bes-in		Bo		Br-a		Dc		Hc		Jal		Lo		Ma		Pjph		Zp-gla	
	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060
	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060	2040	2060
AIJA	0,56	0,54	0,14	0,11					0,42	0,63											0,13	0,15	0,20	0,23		
ANT. RAYMONDI			0,32	0,32			0,26	0,32													0,29	0,27	0,42	0,55		
ASUNCION			0,28	0,27							0,37	0,49									0,42	0,38	0,32	0,39	0,38	0,48
BOLOGNESI	0,50	0,40	0,27	0,23					0,44	0,61	0,29	0,33					0,41	0,33			0,22	0,21	0,29	0,30	0,31	0,41
CARHUAZ			0,24	0,18					0,62	0,78	0,41	0,48									0,32	0,30	0,33	0,38	0,41	0,49
CAR. FITZCARRALD			0,29	0,28			0,26	0,44			0,51	0,66									0,30	0,28	0,41	0,53		
CASMA	0,47	0,62											0,45	0,63	0,53	0,73			0,47	0,65	0,33	0,39	0,25	0,30		
CORONGO	0,67	0,62	0,26	0,24					0,66	0,79	0,44	0,56									0,20	0,20	0,45	0,54	0,62	0,74
HUARAZ	0,48	0,42	0,26	0,21					0,58	0,73	0,31	0,38									0,15	0,17	0,22	0,27	0,35	0,45
HUARI			0,27	0,26					0,30	0,45	0,40	0,51					0,39	0,26			0,32	0,29	0,35	0,43	0,39	0,50
HUARMEY	0,34	0,58	0,15	0,12									0,22	0,43					0,31	0,60	0,17	0,20	0,11	0,15		
HUAYLAS	0,61	0,51	0,18	0,19							0,49	0,58									0,14	0,13	0,21	0,28	0,45	0,57
MAR. LUZURIA-GA			0,30	0,30			0,38	0,52			0,72	0,80									0,29	0,27	0,49	0,60	0,49	0,69
OCROS	0,24	0,36	0,15	0,12									0,30	0,26							0,10	0,11	0,22	0,22	0,27	0,31
PALLASCA	0,65	0,58	0,17	0,20			0,53	0,55	0,70	0,79	0,73	0,80					0,47	0,66			0,18	0,18	0,44	0,55	0,72	0,79
POMABAMBA			0,27	0,28			0,36	0,40	0,79	0,80											0,30	0,28	0,51	0,62	0,33	0,41
RECUAY	0,68	0,64	0,23	0,21					0,48	0,61	0,38	0,31									0,15	0,15	0,28	0,29	0,29	0,35
SANTA	0,62	0,71	0,35	0,35	0,30	0,35							0,57	0,70	0,65	0,73					0,27	0,31	0,14	0,19		
SIHUAS			0,28	0,29			0,47	0,50									0,51	0,68			0,29	0,28	0,50	0,61		
YUNGAY	0,60	0,56	0,20	0,17							0,45	0,57									0,13	0,13	0,18	0,25	0,45	0,54

► Figura 11. Distribución espacial de los niveles de estrés bioclimático del departamento de Áncash, años 2040 y 2060.



CONCLUSIONES

Para el año 2040 y 2060, la mayoría de ecosistemas de la región Áncash se encontrarían entre los niveles de estrés bioclimático alto y muy alto.

Los rangos bioclimáticos extremos de tolerancia de cada ecosistema fueron evaluados a partir de su distribución geográfica actual. En la medida que estos rangos sean más estrechos, las especies que componen el ecosistema tendrán menos tolerancia frente a la variación de una variable climática. Contrariamente, cuando el rango sea más amplio, existe mayor capacidad de las especies para aceptar valores extremos de una variable climática.

Los ecosistemas que, de acuerdo al modelo, responderán negativamente (con mayor estrés) bajo los escenarios climáticos futuros ssp585 y ssp245 serán el bosque estacionalmente seco interandino (Bes-In), bofedal (Bo), bosque relicto altoandino (Br-a), jalca (Ja) y periglacial y glaciar (Zp-gla) en la región andina. En la región costa, el humedal costero (Hu) y las lomas costeras (Lo).

