



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS










<https://doi.org/10.14483/2256201X.24629>


ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

ISSN 0120-0739 • e-ISSN 2256-201X


## La disponibilidad hídrica, limita la supervivencia de *Abies hickelii* Flous & Gausсен ante condiciones de sequía


### Water Availability Limits the Survival of *Abies hickelii* Flous & Gausсен under Drought Conditions


Iván Hernández-Cruz <sup>a</sup>, Ciro Aquino-Vásquez <sup>a</sup>, Eduardo Alanís-Rodríguez <sup>b</sup>,  
Erickson Basave-Villalobos <sup>c</sup>, Cirilo Nolasco-Hipólito <sup>d</sup>, Pablo Antúnez <sup>a</sup> 

<sup>a</sup> Universidad de la Sierra Juárez. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. 

<sup>b</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México. 

<sup>c</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Iguala, Guerrero, México. 

<sup>d</sup> Universidad del Papaloapan. Tuxtepec, Oaxaca, México. 

 Autor para correspondencia

**Recibido:** 7 de febrero de 2026

**Aceptado:** 24 de abril de 2026

**Citación:** Hernández-Cruz, I., Aquino-Vásquez, C., Alanís-Rodríguez, E., Basave-Villalobos, E., Nolasco-Hipólito, C., & Antúnez, P. (2026). La disponibilidad hídrica limita la supervivencia de *Abies hickelii* Flous & Gausсен ante condiciones de sequía. *Colombia Forestal*, 29(2), e24629.

<https://doi.org/10.14483/2256201X.24629>

### Highlights

- La falta de riego elevó la marchitez y redujo drásticamente la supervivencia.
- La exposición solar aceleró la marchitez solo cuando existió déficit hídrico.
- El riesgo de mortalidad fue 5.3 veces mayor en plántulas sin riego.
- Las interacciones riego-tiempo y luz-tiempo explican la progresión no lineal.
- El sombreado parcial y riego moderado pueden mejorar el éxito en reforestación.

### Resumen

Las sequías prolongadas y las precipitaciones erráticas son cada vez más frecuentes debido al cambio climático, con consecuencias graves para la biodiversidad, comprometiendo la regeneración de especies amenazadas. En un experimento controlado, se evaluó la respuesta de plántulas de *Abies hickelii* al déficit hídrico, combinando condiciones de riego (con o sin riego) y de luz (sol o sombra). Se observó que el riesgo

de mortalidad fue cinco veces mayor en ausencia de riego, independientemente de si las plántulas se encontraban bajo sombra o no. Sin riego, las plántulas expuestas al sol toleraron aproximadamente 54 días antes de un colapso total, mientras que las mantenidas bajo sombra toleraron cerca de 62 días. La sombra redujo el índice de marchitez, pero no compensó la falta de agua. Por lo tanto, la disponibilidad de agua se identifica como un factor crítico para la supervivencia temprana de esta especie.

**Palabras clave:** cambio climático, escasez de agua, especie endémica, oyamel, plántulas, sequía prolongada.

### Abstract

Prolonged droughts and erratic rainfall are becoming increasingly common due to climate change, with serious consequences for biodiversity and jeopardizing the regeneration of threatened species. In a controlled experiment, the response of *Abies hickelii* seedlings to water stress was evaluated by combining two irrigation conditions (with and without water) and two light conditions (sun and shade). It was observed that the risk of mortality is five times higher in the absence of irrigation, regardless of light exposure. Without irrigation, seedlings exposed to sunlight survived approximately 54 days before total collapse, while those kept in the shade survived about 62 days. Shade reduced the wilting rate but did not compensate for the lack of water. Therefore, water availability is a critical factor for the early survival of this species.

**Keywords:** Climate change, water scarcity, endemic species, oyamel, seedlings, prolonged drought.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático altera los patrones de precipitación en todo el mundo y aumenta la variabilidad temporal y espacial en la disponibilidad de agua (IPCC, 2023). Este fenómeno se asocia con eventos extremos, como sequías prolongadas, así como con un comportamiento más errático de las precipitaciones (Trenberth *et al.*, 2014). En tal contexto, los ecosistemas de montaña y los bosques templados resultan particularmente vulnerables al cambio climático debido a su sensibilidad a variaciones en la temperatura y en la disponibilidad hídrica, especialmente en sistemas que históricamente han operado bajo condiciones relativamente estables (Pepin *et al.*, 2015).

En los bosques templados, la sombra generada por el dosel arbóreo ha sido identificada como un factor fundamental para la supervivencia de muchas especies en las fases iniciales de crecimiento, ya que reduce la transpiración y mitiga el riesgo de estrés térmico (Niinemets, 2010; Holmgren *et al.*, 2012). Esta condición ambiental es particularmente crítica para especies de distribución restringida como *Abies hickelii* Flous & Gausson, endémica de México y catalogada en peligro de extinción tanto por la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2010) como por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Farjon, 2013).

*A. hickelii* es considerada como una especie tolerante a la sombra que se distribuye en climas templados fríos (Encina-Domínguez *et al.*, 2008), a altitudes entre 2500–3600 m (Farjon, 1990; Ávila-Bello & López-Mata, 2001; Andersen *et al.*, 2006), generalmente en terrenos accidentados, donde prevalecen condiciones de sombra y alta humedad (Ávila-Bello & López-Mata, 2001; Guitérrez & Trejo, 2014). Por tanto, esta condición de paisaje donde *A. hickelii* habita sugiere el tipo de nicho ecológico propicio para su establecimiento, desarrollo y reproducción (Farjon, 1990; Ávila-Bello & López-Mata, 2001).

En etapa de plántula, los microambientes sombreados pueden funcionar como refugio cuando la disponibilidad de humedad es limitada. La sombra disminuye la temperatura del suelo y la evapotranspiración, e incrementa la humedad relativa, condiciones que en conjunto amortiguan el estrés hídrico en sequía estacional. Sin embargo, cuando hay sequía la radiación incidente incrementa. Los espacios sombreados se reducen espacial y temporalmente dejando a individuos desprovistos de esta protección. En este sentido, la heterogeneidad de la sombra en el dosel, y que incide en el sotobosque, genera condiciones microclimáticas que condicionan la respuesta de las plantas frente a la sequía (Marsh *et al.*, 2022).