El estrés bioclimático se iría intensificando. Ello desencadenaría importantes problemas de conservación de la biodiversidad, lo que potencialmente puede afectar al patrimonio natural, al paisaje, a la hidrología e, incluso, a los procesos que afectan a la agricultura regional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Centro de Agricultura y Medio Ambiente (Agrimed)** (2014). «Atlas del cambio climático en las zonas de régimen árido y semiárido». Capítulo IV de *Cambio climático y ecosistemas*. Informe técnico.
- Barreiro, M.; Arizmendi, F. y Trinchín, R.** (2019). *Variabilidad y cambio climático en Uruguay*. Montevideo: Departamento de Ciencias de la Atmósfera, Instituto de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de la República.
- Galindo, Luis Miguel; Alatorre Bremont, José Eduardo y Reyes Martínez, Orlando** (2015). «Adaptación al cambio climático a través de la elección de cultivos en Perú». *El Trimestre Económico*, 82(327), pp. 489-519. Recuperado el 7 de julio de 2021, de www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-718X2015000300489&lng=es&tlng=es.
- Hannah, L.; Midgley, G.; Andelman, S.; Araújo, M.; Hughes, G.; Martínez-Meyer, E.; Pearson, R. y Williams, P.** (2007). «Protected Area Needs in a Changing Climate». *Front Ecol Environ*, 5(3), pp. 131-138.
- Luebert, F. y Plischoff, P.** (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- Núñez, I.** (2016). «Análisis de la variabilidad bioclimática para el año 2050 en la región de Tarapacá mediante escenarios de cambio climático propuestos por el quinto informe del IPCC y modelos de circulación global de muy, muy alta resolución». Tesis, Santiago de Chile: Facultad de Geografía de la Universidad de Chile.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)** (2007). Parry, M. L.; Canziani, O. F.; Palutikof, J. P.; Van der Linden, P. J. y Hanson, C. E. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge (Reino Unido): Cambridge University Press.
- Peña, K.** (2018). «Bases eco-fisiológicas de las respuestas de las plantas al estrés abiótico». Diapositivas 12 y 13 PowerPoint. Taller de evaluación de estrés bioclimático de la Universidad de Chile. www.agrimed.cl/contenido.asp?Id=10&Titulo=Taller%20de%20evaluaci%F3n%20de%20Estr%E9s%20Bioclimatico
- Ramos, L.** (2014). «Estimación del efecto del cambio climático en la precipitación de la costa norte del Perú usando simulaciones de modelos climáticos globales». Tesis, Lima: Facultad de Ciencias de la Universidad Agraria La Molina.
- Santibáñez, F.** (2018). «Evaluación del estrés provocado por el cambio climático en los ecosistemas terrestres». Diapositivas 17-19 PowerPoint. Taller de evaluación de estrés bioclimático de la Universidad de Chile. www.agrimed.cl/contenido.asp?Id=10&Titulo=Taller%20de%20evaluaci%F3n%20de%20Estr%E9s%20Bioclimatico
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi)** (2014). *Regionalización estadística de escenarios climáticos en Perú*. Lima.
- Schlosser, L.; Hothorn, T.; Stauffer, R. y Zeileis, A.** (2018). «Distributional Regression Forests for Probabilistic Precipitation Forecasting in Complex Terrain». *The Annals of Applied Statistics*. 13.10.1214/19-AOAS1247.
- Turner, N. y Kramer, P.** (1980). *Adaptation of Plant to Water and High Temperature Stress*. Nueva York (Estados Unidos): John Wiley & Sons.
- Vennetier M.** (2010). *Climate Change Impact on Vegetation: Lessons from an Exceptionally Hot and Dry Decade in South-Eastern France, Climate Change and Variability*. Suzanne Simard (ed.).

ANEXO

1. Escenarios climáticos futuros¹

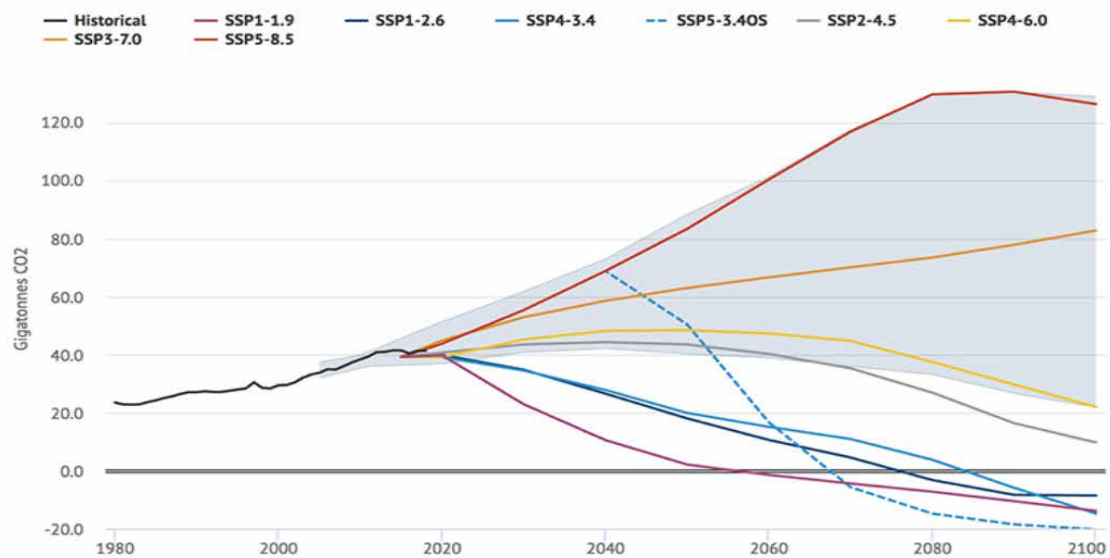
Los modelos climáticos se actualizan constantemente para incorporar una mayor resolución espacial, nuevos procesos físicos y ciclos biogeoquímicos. Estas actualizaciones se coordinan para que se realicen a la par de los informes de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Publican un conjunto de resultados de modelos, conocidos como «ejecuciones», en el periodo previo la presentación de estos informes del IPCC.

Estos esfuerzos coordinados son parte de los Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP). El quinto informe de evaluación del IPCC, 2013 (AR5), presentó modelos climáticos de CMIP5, mientras que el sexto informe de evaluación del IPCC, 2021 (AR6), tiene nuevos modelos CMIP6, de última generación. CMIP6 representa una expansión sustancial sobre CMIP5, en términos del número de grupos de modelado que participan, el número de escenarios futuros examinados y el número de diferentes experimentos realizados.

En el periodo previo al IPCC AR6, la comunidad científica ha desarrollado un nuevo conjunto de escenarios de emisiones impulsados por diferentes supuestos socioeconómicos. Estos son las «Rutas Socioeconómicas Compartidas» (SSP).

Anteriormente, el IPCC AR5 presentó cuatro vías de concentración representativas (RCP) que examinaron diferentes posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero. Estos escenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) tienen nuevas versiones en CMIP6. Estos escenarios actualizados se denominan SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5-8.5. También se utilizan varios escenarios nuevos para CMIP6. Los nuevos escenarios incluyen SSP1-1.9, SSP4-3.4, SSP5-3.4OS y SSP3-7.0 (figura 1).

¹ Tomado de www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained.

► **Figura 1. Escenarios futuros de emisiones de CO₂**

Escenarios futuros de emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) presentados en CMIP6, así como emisiones históricas de CO₂ (en negro). El área sombreada representa el rango de escenarios de referencia sin políticas climáticas.

Con estos nuevos escenarios, se pueden examinar los resultados del peor caso (SSP5-8.5), del intermedio (SSP3-7.0) y del más optimista (SSP4-6.0) al modelar cómo el mundo podría calentarse si no se implementa ninguna política climática.

SSP4-3.4 es otro escenario, el cual intenta explorar el espacio entre escenarios que generalmente limitan el calentamiento por debajo de 2 °C (RCP2.6/SSP1-2.6) y alrededor de 3 °C (RCP4.5/SSP2-4.5) hasta el año 2100. Esto ayudará a los científicos a evaluar mejor los impactos del calentamiento si las sociedades reducen rápidamente las emisiones, pero no mitigan lo suficientemente rápido como para limitar el calentamiento a menos de 2 °C.

SSP5-3.4OS es un escenario de sobreimpulso (OS) en el que las emisiones siguen una ruta SSP5-8.5 en el peor de los casos hasta el año 2040, tras lo cual disminuyen rápidamente con una gran cantidad de emisiones negativas de fines de siglo.

Finalmente, SSP1-1.9 es un escenario destinado a limitar el calentamiento por debajo de 1,5 °C para el año 2100 por encima de los niveles preindustriales. Se agregó a raíz del Acuerdo de París, cuando los países acordaron realizar esfuerzos para limitar el aumento de temperatura a 1,5 °C. Los modelos energéticos y los modelos climáticos simples desarrollados para limitar el calentamiento a 1,5 °C jugaron un papel importante en el informe especial que el IPCC publicó en 2018.

Los casos que se consideraran en este trabajo son SSP2-4.5 (mencionado en este documento como ssp245) y SSP5-8.5 (ssp585).

- El ssp245 indica un escenario SSP2 con forzante radiativo de 4,5 vatios por metro cuadrado (W/ m²) en el tope de la atmósfera para fin del siglo XXI. Al día de hoy, el forzante antropogénico es aproximadamente 2.3 W/m². Las emisiones alcanzan su punto máximo alrededor de 2040 y

luego disminuyen. Considera también un desarrollo humano intermedio, y es probable que en este escenario resulte un aumento de la temperatura global entre 2 y 3 °C para 2100. Muchas especies de plantas y animales no podrán adaptarse a los efectos de ssp245 y superiores.

- El ssp585 indica un escenario SSP5 con forzante radiativo de 8.5 W/m² en el tope de la atmósfera y es optimista respecto al desarrollo humano, pero basado en el mayor uso de combustibles fósiles. Desde AR5, se ha pensado que esto es muy poco probable, pero aún es posible, pues las retroalimentaciones no se comprenden bien. Es poco probable que en este escenario resulte un aumento de la temperatura global entre 3 y 4,8 °C para el año 2100.

2. El modelo CNRM-CM6-1

Es un modelo de circulación general atmósfera-océano totalmente acoplado de sexta generación desarrollado por el Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) y el Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (Cerfacs) para la sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 6 (CMIP6).

El presente trabajo se ha desarrollado con la última versión CNRM-CM6-1 de la *suite* CNRM-CM. Desde la versión CNRM-CM5.1 (modelo utilizado en varios estudios en el Perú) reportado en CMIP5, todos los componentes han sido actualizados por los desarrolladores del modelo. Para el océano, el hielo marino y los ríos, no hubo cambios importantes en las parametrizaciones. Por el contrario, los componentes de la atmósfera y la superficie terrestre se han revisado completamente con el uso de nuevas parametrizaciones de última generación. Para el componente atmosférico, los cambios importantes abarcan la representación de procesos de convección superficial y profunda, microfísica y turbulencia. Sobre la tierra, los esquemas de nieve y el suelo se han refinado, mientras que la hidrología se ha enriquecido para representar las inundaciones de los ríos y de los acuíferos.

Es importante mencionar que los modelos CMIP6 presentan en promedio una sensibilidad climática mayor a las de los modelos CMIP5. La sensibilidad climática se define como el aumento en la temperatura media global resultado de una duplicación de la concentración de CO₂ con respecto a sus valores preindustriales (de 280 a 560 ppm). El rango de la sensibilidad climática de los modelos es:

- CMIP5: de 2,1 a 4,7 °C.
- CMIP6: de 2,7 a 5,7 °C.

Por lo tanto, los modelos CMIP6 presentarán cambios mayores en temperatura y otras variables para el mismo aumento en el forzante radiativo antropogénico.