El estudio de las respuestas a la presión combinada de la sequía y la sombra ha recibido interés para conocer el desempeño diferencial de las especies de plantas y la conformación de las comunidades (Kupers *et al.*, 2019). Para el caso de *A. hickelii* comprender el impacto biológico de estos dos factores también sería fundamental para conocer tanto el efecto combinado o simultáneo en el grado de tolerancia de las plántulas frente al déficit hídrico bajo condiciones contrastante de luz (p. ej. sol directo vs. sombra) como las respuestas de las plantas a cada factor por separado. Aunque la interacción entre sequía y la sombra han sido explorada en otras especies forestales (Ponce-Reyes *et al.*, 2012; Schwab *et al.*, 2022; Wood *et al.*, 2023), para *A. hickelii* no existe estudios que aborden esta problemática. La relevancia de este vacío de conocimiento radica en la condición de nicho específico que presenta esta especie por ser de distribución restringida en bosques de montaña húmedos. Por lo que es necesario conocer el grado de vulnerabilidad o resiliencia mediante su comportamiento frente a escenarios de cambio climático.

Allen *et al.* (2010), Choat *et al.* (2018) y Johnson & Yeakley (2019) mencionan que, en los bosques de alta montaña, la disponibilidad hídrica constituye un factor determinante en los procesos de regeneración; en muchos casos, por encima del efecto directo de la radiación solar. Aunque es sabido que en un entorno natural las plantas están sujetas al efecto de múltiples factores de estrés, y, en el caso de la exposición a radiación solar directa, el incremento de temperatura aumenta la temperatura foliar y la demanda evaporativa, lo que eleva el riesgo de marchitez y mortalidad, especialmente bajo condiciones de déficit hídrico (Will *et al.*, 2013). Por ello, la disponibilidad hídrica y la exposición a la luz podrían actuar de manera conjunta, determinando la expresión de marchitez foliar y afectando el establecimiento de plántulas de *A. hickelii* en condiciones naturales.

El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta de plántulas de *A. hickelii* al estrés hídrico inducido bajo condiciones controladas de exposición a radiación solar directa y sombra, mediante el efecto en el estado hídrico y la supervivencia de los individuos. Se planteó la hipótesis de que las plántulas sometidas a déficit hídrico presentarían un incremento progresivo de la marchitez foliar, el cual sería más pronunciado bajo radiación solar directa que bajo sombra, debido a una mayor demanda evaporativa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Población estudiada

La población de *A. hickelii* se localiza en la comunidad de Santo Domingo Xagacía, perteneciente al distrito de Villa Alta, Oaxaca, México (Figura 1). Esta población ocupa una superficie aproximada de 112.27 hectáreas y coexiste con especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*, entre las que destacan *Quercus laurina* Humb

et Bonpl., *Q. glabrescens* A. Kern, *Q. obtusata* Bonpl., *Pinus ayacahuite* Ehren, *P. patula* Schiede ex Schltdl. y *P. pseudostrobus* Lindl.). El área se ubica a una altitud que varía entre 2780 y 3010 m, con una temperatura media anual de 17.8 °C y una precipitación media anual de 1224 mm, y presenta una topografía caracterizada por pendientes moderadas (20–25°) y una exposición predominante hacia el noroeste. (Antúnez *et al.*, 2023).

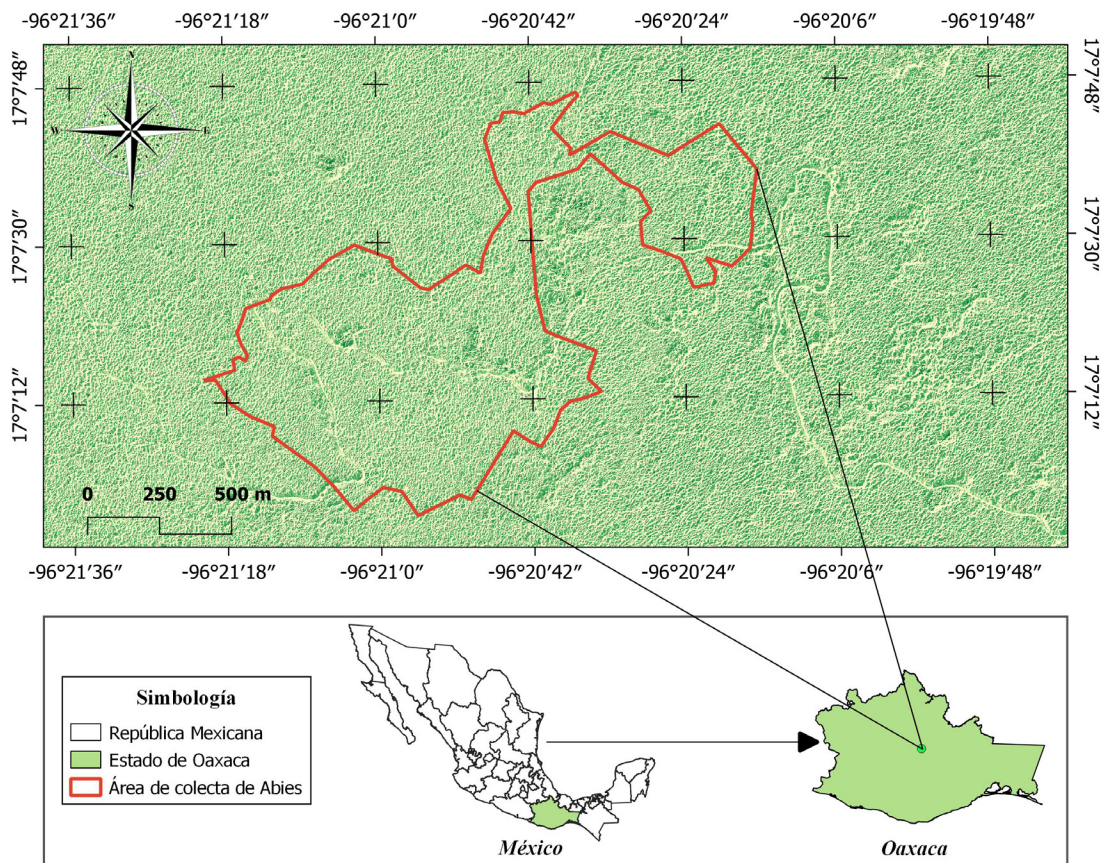
## Selección del material vegetal y trasplante

Dado que el área de estudio presenta una alta heterogeneidad topográfica, caracterizada por la presencia de laderas prolongadas y concavidades del terreno a distancias de pocos cientos de metros (Hernández-Cruz *et al.*, 2025), así como una marcada variación en la distribución espacial de la regeneración natural, se empleó un muestreo intencional en parches de alta abundancia (Aubry *et al.* 2024), con selección aleatoria de individuos dentro de cada parche. Debido al estado de conservación de la especie, se aplicó una asignación desproporcionada, realizando una mayor extracción en los parches con mayor densidad para minimizar el impacto en los sitios de colecta (Kalton & Anderson, 1986; Arnab, 2017). Se seleccionaron un total de 40 plántulas en fases iniciales de crecimiento, con alturas entre 2.9 y 21.5 cm, en buen estado fitosanitario y sin presencia visible de plagas ni daños mecánicos.

Las plántulas seleccionadas se extrajeron de manera íntegra, incluyendo la raíz y un volumen de suelo que cubriera uniformemente el sistema radicular. Posteriormente, se trasplantaron a bolsas de polietileno de 15 x 15 cm y se etiquetaron individualmente para su traslado a un área acondicionada dentro de uno de los viveros de la Universidad de la Sierra Juárez. Previo al experimento, todas las unidades experimentales se sometieron a un período de aclimatación de 10 días, durante el cual se aplicó riego cada tercer día hasta alcanzar la capacidad de campo. La delimitación del perímetro de la población estudiada se realizó mediante un receptor GPS Garmin®. Posteriormente, los datos geográficos obtenidos fueron procesados y visualizados en el software QGIS (v. 3.22.11).

## Diseño experimental

Se implementó un diseño factorial 2 x 2. El primer factor correspondió a la condición de luz, con dos niveles: exposición directa al sol y condición de sombra. El segundo factor consistió en el suministro de riego, con dos niveles: con riego y sin riego. En total, se establecieron cuatro tratamientos con 10 repeticiones cada uno, para un total de 40 unidades experimentales dispuestas espacialmente de forma aleatoria en un área acondicionada para el experimento, donde las condiciones ambientales (radiación, viento y temperatura) se mantuvieron lo más homogéneas posible: (1) sol con riego, (2) sol sin riego, (3) sombra con riego y (4) sombra sin riego. Cada plántula se mantuvo en una maceta individual y recibió los tratamientos de riego y luz de forma independiente, por lo que cada individuo constituyó una unidad experimental. La asignación de los tratamientos a las plántulas se realizó mediante un esquema de aleatorización simple.



**Figura 1.** Área de colecta de *Abies hickelii* en la comunidad de Santo Domingo Xagacia, Villa Alta, Oaxaca, México.

Para el tratamiento de sombra se instalaron estructuras de madera cubiertas con malla sombra de alta densidad, con una capacidad de sombreado del 95 %. Este nivel de sombreado se seleccionó para simular condiciones de sombra intensa comparables a las del sotobosque y para generar un contraste ambiental marcado con la condición de exposición directa al sol, lo que permitió evaluar la respuesta de las plántulas bajo condiciones de baja radiación. Todas las plántulas asignadas al tratamiento de sombra se colocaron bajo una misma estructura de sombreado, manteniendo una separación física entre macetas para evitar interferencia entre individuos.

### Evaluación del estrés hídrico

Las plántulas se monitorearon cada 24 horas para registrar el nivel de afectación por estrés hídrico, expresado en términos porcentuales, así como la supervivencia. Este intervalo de monitoreo y el criterio de supervivencia se definieron mediante un muestreo piloto, en el cual se observaron cambios visibles en el estado fisiológico de las plántulas en periodos de 24 horas. Asimismo, se observó que, una vez que las plántulas alcanzaban su nivel máximo de marchitez, no se registraba recuperación del estado fisiológico durante el periodo de

observación. Por lo que en este estudio se estableció como criterio de muerte la condición en la que la plántula alcanzaba el nivel máximo de estrés hídrico.

Aunque el periodo total del experimento fue de 13 semanas, el monitoreo de cada individuo sometido a tratamiento finalizó cuando alcanzó el nivel máximo de estrés hídrico. En este estudio, el estrés hídrico se cuantificó mediante un índice de marchitez foliar, expresado en porcentaje, utilizado como indicador funcional del nivel de afectación. Este índice se asignó a través de una evaluación visual sistemática en una escala continua de 0 a 100 %, basada en la pérdida progresiva de turgencia y la decoloración del follaje, desde el verde natural hasta tonalidades café-olivo (Anexo 1).

La evaluación visual de marchitez foliar es un método ampliamente utilizado en estudios experimentales con plántulas forestales cuando el objetivo es caracterizar la respuesta integrada al déficit hídrico, más que medir variables fisiológicas puntuales. La pérdida de turgencia y la decoloración foliar reflejan procesos ecofisiológicos asociados al estrés hídrico, como el cierre estomático, la reducción de la fotosíntesis, la disminución del contenido de clorofila y alteraciones en el transporte de agua y nutrientes (Vila, 2011). Este método ha sido implementado en plántulas de coníferas y latifoliadas sometidas a condiciones de sequía (Moura *et al.*, 2022), lo que respalda su validez como indicador visual indirecto del estrés hídrico en evaluaciones experimentales de tolerancia a la sequía.

## Análisis de datos

Para evaluar la variación en el índice de marchitez en función del tiempo transcurrido (horas) y de los tratamientos experimentales, se ajustó un modelo lineal mixto cuya expresión es:

$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_{1ij} + \beta_2 X_{2ij} + \beta_3 X_{3ij} + \beta_4 (X_{2ij} \times \beta_3 X_{3ij}) + b_j + \varepsilon_{ij}$ , donde  $\beta$  representa los coeficientes asociados a los efectos fijos,  $b_j$  corresponde al efecto aleatorio asociado a la plántula  $j$ , y  $\varepsilon_{ij}$  denota el error residual. En este modelo, el índice de marchitez se consideró como variable respuesta, mientras que los predictores fijos incluyeron el tiempo transcurrido, las condiciones de luz y riego, así como la interacción entre los factores estudiados. Para considerar la variabilidad individual entre plantas, se incorporó un intercepto aleatorio asociado a la identidad de cada plántula.

Con el fin de cuantificar la proporción de variabilidad explicada por el modelo, se calcularon los coeficientes de determinación marginal y condicional (Nakagawa & Schielzeth, 2013). El primer coeficiente representa la variabilidad explicada únicamente por los efectos fijos (horas, luz y riego), mientras que el segundo coeficiente representa la variabilidad explicada conjuntamente por los efectos fijos y aleatorios. El análisis se implementó en R v. 4.4.2 (R Core Team, 2024) utilizando los paquetes lme4 y lmerTest (Bates *et al.*, 2015), y la significancia de los efectos fijos se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA) tipo III del modelo mixto, obteniendo los valores de F y sus correspondientes niveles de significancia.

La segunda fase del análisis consistió en un análisis de supervivencia mediante el método de Kaplan-Meier, con el fin de evaluar la probabilidad de supervivencia a través del tiempo. Para ello, se utilizó la función `survfit` del paquete `survival` (Therneau, 2024). Las diferencias entre curvas de supervivencia se evaluaron mediante

la prueba de Tarone-Ware, seleccionada por su sensibilidad para detectar diferencias en etapas tempranas de supervivencia (Tarone & Ware, 1977). En las pruebas de hipótesis se consideró un nivel de referencia de 0.05: un valor de p próximo a cero representó una evidencia sólida en contra de la hipótesis nula, en tanto que un valor próximo a uno evidenció una escasa evidencia para refutarla (Antúnez et al., 2021).