La sensibilidad climática de equilibrio (ECS) de CNRM-CM6-1 es igual a 4,9. Esto se encuentra en el límite superior de las sensibilidades climáticas proyectadas según los modelos climáticos CMIP5. Esto se debe a los importantes cambios realizados en el componente atmosférico. En particular, representa mejor las nubes bajas y la convección poco profunda, que son procesos clave en la retroalimentación climática y el calentamiento histórico simulado es compatible con las observaciones. Mayor información sobre el modelo se puede encontrar en:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019MS001683>

3. GAMLSS: Modelo aditivo generalizado para posición, escala y forma²

La predicción de una variable Y en función de uno o varios predictores X es un problema de aprendizaje supervisado que puede resolverse con múltiples métodos de Machine Learning y aprendizaje estadístico. Algunos de ellos consideran que la relación entre Y y X es solo lineal (modelo lineal, LM, o modelos lineales generalizados, GLM), mientras que otros permiten incorporar relaciones no lineales o incluso interacciones entre predictores (SVM, Random Forest, Boosting).

De una forma u otra, todos tratan de inferir la relación entre X e Y para obtener información sobre la distribución condicional de la variable respuesta en función de variables predictoras. Sin embargo, la gran mayoría de los modelos de regresión solo modelan la media de la variable respuesta $E(Y|X = x)$, al asumir que el resto de características de la distribución (dispersión, asimetría, etc.) son constantes. Esto supone una limitación importante a la hora de modelar distribuciones complejas, sobre todo si se pretende predecir intervalos de confianza o cuantiles.

Los modelos aditivos generalizados para posición, escala y forma GAMLSS (Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape) introducidos por Rigby y Stasinopoulos en 2005 son modelos de regresión semiparamétricos. Paramétricos porque requieren asumir que la variable de respuesta sigue una determinada distribución paramétrica (normal, beta, gamma...) y semi porque los parámetros de esta distribución pueden ser modelados, cada uno de forma independiente, siguiendo funciones no paramétricas (lineales, aditivas o no lineales). Esta versatilidad hace de los GAMLSS una herramienta adecuada para modelar variables que siguen todo un abanico de distribuciones (no normales, asimétricas, con varianza no constante, etcétera).

Los modelos GAMLSS asumen que la variable respuesta tiene una función de densidad definida por hasta cuatro parámetros (μ , σ , ν , τ) que determinan su posición (por ejemplo, media), escala (por ejemplo, desviación estándar) y forma (por ejemplo, skewness y kurtosis), y que cada uno de ellos puede variar independientemente de los otros en función de los predictores. Estos modelos aprenden por lo tanto hasta cuatro funciones, donde cada una establece la relación entre uno de los parámetros y las variables predictoras.

$$Y \sim D(\mu, \sigma, \nu, \tau)$$

$$Y = XT\beta$$

$$\eta_1 = g_1(\mu) = XT\beta + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_p(x_p)$$

$$\eta_2 = g_2(\sigma) = XT\beta + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_p(x_p)$$

$$\eta_3 = g_3(\nu) = XT\beta + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_p(x_p)$$

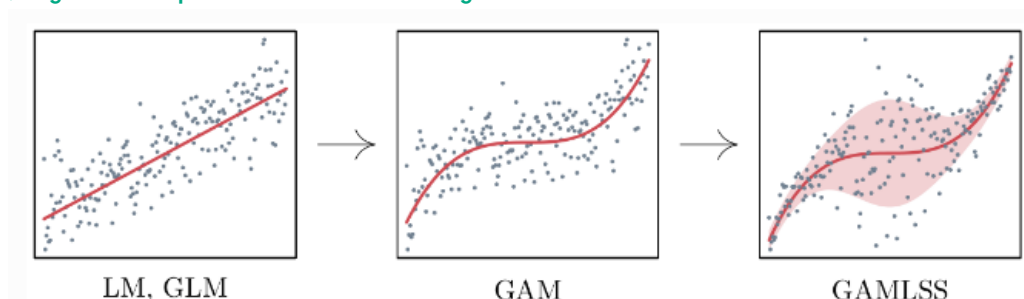
$$\eta_4 = g_4(\tau) = XT\beta + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_p(x_p)$$

Donde $Y \sim D(\mu, \sigma, \nu, \tau)$ es la distribución de la variable respuesta (pueden ser menos parámetros), X contiene los términos lineales del modelo, β son los coeficientes lineales y $f_i(x_i)$ son funciones de suavizado no lineales (*smooth*) de cada predictor.

² Tomado de www.cienciadedatos.net/documentos/63_gamlss.html.

Los GAMLSS son una forma de superar las limitaciones de los modelos GLM y también de los modelos aditivos generalizados (GAM). Como resultado del modelo, se consigue caracterizar la distribución completa, permitiendo generar intervalos probabilísticos y predicción de cuantiles.

►Figura 2. Comparación de modelos de regresión.



4. Generación de escenarios climáticos

Este procedimiento ha permitido mejorar la resolución de coberturas bioclimáticas al incorporar parámetros de ajuste que relacionan más activamente la topografía con la variación en las temperaturas y las precipitaciones que los constructos que solo consideran una sola variable. En este sentido, las cinco variables independientes (X) consideradas han sido altitud, latitud, longitud, distancia a la línea de costa y distancia a la cuenca amazónica. Es importante mencionar, que todos los procedimientos descritos han sido automatizados mediante la construcción de códigos en R.

La línea base climática de temperaturas se generó mediante modelos de regresión lineal múltiple. Del resultado de múltiples regresiones se seleccionaron los modelos que presentaron el caso más simple y en tanto que el valor de R_2 sea el más alto posible y el valor $p < 0,05$, resultando las constantes de regresión de la tabla 1.

►Tabla 1. Constantes de regresión de las variables climáticas de la línea base.

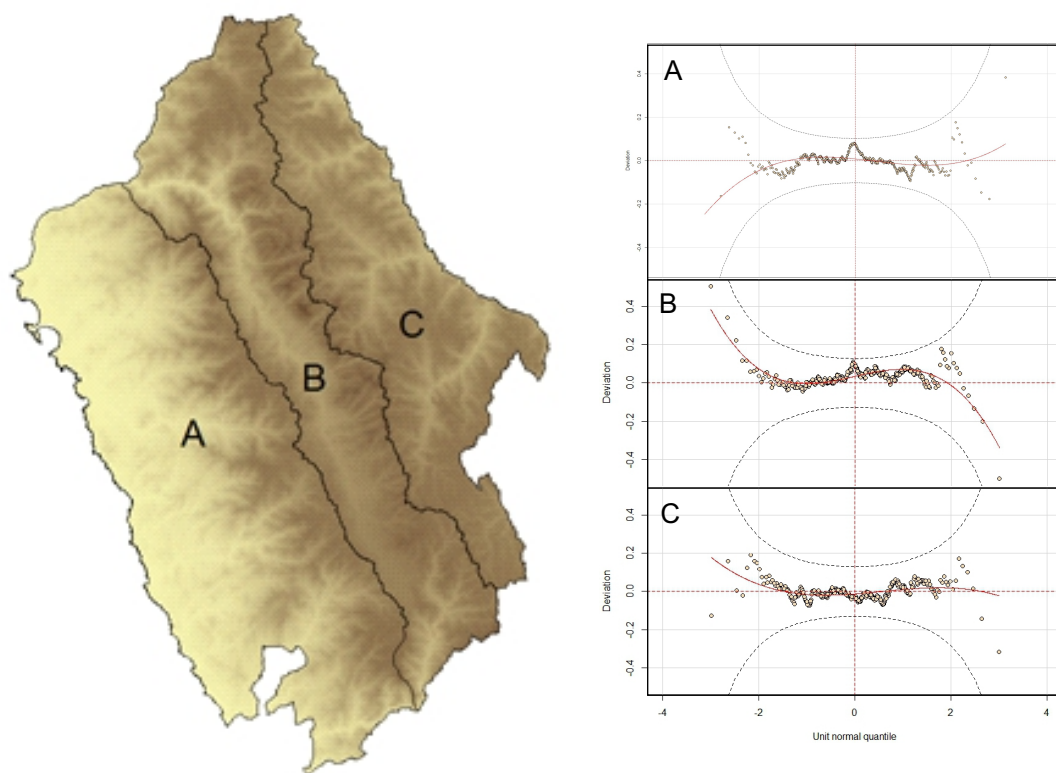
Coef	Tmp	Tn	Tnp	Tx	Txp
const	364,02	1458,08	762,42	-72,48	-77,87
H	-2,40E-03	-2,70E-03	-2,60E-03	-2,30E-03	-2,20E-03
Dist_mar	-4,15	-18,96	-9,68	1,24	1,92
Dist_amaz	2,24	3,47	3,69	2,06	0,94
Lat	2,33	8,44	4,38		
Lon	4,1	17,44	9,01	-1,31	-1,33

Tmp = Temperatura media promedio anual, Tn = Temperatura mínima del mes más frío, Tnp = Temperatura mínima promedio anual, Tx = Temperatura máxima del mes más cálido, Txp = Temperatura máxima promedio anual.

Para el caso de la línea base de precipitación, se empleó el modelo GAMLSS mediante la distribución Beta Generalizada 2, que tiene cuatro parámetros (μ , σ , ν , τ). Esta distribución es la que mejor ajuste tuvo de otras analizadas, corroborada mediante la métrica AIC (Criterio de Información de Akaike) y BIC/SBC (Bayesian Information Criterion) con los valores más bajos.

Debido a la compleja distribución de la precipitación en el departamento de Áncash, se modeló esta variable, separándola por sectores, basados en aspectos orográficos, según se muestra en la figura 3:

►Figura 3. Wormplot de la distribución Beta Generalizada 2 para precipitación.