Finalmente, se ajustó un modelo de regresión de Cox de riesgos proporcionales para evaluar el efecto de los tratamientos (condición de luz y suministro de riego) sobre la supervivencia de las plántulas. Este modelo permitió estimar la razón de riesgo (hazard ratio: HR), interpretada como el cambio relativo en el riesgo de mortalidad asociado a cada variable explicativa. La significancia de los efectos se evaluó mediante pruebas de Wald, y se calcularon intervalos de confianza del 95 % para los estimadores. Este análisis se implementó en el paquete survival de R.

## RESULTADOS

### Análisis de los efectos fijos y sus interacciones sobre el estrés hídrico

Los efectos fijos incluidos en el modelo lineal mixto (horas transcurridas, condiciones de luz y suministro de riego) mostraron efectos significativos sobre el índice de marchitez, de acuerdo con el estadístico F del ANOVA. En particular, las horas transcurridas y el factor riego tuvieron efectos altamente significativos en el índice de marchitez ( $p < 0.0001$ ), mientras que la condición de luz presentó un efecto marginalmente significativo (Tabla 1).

Asimismo, las interacciones entre horas transcurridas y condición de luz; así como, entre horas transcurridas y condición de riego, fueron significativas ( $p = 0.0033$  y  $p < 0.0001$ , respectivamente), indicando que la evolución temporal del índice de marchitez dependió de ambos factores. Por el contrario, la interacción entre condición de luz y condición de riego ( $p = 0.1665$ ), así como la interacción triple (horas transcurridas x condición de luz x riego), no resultaron significativas ( $p = 0.3431$ ).

**Tabla 1.** Análisis de varianza de los efectos de las horas transcurridas, condiciones de luz y la condición de riego sobre el índice de marchitez en *Abies hickelii*. Los valores de F y los grados de libertad se calcularon utilizando la aproximación de Satterthwaite implementada en el paquete lmerTest en R.

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Valor de F	Valor de P
Horas transcurridas	108 423	938.62	138.27	< 2.2e-16
Condición de luz: Exposición al sol	2899	937.27	3.70	0.0548
Condición de riego: Sin riego	21 470	938.01	27.38	2.06e-07
Horas transcurridas x Condición de luz: Exposición al sol	6822	939.35	8.70	0.0033
Horas transcurridas x Condición de riego: Sin riego	51 661	940.01	65.88	1.49e-15
Condición de luz: Exposición al sol x Condición de riego: Sin riego	1504	937.67	1.92	0.1665
Horas transcurridas x Condición de luz: Exposición al sol x Condición de riego: Sin riego	705	939.62	0.90	0.3431

El modelo explicó el 38.2 % de la variación total observada en la variable respuesta. De este valor porcentual, el 16.8 % se atribuyó a los efectos fijos y la parte restante a los efectos aleatorios. Los efectos más relevantes se observaron en las interacciones conforme el tiempo transcurrió. Así, la interacción entre horas transcurridas y la exposición al sol ( $\beta=0.0167$ ) indicó que, bajo exposición directa al sol, el índice de marchitez aumentó de forma más rápida con el transcurrir del tiempo en comparación con el tratamiento de referencia (sombra con riego) (Tabla 2). De manera similar, la interacción entre horas transcurridas y la condición sin riego (con un coeficiente  $\beta = 0.0391$ ) indicó que, en ausencia de suministro de agua, el índice de marchitez aumentó a una tasa de 0.0391 unidades ( $\approx 3.91$  puntos porcentuales) por hora con el transcurrir del tiempo, en comparación con el tratamiento de referencia (sombra con riego) (Tabla 2).

La interacción entre la condición de luz y la condición de riego fue positiva con un coeficiente igual a 14.92, lo que sugiere que, la combinación de exposición al sol y la ausencia de riego generó un índice de marchitez mayor al esperado bajo un efecto aditivo simple de ambos factores; sin embargo, es de subrayarse que este efecto no fue estadísticamente significativo. Finalmente, la interacción triple: horas transcurridas x condición de luz x riego no mostró evidencia de un cambio significativo en el coeficiente del índice de marchitez cuando las plántulas se encontraron simultáneamente expuestas al sol y sin suministro de riego (Tabla 2).

La gráfica de predicción evidenció un incremento progresivo del índice de marchitez en todos los tratamientos conforme transcurrió el tiempo. Las diferencias entre tratamientos fueron claras y consistentes durante todo el periodo del experimento. Los valores más altos del índice ( $>40$  %) se registraron en las plántulas sin suministro de riego y con exposición directa al sol, mientras que los valores más bajos correspondieron a las plántulas bajo sombra con suministro de agua. Asimismo, la disposición de las líneas de regresión aparentemente paralelas (Anexo 2) sugiere que los efectos de la condición de luz y del suministro de riego fueron principalmente aditivos, aunque esta interpretación debe considerarse en conjunto con los resultados del modelo estadístico.

**Tabla 2.** Resultados del modelo lineal mixto de los efectos de las horas transcurridas, la condición de luz y la condición de riego sobre el porcentaje de marchitez en *Abies hickelii*. Los efectos principales se interpretan en el tiempo de referencia ( $t=0$ ); las diferencias de pendiente se interpretan con las interacciones horas

Efecto	Estimación	Error estándar	Grados de libertad	Valor t
Intercepto	17.95	6.95	26.07	2.58
Horas transcurridas	-0.00057	0.00296	939.39	-0.19
Condición de luz: Exposición al sol	-17.81	7.32	937.51	-2.43
Condición de riego: Sin riego	-35.71	6.83	937.38	-5.23
Horas transcurridas x Condición de luz: Exposición al sol	0.0167	0.00548	938.10	3.06
Horas transcurridas x Condición de riego: Sin riego	0.0391	0.00467	938.51	8.37
Condición de luz: Exposición al sol x Condición de riego: Sin riego	14.92	10.78	937.67	1.39
Horas transcurridas x Condición de luz: Exposición al sol x Condición de riego: Sin riego	-0.00816	0.00860	939.62	-0.95

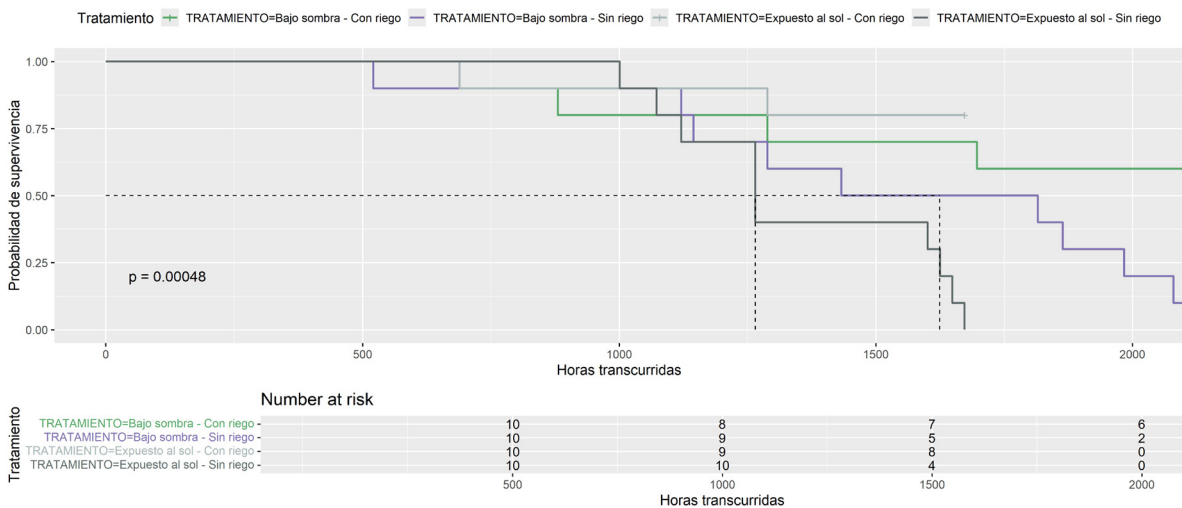
En general, el modelo mixto ajustado y las predicciones obtenidas mediante la función *ggpredict* confirmaron el patrón observado previamente: bajo sombra, las plántulas con riego mantuvieron menores niveles de marchitez, mientras que las plantas sin riego mostraron un aumento de marchitez más pronunciado con el tiempo. Bajo exposición al sol, la marchitez fue generalmente mayor, destacando el tratamiento sin riego como el de mayor incremento durante el periodo evaluado (Anexo 3).

### Análisis de supervivencia - Método Kaplan-Meier

El análisis de supervivencia confirmó que la menor probabilidad de supervivencia se observó en el tratamiento con exposición solar directa y sin riego, mientras que los tratamientos con sombra y riego presentaron las mayores probabilidades de supervivencia (> 0.58), lo cual es consistente con los patrones de respuesta detectados mediante el modelo lineal mixto.

Las plántulas expuestas al sol y sin riego mostraron la mortalidad más acelerada. En este tratamiento, la supervivencia comenzó a disminuir notablemente a partir de las 1000 horas de evaluación y descendió de forma acelerada hasta alcanzar valores cercanos a cero hacia las 1673 horas. En contraste, las plántulas bajo sombra y sin riego exhibieron una reducción gradual de la supervivencia a lo largo del tiempo.

Por otro lado, los tratamientos con suministro de agua, tanto en condición de sombra como en exposición solar, mantuvieron niveles de supervivencia relativamente altos (>0.55) durante todo el periodo experimental, lo que sugiere que el riego fue un factor decisivo en la supervivencia de las plántulas. La prueba de Tarone-Ware detectó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ( $p = 0.00048$ ), respaldando los patrones observados en las curvas de supervivencia (Figura 2).



**Figura 2.** Curva de supervivencia Kaplan-Meier para los organismos bajo cuatro tratamientos ambientales. Cada línea representa la probabilidad de supervivencia a lo largo del tiempo para cada tratamiento. El valor  $p = 0.00048$ , obtenido mediante la prueba de Prueba de log-rank, indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

La mediana de supervivencia ( $S(t) = 0.5$ ) mostró claras diferencias entre tratamientos. En condiciones de sombra sin riego, este umbral se alcanzó aproximadamente a las 1500 horas (equivalente a más de 62 días), mientras que en exposición solar sin riego ocurrió hacia las 1300 horas transcurridas (aproximadamente 54 días) (Figura 2).

## Modelo de regresión de Cox

El modelo de regresión de Cox confirmó que la supervivencia de las plántulas estuvo determinada principalmente por el suministro de agua, mostrando un efecto altamente significativo ( $p = 0.0005$ ). Este análisis, basado en el tiempo hasta la mortalidad, permitió cuantificar el incremento en el riesgo asociado al déficit hídrico: las plántulas sin riego presentaron un riesgo de mortalidad 5.31 veces mayor ( $HR = 5.31$ ;  $IC_{95\%}: 2.09-13.5$ ) en comparación con aquellas que recibieron suministro de agua. Por su parte, la exposición al sol se asoció con un aumento del riesgo ( $HR = 1.8$ ;  $IC_{95\%}: 0.73-4.4$ ), aunque dicho efecto no fue estadísticamente significativo ( $p = 0.202$ ), lo que sugiere que su influencia es secundaria frente al estado hídrico (Tabla 3).

## DISCUSIÓN

Los resultados indican que la disponibilidad hídrica fue el factor mayormente determinante en el aumento del índice de marchitez en plántulas de *A. hickelii*. La ausencia de riego provocó una respuesta fisiológica más intensa, lo que concuerda con estudios que muestran que la limitación de agua reduce rápidamente la función fisiológica, comprometiendo la integridad del sistema hidráulico y llevando al deterioro irreversible si las reservas no se recuperan (McDowell *et al.*, 2008).

Por su parte, la condición de luz no mostró un efecto significativo. Sin embargo, la interacción con el tiempo fue relevante, indicando que la exposición directa acelera el índice de marchitez cuando el recurso es limitado (Hu *et al.*, 2023). En ambientes con alta radiación, la demanda evaporativa aumenta, intensificando la transpiración y, por ende, el consumo de agua. Bajo estas condiciones, las plántulas sin riego acumularon marchitez foliar más rápidamente que aquellas que permanecieron bajo sombra o con suministro de agua.

La hipótesis plantea una interacción significativa entre agua y luz que resultara en un efecto sinérgico sobre la marchitez de las plántulas. Los resultados evidenciaron que ambos factores actuaron de manera independiente. Esto indica que, bajo condiciones de déficit hídrico severo, el agua se convierte en el factor limitante dominante, reduciendo el margen de influencia de la luz sobre la respuesta fisiológica de las plántulas. Lo anterior concuerda con lo reportado por Goke & Martin (2023), quienes señalan que la interacción entre la

**Tabla 3.** Resultados del modelo de regresión de Cox para las variables luz y riego sobre la supervivencia de plántulas.

Variable	Coficiente ( $\beta$ )	Hazard ratio	Error estándar	Estadístico Z	Valor p
Luz: Expuesto al sol	0.5878	1.8000	0.4615	1.274	0.2028
Riego: Sin riego	1.6711	5.3180	0.4768	3.505	0.0005

sequía y el microambiente lumínico en plántulas de *Abies lasiocarpa* y *Picea engelmannii* en bosques subalpinos de las Montañas Rocosas, varía según la severidad del déficit hídrico.