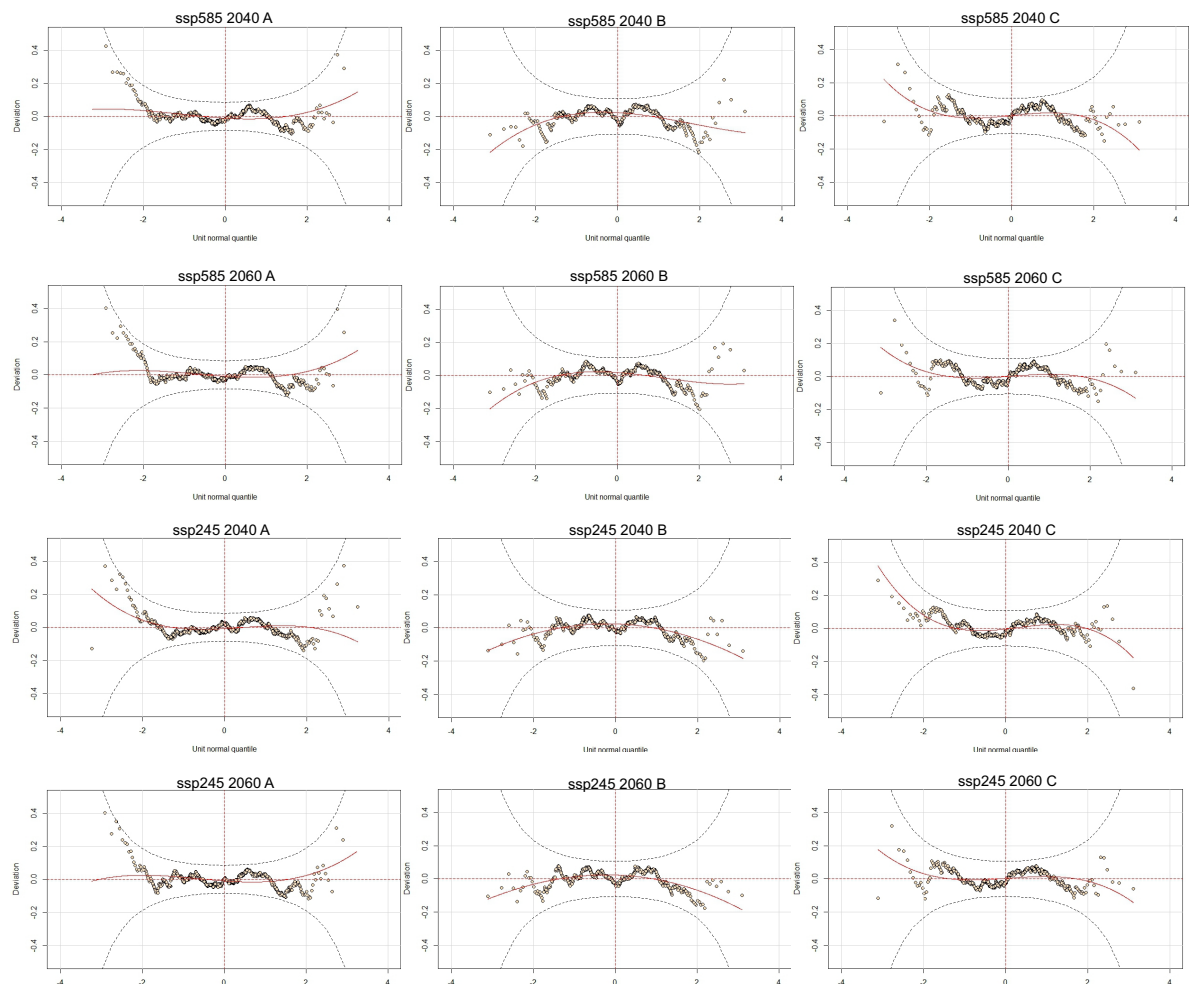
Un estudio visual del gráfico Wormplot indica que, con este modelo, la mayoría de los residuos están dentro del intervalo de confianza del 95% dentro, y es lo suficientemente flexible para capturar la asimetría de la distribución.

Las variables climáticas a los años 2040 y 2060 se trabajaron con la misma metodología de la línea base. Se calcularon las constantes de regresión para las temperaturas mínimas del mes más frío (T_n) y máximas del mes más cálido (T_x), mostradas en la tabla 2.

► Tabla 2. Constantes de regresión de temperaturas de los escenarios ssp585 y ssp245 analizados a los años 2040 y 2060.

Coef	ssp585				ssp245			
	2040		2060		2040		2060	
	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx
const	977,21	921,13	1005,26	934,95	983,59	934,41	970,71	956,76
H	-5,00E-03	-4,30E-03	-5,00E-03	-4,30E-03	-4,90E-03	-4,30E-03	-4,90E-03	-4,30E-03
Dist_mar	-10,59	-9,06	-10,84	-8,86	-10,62	-9,25	-10,28	-9,13
Dist_amaz		1,08		1,06	0,66	1,14	0,67	1,2
Lat	6,24	5,85	6,38	5,91	6,36	5,96	6,26	6,06
Lon	11,49	10,65	11,82	10,81	11,56	10,81	11,4	11,08

► Figura 4. Wormplot de la distribución Beta Generalizada 2 para precipitación a 2040 y 2060.



En el análisis de precipitación, como ya se mencionó, se trabajó con la aplicación del modelo GAMLSS siendo también la distribución Beta Generalizada 2 la que mostró mejores resultados. Los gráficos *wormplot* muestran también un buen ajuste de los resultados.

► Tabla 3. Valores de las variables climáticas por sectores tanto para el escenario actual como para el futuro.

VARIABLES		SECTOR		
		A	B	C
PRECIPITACIÓN (mm)	Mínimo_lb	10	188	586
	Máximo_lb	737	1.164	1.490
	Promedio_lb	192	705	882
	Mínimo_2040_ssp245	15	160	560
	Máximo_2040_ssp245	742	1.004	1.003
	Promedio_2040_ssp245	241	660	798
	Mínimo_2060_ssp245	16	167	564
	Máximo_2060_ssp245	751	1.022	995
	Promedio_2060_ssp245	247	674	800
	Mínimo_2040_ssp585	18	167	666
	Máximo_2040_ssp585	754	1.049	1.050
	Promedio_2040_ssp585	242	691	847
	Mínimo_2060_ssp585	16	194	580
	Máximo_2060_ssp585	826	1.098	1.109
	Promedio_2060_ssp585	260	726	884