En bosques templados de montaña, la regeneración de especies del género *Abies* suele estar fuertemente influenciada por la presencia de microambientes favorables (Hernández-Ramírez, 2022), como la cobertura de dosel o la protección proporcionada por plantas nodrizas, lo que puede reducir la radiación incidente y la pérdida de agua del suelo. Estudios en especies forestales han demostrado que estos microambientes pueden mejorar la supervivencia y el establecimiento de plántulas al moderar simultáneamente la disponibilidad hídrica y la exposición lumínica (Marañón *et al.*, 2004; Kloetzer-Araya, 2025). Por lo tanto, la ausencia de un efecto significativo de la luz en este estudio podría estar relacionada con la simplificación experimental de estos gradientes ambientales, los cuales, en condiciones naturales presentan mayor heterogeneidad espacial.

Las interacciones dobles entre el tiempo transcurrido y las condiciones de riego y luz fueron estadísticamente significativas, lo que sugiere que la marchitez no progresa de manera lineal, sino que la tasa de acumulación aumenta más rápidamente bajo condiciones de déficit hídrico y exposición a alta irradiación. Este patrón coincide con lo reportado por Seleiman *et al.* (2021), quienes señalan que la pérdida progresiva de reservas en las plantas y la disminución en la capacidad de compensación limitan la recuperación fisiológica. No obstante, la interacción triple entre tiempo, riego y luz no fue significativa, lo que indica que no existe una sinergia adicional más allá de lo captado por las interacciones dobles, sugiriendo la presencia de efectos aditivos más que efectos compuestos.

El análisis de supervivencia mediante Kaplan-Meier confirmó que las plántulas sin suministro de agua tuvieron una reducción marcada en la probabilidad de supervivencia, particularmente bajo exposición solar directa. El modelo de Cox reforzó este resultado al mostrar un riesgo de mortalidad cerca de 5.3 veces mayor en plántulas sin riego ( $p = 0.0005$ ), mientras que el efecto de la exposición al sol ( $HR=1.8$ ) no fue estadísticamente significativo ( $p = 0.202$ ). Estos hallazgos coinciden con tendencias reportadas en estudios de mortalidad inducida por sequía en árboles juveniles, donde la disponibilidad hídrica es el factor crítico limitante frente a otras variables del ambiente (Lalor *et al.*, 2023).

Desde un punto de vista fisiológico, los mecanismos de mortalidad por sequía pueden involucrar fallos hidráulicos y agotamiento de reservas (McDowell *et al.*, 2008). La incapacidad de mantener la integridad hidráulica o de cerrar estomas adecuadamente puede conducir a embolias, pérdida de conductividad y muerte tisular. En ese sentido, bajo condiciones prolongadas de déficit, los mecanismos de regulación estomática son insuficientes para evitar falla hidráulica (Chen *et al.*, 2023). Además, el concepto de memoria al índice de marchitez; es decir, la capacidad de una planta de responder de manera diferencial a episodios sucesivos de sequía a partir de experiencias previas añade una dimensión de plasticidad adaptativa que podría influir en la supervivencia bajo múltiples episodios de estrés (Jacques *et al.*, 2021).

Entre las limitaciones del estudio deben considerarse algunos aspectos inherentes al diseño experimental. En primer lugar, el experimento se realizó bajo condiciones controladas, lo que reduce la variabilidad ambiental presente en sistemas naturales, donde factores adicionales como la heterogeneidad del suelo, la competencia y las interacciones bióticas pueden modificar la respuesta de las plántulas al estrés hídrico. En segundo lugar, los tratamientos aplicados representaron condiciones extremas de disponibilidad hídrica, lo que pudo

favorecer la dominancia del factor agua y limitar la detección de interacciones entre variables. Asimismo, el estudio se enfocó en plántulas en etapas tempranas de desarrollo, por lo que las respuestas podrían diferir en individuos juveniles o adultos.

No obstante, pese a estas consideraciones, estos hallazgos aportan información relevante para el diseño de programas de reforestación y manejo forestal en escenarios de cambio climático, particularmente para la especie estudiada y para otras especies con distribución restringida. La disponibilidad de agua se identificó como un factor determinante en la supervivencia de plántulas de *A. hickelii*. En consecuencia, la implementación conjunta de sombreo y riego podría contribuir a reducir la tasa de mortalidad en programas de reforestación, aunque su efectividad debería evaluarse bajo condiciones de campo y en diferentes contextos ambientales.

## CONCLUSIONES

Los resultados confirman que el estrés hídrico en plántulas de *Abies hickelii* aumenta progresivamente con el tiempo y está determinado principalmente por la disponibilidad de agua. La ausencia de riego fue el factor más influyente tanto en el incremento del índice de marchitez como en la reducción de la supervivencia, mientras que la exposición al sol aceleró el aumento del estrés bajo condiciones de déficit hídrico, sin evidenciarse un efecto sinérgico adicional significativo entre ambos factores. Como líneas de investigación futuras, sería pertinente integrar mediciones fisiológicas adicionales —como el potencial de agua foliar, el contenido relativo de agua, la conductancia estomática o indicadores de embolia— así como evaluar propiedades del suelo relacionadas con la retención de humedad y la materia orgánica.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación Idea Wild el apoyo financiero otorgado para la adquisición de tres equipos de medición forestal, en el marco del proyecto de investigación del cual se deriva este artículo.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

I. H-C y P.A. idearon la investigación, analizaron los datos y redactaron el manuscrito; I.H-C: tomó los datos en campo y laboratorio; PA Diseñó el estudio, supervisó y coordinó el proyecto. C. A-V., E. A-R., E. B-V. y C. N-H. realizaron una revisión crítica del manuscrito, validaron la investigación, contribuyeron a la discusión y fortalecieron el contenido. Además, C. N-H. ajustó el manuscrito al formato requerido y colaboró en la preparación de la versión final del documento.

## DECLARACIÓN DE USO DE IA

El trabajo de investigación, incluida la recopilación de información, el análisis de datos y la interpretación de los resultados, fue realizado íntegramente por los autores, quienes asumen la responsabilidad total del contenido del manuscrito. Se utilizó ChatGPT (OpenAI, 2026) para la detección de errores ortográficos y el ajuste del formato de las referencias una vez aceptado el manuscrito. Todas las sugerencias generadas fueron revisadas, verificadas y editadas por los autores antes de su incorporación a la versión final del documento.

## REFERENCIAS

- Allen, C. D. , Macalady, A. K. , Chenchouni, H. , Bachelet, D. , McDowell, N. , Vennetier, M. , Kitzberger, T. , Rigling, A. , Breshears, D. D. , Hogg, E. H. , Gonzalez, P. , Fensham, R. , Zhang, Z. , Castro, J. , Demidova, N. , Lim, J.-H. , Allard, G. , Running, S. W., Semerci, A. , & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Andersen, U. S., Córdova, J. P. P., Sørensen, M., & Kollmann, J. (2006). Conservation and utilisation of *Abies guatemalensis* Rehder (Pinaceae)—An endangered endemic conifer in Central America. *Biodiversity and Conservation*, 15(10), 3131–3151.  
<https://doi.org/10.1007/s10531-005-5405-x>
- Antúnez, P., Hernández-Cruz, I., Ibrahim-Abdulsalam, F., Clark-Tapia, R., Ruiz-Aquino, F., & Valenzuela-Encinas, C. (2023). Effects of distance and neighbor size on *Abies hickelii*: The asymmetric competition is aggravated in an endangered species. *Forests*, 14(8), Article 1654.  
<https://doi.org/10.3390/f14081654>
- Antúnez, P., Rubio-Camacho, E. A. R., & Kleinn, C. (2021). Prueba de hipótesis en la investigación forestal, agropecuaria y en la ecología: retos y malentendidos sobre el uso de los niveles de significancia de 0.05 y 0.01. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(1), e2616.  
<https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2616>
- Arnab, R. (2017). Stratified sampling. In *Survey sampling theory and applications* (pp. 213–256). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811848-1.00007-8>
- Aubry, P., Francesiaz, C., & Guillemain, M. (2024). On the impact of preferential sampling on ecological status and trend assessment. *Ecological Modelling*, 492, 110707.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110707>
- Ávila-Bello, C. H., & Mata-López, L. (2001). Distribución y análisis estructural de *Abies hickelii* (Flous & Gausson) en México. *Interciencia*, 26(6), 244–251.

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S.** (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48.  
<https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Chen, L., Li, M., Li, C., Zheng, W., & Liu, R.** (2023). Different physiological responses to continuous drought between seedlings and younger individuals of *Haloxylon ammodendron*. *Plants*, 12(21), Article 3683.  
<https://doi.org/10.3390/plants12213683>
- Choat, B., Brodribb, T. J., Brodersen, C. R., Duursma, R. A., López, R., & Medlyn, B. E.** (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, 558(7711), 531–539.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0240-x>
- Encina-Domínguez, J. A., Encina-Domínguez, F. J., Mata-Rocha, E., & Valdés-Reyna, J.** (2008). Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 83, 13–24.  
<https://doi.org/10.17129/botsci.1785>
- Farjon, A.** (1990). *Pinaceae: Drawings and descriptions of the genera: Abies, Cedrus, Pseudolarix, Keteleeria, Nothotsuga, Tsuga, Cathaya, Pseudotsuga, Larix and Picea*. Koeltz Scientific Books.
- Farjon, A.** (2013). *Abies hickelii*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2013*, e.T42286A2969866.  
<https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42286A2969866.en>
- Goke, A., & Martin, P. H.** (2023). Drought-induced photosynthetic decline and recruitment losses are mediated by light microenvironment in Rocky Mountain subalpine forest tree seedlings. *Forest Ecology and Management*, 546, 121295.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121295>
- Guitérrez, E., & Trejo, I.** (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188.  
<https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Hernández-Cruz, I., Antúnez, P., Alanís-Rodríguez, E., & Aquino-Vásquez, C.** (2025). La dirección importa: El inesperado papel del azimut en la distribución espacial de la regeneración de *Abies hickelii* (Flous & Gaussen). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 22(50), 142–162.  
<https://doi.org/10.18845/rfmk.v22i50.7763>
- Hernández-Ramírez, V.** (2022). *Dinámica poblacional de plántulas de Abies religiosa (Kunth) Schltdl. & Cham en el Norte de la Sierra Nevada* [Tesis De maestría, Colegio de postgraduados].  
<http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/4736>

- Holmgren, M., Gómez-Aparicio, L., Quero, J. L., & Valladares, F.** (2012). Non-linear effects of drought under shade: Reconciling physiological and ecological models in plant communities. *Oecologia*, *169*(2), 293–305.  
<https://doi.org/10.1007/s00442-011-2196-5>
- Hu, F., Zhang, Y., & Guo, J.** (2023). Effects of drought stress on photosynthetic physiological characteristics, leaf micro-structure, and related gene expression of yellow horn. *Plant Signaling & Behavior*, *18*(1), 2215025.  
<https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2215025>
- Intergovernmental Panel on Climate Change.** (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.  
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jacques, C., Salon, C., Barnard, R. L., Vernoud, V., & Prudent, M.** (2021). Drought stress memory at the plant cycle level: A review. *Plants*, *10*(9), Article 1873.  
<https://doi.org/10.3390/plants10091873>
- Johnson, A. C., & Yeakley, J. A.** (2019). Microsites and climate zones: Seedling regeneration in the alpine treeline ecotone worldwide. *Forests*, *10*(10), 864.  
<https://doi.org/10.3390/f10100864>
- Kalton, G., & Anderson, D. W.** (1986). Sampling rare populations. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, *149*(1), 65-82.  
<https://doi.org/10.2307/2981886>
- Kloetzer Araya, K. R.** (2025). *Análisis de la regeneración natural de especies arbóreas en la Región de La Araucanía, Chile* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.  
<https://doi.org/10.58011/6y08-b249>
- Kupers, S. J., Wirth, C., Engelbrecht, B. M. J., Hernández, A., Condit, R., Wright, S. J., & Rüger, N.** (2019). Performance of tropical forest seedlings under shade and drought: an interspecific trade-off in demographic responses. *Scientific Reports*, *9*, 18784.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-55256-x>
- Lalor, A. R., Law, D. J., Breshears, D. D., Falk, D. A., Field, J. P., Loehman, R. A., Triepke, F. J., & Barron-Gafford, G. A.** (2023). Mortality thresholds of juvenile trees to drought and heatwaves: Implications for forest regeneration across a landscape gradient. *Frontiers in Forests and Global Change*, *6*, Article 1198156.  
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1198156>
- Marañón, T., Camarero, J. J., Castro Gutiérrez, J., Díaz Esteban, M., Espelta, J. M., Hampe, A., Jordano, P., Valladares Ros, F., Verdú, M., & Zamora Rodríguez, R.** (2004). Heterogeneidad ambiental y nicho de regeneración. En F. Valladares Ros (Ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (pp. 66–99). Ministerio de Medio Ambiente (España).  
<http://hdl.handle.net/10261/40606>

- Marsh, C., Krofcheck, D. & Hurteau, M. D.** (2022). Identifying microclimate tree seedling refugia in post-wildfire landscapes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 313, 108741.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108741>
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yezzer, E. A.** (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719–739.  
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- Moura, B. B., Paoletti, E., Badea, O., Ferrini, F., & Hoshika, Y.** (2022). Visible foliar injury and ecophysiological responses to ozone and drought in oak seedlings. *Plants*, 11(14), 1836.  
<https://doi.org/10.3390/plants11141836>
- Nakagawa, S., & Schielzeth, H.** (2013). A general and simple method for obtaining  $R^2$  from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133–142.  
<https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x>
- Niinemets, Ü.** (2010). Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1623–1639.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.054>
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraër, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., ... Yang, D. Q.** (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424–430.  
<https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Ponce-Reyes, R., Reynoso-Rosales, V.-H., Watson, J. E. M., VanDerWal, J., Fuller, R. A., Pressey, R. L., & Possingham, H. P.** (2012). Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature Climate Change*, 2(6), 448–452.  
<https://doi.org/10.1038/nclimate1453>
- R Core Team.** (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.  
<https://www.R-project.org/>
- Schwab, N., Bürzle, B., Bobrowski, M., Böhner, J., Chaudhary, R. P., Scholten, T., Weidinger, J., & Schickhoff, U.** (2022). Predictors of the success of natural regeneration in a Himalayan treeline ecotone. *Forests*, 13(3), 454.  
<https://doi.org/10.3390/f13030454>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L.** (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259.  
<https://doi.org/10.3390/plants10020259>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.** (30 de diciembre de 2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo*. Diario Oficial de la Federación. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>
- Tarone, R. E., & Ware, J.** (1977). On distribution-free tests for equality of survival distributions. *Biometrika*, 64(1), 156–160. <https://doi.org/10.1093/biomet/64.1.156>
- Therneau, T. M.** (2024). *A package for survival analysis in R* (Version 3.7-0) [Paquete de R]. CRAN. <https://cran.r-project.org/web/packages/survival/>
- Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J.** (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Vila, H. F.** (2011). *Regulación de la hidratación y la turgencia foliares por mecanismos evitadores del estrés, y resistencia a déficit hídrico en vid: Modelo vs. experimentos* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Cuyo]. [bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/4367/vila-regulacionhidratacion.pdf](bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/4367/vila-regulacionhidratacion.pdf)
- Will, R. E., Wilson, S. M., Zou, C. B., & Hennessey, T. C.** (2013). Increased vapor pressure deficit due to higher temperature leads to greater transpiration and faster mortality during drought for tree seedlings common to the forest–grassland ecotone. *New Phytologist*, 200(2), 366–374. <https://doi.org/10.1111/nph.12321>
- Wood, K. E. A., Kobe, R. K., & McCarthy-Neumann, S.** (2023). Tree seedling shade tolerance arises from interactions with microbes and is mediated by functional traits. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, Article 1224540. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1224540>

## Anexos

A)



B)



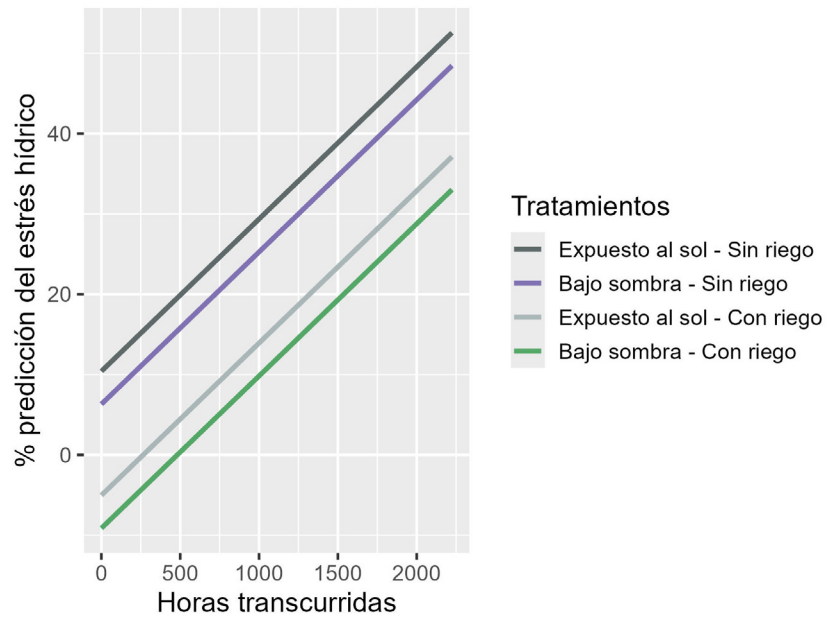
C)



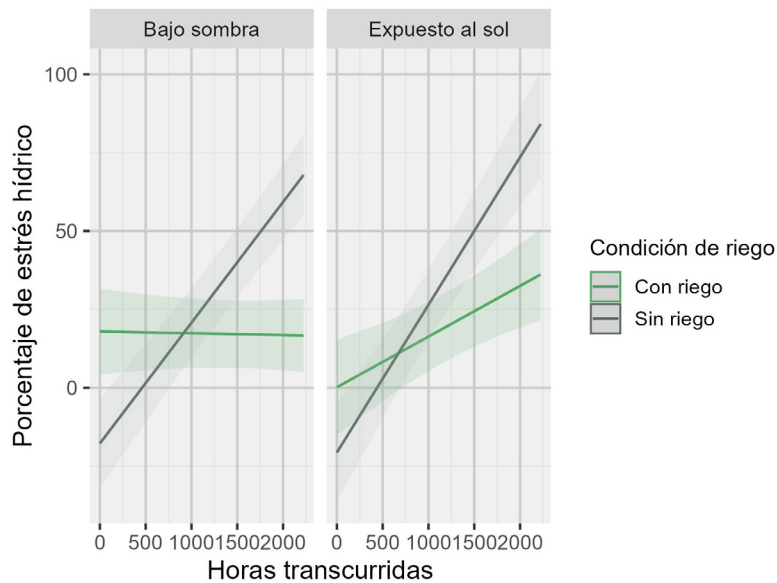
D)



**Anexo 1.** Ilustración de la decoloración progresiva del follaje de plántulas de *Abies hickelii*, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. La [figura A](#) muestra una planta sin coloración parda, mientras que en las [figuras B y C](#) la decoloración aumenta progresivamente hasta alcanzar su máxima intensidad en la [figura D](#).



**Anexo 2.** Predicción del índice de marchitez en un modelo lineal mixto para plántulas de *Abies hickelii* en función de las horas transcurridas bajo cuatro tratamientos combinados de luz (expuesto al sol o bajo sombra) y riego (con riego o sin riego). Las líneas muestran los valores predichos por el modelo para cada tratamiento.



**Anexo 3.** Predicción del modelo lineal mixto del índice de marchitez en plántulas de *Abies hickelii* mostrando la interacción entre las horas transcurridas, la condición de luz (bajo sombra y expuesta al sol) y la condición de riego (con riego y sin riego). Las líneas representan los valores predichos y las áreas sombreadas indican los intervalos de confianza del 95 %.