VARIABLES		SECTOR		
		A	B	C
TEMPERATURA MÁXIMA DEL MES MÁS CÁLIDO (°C)	Mínimo_lb	8,6	0,7	3,6
	Máximo_lb	29,8	28	26,9
	Promedio_lb	23,2	15,6	16,2
	Mínimo_2040_ssp245	10,6	5,3	7,6
	Máximo_2040_ssp245	32,1	30,5	28,8
	Promedio_2040_ssp245	24,4	16,9	18
	Mínimo_2060_ssp245	11,2	5,9	8,2
	Máximo_2060_ssp245	32,4	31	29,5
	Promedio_2060_ssp245	24,8	17,5	18,8
	Mínimo_2040_ssp585	11	5,6	7,9
	Máximo_2040_ssp585	32,3	30,8	29
	Promedio_2040_ssp585	24,7	17,2	18,3
	Mínimo_2060_ssp585	11,9	6,6	9
	Máximo_2060_ssp585	33	31,7	30,2
	Promedio_2060_ssp585	25,5	18,2	19,5
TEMPERATURA MÍNIMA DEL MES MÁS FRÍO (°C)	Mínimo_lb	-8,7	-15	-12,2
	Máximo_lb	14,5	13,8	12,5
	Promedio_lb	8,2	-0,8	0
	Mínimo_2040_ssp245	-6,3	-12,5	-9,9
	Máximo_2040_ssp245	18,3	16,3	13,7
	Promedio_2040_ssp245	9,4	0,7	1,7
	Mínimo_2060_ssp245	-5,6	-11,8	-9,1
	Máximo_2060_ssp245	18,9	17	14,5
	Promedio_2060_ssp245	10,1	1,5	2,5
	Mínimo_2040_ssp585	-6,8	-13	-10,3
	Máximo_2040_ssp585	17,9	16	13,6
	Promedio_2040_ssp585	9,1	0,4	1,3
	Mínimo_2060_ssp585	-5,8	-12	-9,3
	Máximo_2060_ssp585	18,8	16,9	14,6
	Promedio_2060_ssp585	10	1,4	2,3

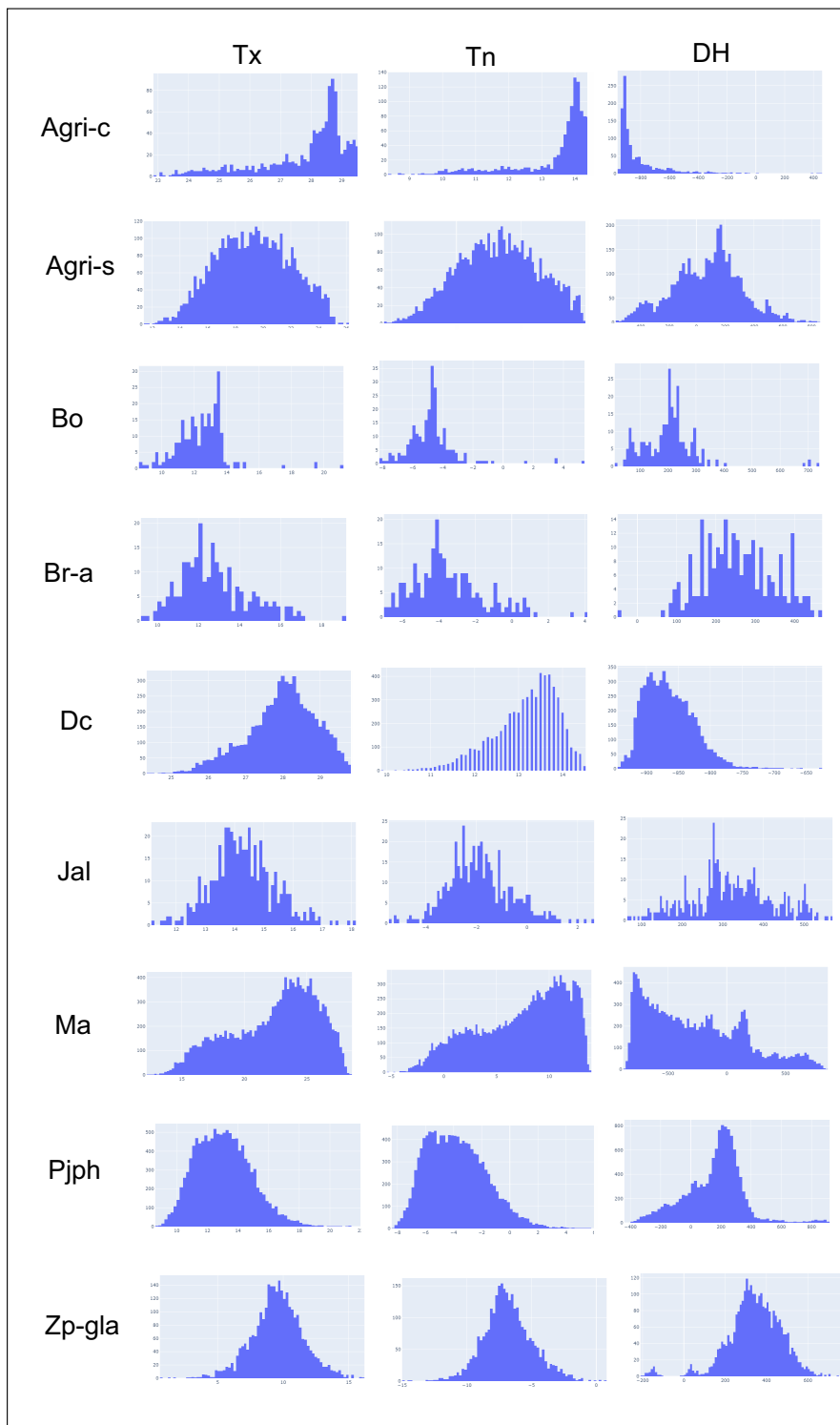
VARIABLES		SECTOR		
		A	B	C
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (mm)	Mínimo_lb	508	385	414
	Máximo_lb	957	865	772
	Promedio_lb	777	590	594
	Mínimo_2040_ssp245	427	298	346
	Máximo_2040_ssp245	963	908	828
	Promedio_2040_ssp245	768	572	581
	Mínimo_2060_ssp245	425	282	335
	Máximo_2060_ssp245	1.016	954	865
	Promedio_2060_ssp245	800	584	594
	Mínimo_2040_ssp585	415	288	334
	Máximo_2040_ssp585	981	916	829
	Promedio_2040_ssp585	769	566	576
	Mínimo_2060_ssp585	437	298	347
	Máximo_2060_ssp585	1.062	990	894
	Promedio_2060_ssp585	827	604	615

5. Generación de histogramas

Para calcular los histogramas de datos climáticos de cada ecosistema, se ha plasmado la información de los datos climáticos al interior de un archivo Shape con el de los ecosistemas en estudio. Para ello, se ha utilizado el **software** QGIS con la herramienta de complemento instalado previamente: «Point sampling tool».

Luego de juntar la información en un solo set de datos se han construido histogramas para temperatura máxima (Tx), temperatura mínima (Tn) y déficit hídrico (DH) en función de cada ecosistema, según se muestra en la figura 5.

► Figura 5. Histogramas de tolerancia de cada zona de distribución de los ecosistemas analizados.



6. Modelo de estrés bioclimático

Para evaluar el estrés bioclimático de los ecosistemas frente a los escenarios climáticos, se ha utilizado un modelo que integra a las dos mayores dimensiones del estrés: el estrés térmico (estival e invernal) y el estrés hídrico, particularmente originado en la acentuación de la aridez.

El estrés térmico estival (ET_E) está dado por la ecuación:

$$ET_E = S_{te} * (TXE_{futuro} - TXE_{línea base})$$

Y el estrés térmico invernal (ET_I) está dado por la ecuación:

$$ET_I = S_{ti} * (TNJ_{futuro} - TNJ_{línea base})$$

S_{te} y S_{ti} corresponden a la sensibilidad de un grupo de especies frente a las altas y bajas temperaturas respectivamente. Esta sensibilidad representa, en el primer caso, la caída relativa en el desempeño de las especies, por cada grado de alza de la temperatura al sobrepasar el umbral máximo de tolerancia de las altas temperaturas. En el segundo caso, la caída relativa en el desempeño de las especies, por cada grado de alza en las temperaturas invernales, lo que puede afectar el reposo vegetativo invernal. Estas sensibilidades son inversamente proporcionales al rango actualmente tolerado de cada variable. Para obtener los coeficientes de sensibilidad estival e invernal, se emplearon las ecuaciones siguientes:

Para las temperaturas estivales:

$$S_{te} = 0,1532 - 0,2424 * CV_{te}$$

Para las temperaturas invernales:

$$S_{ti} = 0,1552 - 0,1043 * CV_{ti}$$

Donde CV_{te} y CV_{ti} son los coeficientes de variación de las temperaturas máximas del mes más cálido y mínima del mes más frío, de cada ecosistema, respectivamente.

Para calcular el estrés hídrico, se empleó la siguiente ecuación, que relaciona la sensibilidad de los ecosistemas con el grado de intensificación de la aridez de cada uno de ellos.

$$E_h = S_h * (1 - IA_{futuro} / IA_{actual})$$

Donde E_h es el estrés hídrico de los ecosistemas, S_h es la sensibilidad de los mismos frente a la aridez y IA es el índice de aridez. La sensibilidad en tanto, es calculada en base al coeficiente de variación del índice de aridez propio de cada ecosistema.

$$S_h = 1,3042 - 0,908 * CV_{nIA}$$

Para integrar el estrés hídrico y el estrés térmico, se utilizó un modelo multiplicativo con atenuación regresiva, que permite atenuar gradualmente el efecto de un estrés cuando este actúa repetidas veces en el tiempo o cuando se combina con otros estreses que actúan en el mismo sentido. En este caso, tenemos dos fuentes de estrés: uno térmico (ET) y uno hídrico (Eh). Ambos producen una merma en la capacidad de sustentación del ecosistema. Si ellos actuaran por separado, cada uno se evaluaría aparte:

Caída de la capacidad de sustentación debida al estrés térmico = $I - ET$

Caída de la capacidad de sustentación debida al incremento de la aridez = $I - Eh$

En la práctica los estreses se superponen y pueden ser integrados en un modelo multiplicativo donde el desempeño o capacidad de sustentación se va reduciendo gradualmente en la medida que los estreses sean más intensos y numerosos. En la práctica, luego de un estrés primario, el efecto de los estreses secundarios va perdiendo importancia en la medida que el organismo esté más estresado. Por ello, un modelo multiplicativo, que atenúa el efecto de los estreses secundarios en función de la magnitud total del estrés en que se encuentra el organismo (atenuación regresiva), parece más indicado:

$$E_{INT} = 1 - (1 - ET) * (1 - Eh)^{(1 - ET)}$$

Donde E_{INT} es el estrés integrado conjunto debido al aumento de la temperatura y la intensificación de la aridez.

Sede central:

Av. Centenario 2656 - Sector Palmira, Independencia,
Huaraz, Áncash
www.gob.pe/inaigem



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA