2025 | 16·20
GIJÓN | JUNIO
9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1498

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025**.
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza

Metodología cuantitativa para la elección de procedencias de *Pinus halepensis* en actividades de reforestación bajo cambio climático

AMEZTEGUI, A. (1,2), VOLTAS, J. (1,2), TORNÉ, G. (1), FONTOVA-MUSTÉ, A. (1); BLANCO-CANO, L. (3), DEL CAMPO, A. (3), MARTÍN-ALCÓN, S. (4), VICENTE-VALERO, L (5), JORDÁN, E (5)

1. Universitat de Lleida. Departamento de Ciencia e Ingeniería Forestal y Agrícola. Adaptive Management and Forest Dynamics Research Group (*ADAPTAFOR*)
2. Unidad Conjunta de Investigación CTFC – AGROTECNIO – CERCA
3. Universitat Politècnica de València. ETS Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Dep. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente. Re-ForeST
4. Agresta S. Coop
5. Ingeniería del Entorno Natural (IDEN)

Resumen

En un contexto de cambio climático que supera la capacidad de respuesta de numerosas especies es fundamental facilitar su capacidad de adaptación futura. En programas de repoblación o restauración ecológica, el uso de poblaciones complementarias a la procedencia local supone una herramienta interesante para tratar de asegurar una correcta adaptación de los materiales empleados a las condiciones climáticas venideras. Sin embargo, esta aproximación, que se incluye en un contexto amplio de migración asistida, requiere una cuidadosa elección de los materiales más idóneos para las condiciones climáticas previstas en el lugar de plantación. Se presenta aquí una metodología para la evaluación cuantitativa y elección de regiones de procedencia adaptadas a condiciones futuras. Dicha evaluación se basa en el cálculo de la disimilaridad entre las condiciones bioclimáticas actuales de la región de procedencia y el clima futuro del sitio de plantación, calculada a partir de 11 indicadores derivados de la clasificación bioclimática de Allué. La metodología se ilustra a partir de los resultados obtenidos para 12 sitios experimentales distribuidos por todo el rango de distribución de *Pinus halepensis* en España, desde Cataluña a Murcia, y dos escenarios climáticos, y se discuten las implicaciones derivadas de esta metodología y su aplicabilidad en proyectos de restauración ecológica.

Palabras clave

Regiones de procedencia, restauración, migración asistida, escenarios de cambio climático, pino carrasco, Life Adapt-Aleppo

1. Introducción

La ley de Restauración de la Naturaleza de la Unión Europea, aprobada el 17 de junio de 2024, establece medidas para restaurar al menos el 20 % de las zonas terrestres y marítimas de la UE de aquí a 2030. Estas restauraciones a menudo pasarán por el complemento o instalación de arbolado, sobre todo en aquellas zonas degradadas por factores como los incendios forestales y en las que la regeneración no se ha producido de manera exitosa. Por todo ello, se espera que el número de repoblaciones de carácter protector, que ya suponen el 70% de las que se realizan en España (VADELL, 2021), continúe incrementándose en los próximos años.

El correcto uso y selección del material forestal de reproducción resulta determinante en el éxito de las iniciativas de reforestación. Durante las últimas décadas, en las repoblaciones de carácter protector se ha priorizado el uso de las poblaciones locales y se han empleado especies autóctonas del sitio a restaurar, bajo el supuesto que dicho material está adaptado a las particularidades climáticas de la zona de plantación, y por lo tanto presentará una mejor adaptación y una mayor capacidad de éxito futuro (BROADHURST et al. 2008). Dicho supuesto subyace al concepto de región de procedencia, al constatarse que las especies con un rango de distribución amplio suelen presentar adaptaciones locales y presentan poblaciones con diferentes óptimos climáticos dentro de sus rangos de distribución actuales (VOLTAS et al. 2018). El uso de la región de procedencia local se ha promovido en la normativa que lo regula (RD 289/2003 sobre comercialización del material forestal de reproducción), estableciéndose el uso de la fuente local si no se dispone de información que justifique el uso de otro material alternativo.

Sin embargo, en un contexto actual de cambio climático cuya velocidad supera con creces a la capacidad de las especies para adaptarse o migrar (JUMP et al. 2009), es necesario modificar las estrategias de gestión y uso de fuentes de semilla para garantizar que los bosques se adapten a los climas futuros (WESSELY et al. 2024). En la actualidad, comienza a ser habitual que en el sector se abogue por el uso de una procedencia alternativa a la local, o bien de una mezcla de procedencias que permita maximizar las posibilidades de éxito de la repoblación, evitando en este último caso caer en los riesgos derivados de usar material ajeno al lugar de plantación bajo condiciones climáticas futuras inciertas. Estas iniciativas, que se enmarcan en el llamado “provenancing”, optan por diversas aproximaciones que van desde la mezcla de material procedente de diversas poblaciones siguiendo un gradiente geográfico (*composite provenancing*; BROADHURST et al. 2008), el uso de una amplia selección de genotipos representativos de la especie (*admixture provenancing*; BREED et al. 2013), o el uso de procedencias que presumiblemente respondan de manera adecuada a las condiciones proyectadas (*predictive provenancing;* WANG et al. 2010 o c*limate-adjusted provenancing*; PROBER et al. 2015).

Estas aproximaciones entrarían dentro de lo que se denomina “migración asistida”, que ha ganado atención recientemente como estrategia de adaptación al cambio climático (WILLIAMS & DUMROESE, 2013). Podemos definir la migración asistida, o migración facilitada, como el movimiento asistido por el ser humano de entidades biológicas (semillas u otros propágulos) desde una región donde su supervivencia está mayormente amenazada por el cambio climático a una región donde podrían sobrevivir y mantener los servicios ecosistémicos bajo los climas actuales y futuros esperados (DALRYMPLE et al. 2021). A pesar de ser una técnica de adaptación al cambio climático de alto interés, presenta riesgos obvios (AUBIN et al., 2011) y desde hace años se ha enfatizado la necesidad de analizar las respuestas del material forestal de reproducción a las condiciones ambientales esperadas a fin de desarrollar políticas de reforestación más efectivas.

Entre los sistemas más habituales para validar la utilidad de los materiales de reproducción están los ensayos de procedencias y/o progenies, cuyos resultados pueden ayudar en la elección de utilización de un determinado material en un determinado lugar (REF).Alternativamente, en el caso de España se han establecido homologaciones ecológicas entre zonas de recolección y zonas de utilización de los materiales de reproducción para especies forestales de especial interés. Sin embargo, ninguna de estas aproximaciones considera de manera explícita los

diferentes escenarios de cambio climático en las zonas de plantación. No en vano el Plan Nacional de Mejora Genética Forestal 2022-2031 plantea la actualización de la información sobre las recomendaciones de uso de los materiales forestales de reproducción (VOLTAS 2023).

En este trabajo presentamos una metodología cuantitativa para el apoyo a la elección de materiales forestales de reproducción potencialmente adaptados a las condiciones climáticas futuras. Esta metodología aprovecha la definición de regiones de procedencia existente en la legislación española y europea, así como la caracterización bioclimática que se realizó para cada una de ellas, y las compara con los últimos modelos climáticos regionales, para establecer la idoneidad potencial de cada una de las regiones de procedencia en función de escenarios climáticos futuros. Se presenta la metodología y un ejemplo de aplicación a 12 rodales de repoblación con diferentes procedencias de *Pinus halepensis*, establecidos en el marco del proyecto Life Adapt-Aleppo. Con este trabajo pretendemos ofrecer una herramienta que pueda servir para seleccionar materiales forestales de reproducción en actividades de restauración en un contexto de cambio climático.

2. Objetivos

El trabajo presenta los siguientes objetivos:

1. Desarrollar una metodología cuantitativa de elección de procedencias de *Pinus halepensis* en función del clima actual de cada una de las regiones de procedencia y el clima esperado en el futuro en el lugar de plantación.
2. Aplicar esta metodología a una serie de plantaciones experimentales realizadas en el marco del proyecto Life Adapt-Aleppo.
3. Evaluar la oportunidad de la metodología presentada mediante el análisis de sus resultados a corto plazo.

3. Metodología3.1 Área de estudio y diseños de plantación

El área de estudio cubre la mayor parte del área de distribución de los bosques ibéricos de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.), que constituyen el subtipo 42.841 del Hábitat 9540 de la Directiva Hábitats, Anexo I. En concreto se seleccionaron 12 parcelas demostrativas distribuidas en 5 provincias y 4 Comunidades Autónomas, y que constituyen parte de los rodales demostrativos del proyecto Life Adapt-Aleppo (LIFE20 CCA/ES/001809) (Figura 1).

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL
2025 | 16-20 GIJÓN | JUNIO

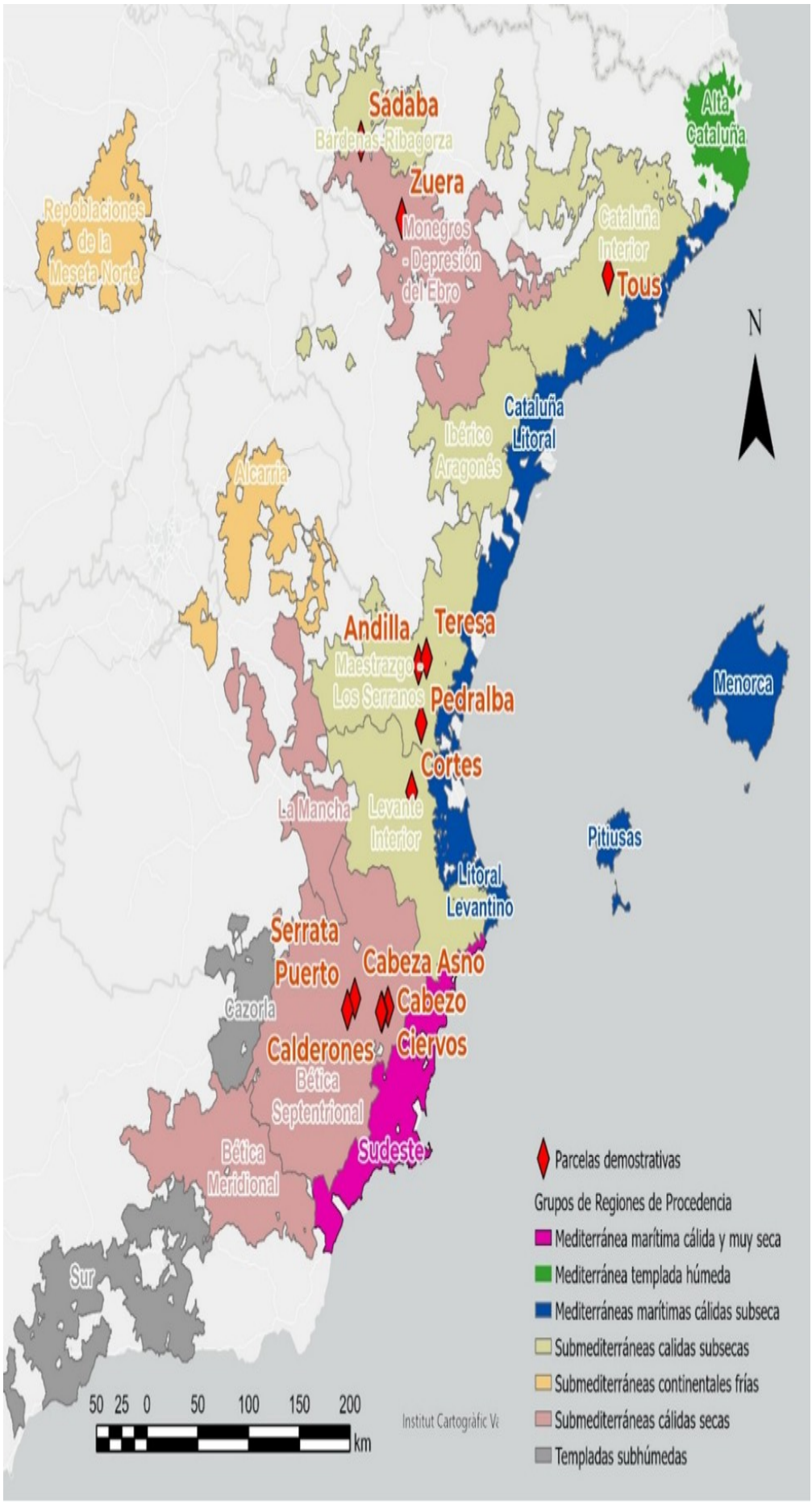

Figura 1. Ubicación de los rodales demostrativos (diamantes rojos) y de las regiones de procedencia definidas en España para Pinus halepensis

Las zonas seleccionadas para el estudio eran fundamentalmente rodales dentro del área de distribución de *Pinus halepensis* – con baja pedregosidad y pendiente para permitir las tareas de plantación – pero con escasa vegetación; o bien rodales que en su momento habían albergado masas de pino carrasco pero que habían sido afectadas por perturbaciones (fundamentalmente incendios) y presentaban procesos de degradación o falta de regeneración. En dos casos (Calderones Pila y Enmedio Pila), sin embargo, la plantación se hizo en rodales ubicados dentro de masas de avanzada edad de *Pinus halepensis* con regeneración natural muy deficitaria, plantando de manera aleatoria las plantas de diferentes procedencias en oquedades naturales en la masa. La superficie total plantada fueron 59,8 hectáreas, con densidades variables entre los 600 y 1200 pies por hectárea – a excepción de los dos rodales mencionados (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación, superficie y densidad de los rodales seleccionados para las plantaciones de restauración de Pinus halepensis con procedencias seleccionadas por su adaptación al clima futuro.

Rodal	Monte o Finca	Municipio	(Provincia)	Superficie	(ha)	Densidad	(pies/ha)
6,19				798			
2,21				808			
2,29				744			
2,33				645			
2,60				464			
2,03				702			
1,95				732			
2,23				636			
1,08				1317			
17,92				51			
16,91				64			
2,10				607			

3.2 Caracterización bioclimática de las regiones de procedencia de *Pinus halepensis*

La Dirección General para la Conservación de la Naturaleza (DGCONA) estableció, en los años 90, una serie de regiones de procedencia para las principales especies forestales españolas. Se entiende como región de procedencia (RP) “el territorio o conjuntos de territorios sometidos a condiciones ecológicas prácticamente uniformes y en los que hay poblaciones que presentan características fenotípicas o

genotípicas análogas". En el caso de *Pinus halepensis*, las RRPP se definieron en base a la variación de los caracteres ambientales del territorio de la especie, asumiendo una correlación entre la variación ecológica y genética (GIL et al. 1996). Finalmente se crearon 18 regiones de procedencia (Figura 1) definidas principalmente en base a la clasificación fitoclimática de ALLUÉ (1990). Dicha clasificación incluye un conjunto de 14 variables climáticas, dando especial importancia a variables asociadas a extremos del clima (periodo de sequía, período de heladas…) por su carácter limitante para la distribución de las especies (Tabla 2).

Tabla 2. Variables incluidas en la caracterización fitoclimática de Allué (1990).

Abreviatura	Descripción	Unidades
T		ºC
Tm		ºC
TM		ºC
Tmm		ºC
TMM		ºC
F		ºC
C		ºC
osc		ºC
hs		meses
hp		meses
p		mm
pe		mm
	k	
a		Meses

La memoria descriptiva de la metodología seguida para la determinación de las RRPP (GIL et al, 1996) incluye una descripción de cada una de ellas, proporcionando no sólo valores fitoclimáticos medios, sino también mínimos y máximos de cada una de las variables de Allué para cada región de procedencia. Esta información se extrajo del citado documento, utilizándose para definir el clima que caracteriza las condiciones de crecimiento de cada una de las regiones, y por tanto, el clima al que las poblaciones sitas en cada una de las RRPP deberían estar adaptadas (Tabla 3).

Tabla 3. Valores máximos y mínimos de las variables fitoclimáticas de Allué (1990) para cada una de las regiones de procedencia definidas para Pinus halepensis.

REGIÓN DE PROC.	T	TM	Tm	Tmm	TMM	F	C	osc	hs	hp	p	pe	k	a
16.2	10	23.6	6.3	30	-6	40	11.5	5	740	43	0.29		2.75	
15	7.1	23.3	1.5	27	-11.6	33	7.1	2	506	15	0.01		0.5	
18.7	9.4	25.2	5.3	31	-6	38.9	12.1	2	5	744	30	0.3	4.5	
12.6	5.1	21.1	-0.4	26	-15	34.6	7.1	3	455	11	0.01		1.0	
14.7	5.4	24.3	1.2	32	-5.6	41.5	13.1	3	6	800	55	0.18	2.5	
11.4	3.1	21	-2.9	25	-18	32.7	8.6	4	539	14		0.0		
14.4	6.3	24.6	0.9	34	-10	45	14.9	4	6	859	53	0.28	3.0	
11.9	2.6	21.9	-4.4	30	-20.2	38.1	11.4	4	420	16		0.0		
17	8.3	27.5	4.4	32	-8	44.5	14.2	2	6	493	23	1.09	5.75	
12.2	3.7	21.8	-1.3	29	-22.4	38.2	8	3	367	17	0.12		2.0	
14.8	7.1	25.4	3.1	33	-8	44	13.7	8	458	21	1.21		4.0	
13.1	5	20.4	1	28	-20.1	39.2	10.1	5	340	12	0.26		2.5	
14.3	5.3	25.1	0.6	35	-12	43.6	15.4	2	8	628	15	0.42	3.64	
13.3	4.4	23.8	-1.4	31	-14	40	10.9	6	447	8	0.11		2.25	
14.3	5.3	26.2	0.9	34	-15	45	15.9	3	6	508	11	0.58	5.0	
12.6	3.4	23.3	-22	32	-18.5	41	11.2	5	393	6	0.22		3.0	
17.6	10.6	26	4.7	34	-4.4	44	16.3	3	6	637	34	1.1	6.0	

12.3	3.2	22.5	-2.9	29	-14.5	37.7	7.5	3	407	7	0.06	1.5	
17.1	10	27.1	7.2	34	-7	47	16.6	5	569	23	0.6	4.25	
13	6	19.5	1.3	29	-12	41	6.8	1	447	5	0.07	1.75	
19.4	11.4	29.1	7.2	37	-2	46	13.8	4	736	14	1.09	6.25	
16.4	8.4	24.1	5	29	-9	35	7.1	425	4	0.16		2.75	
18.7	11.8	25.9	9.8	30	2	36.7	7.8	2	447	8	1.09	6.5	
17.5	11.1	25.2	7.4	28	-3	32.6	3.9	408	3	0.82		4.51	
19.6	12.2	27.8	7.5	33	-2.5	44.5	12.1	4	355	7	11.75	7.25	
17.5	9.9	25.5	4.4	30	-8	38.5	7.4	1	273	1	1.6	4.5	
17	8.7	27.1	4.4	34	-7	46	13.9	7	443	12	6.42	6.25	
13	3.5	23.5	1	31	-10.2	39	10.2	3	277	5	0.42	3.75	
15.8	7.1	26.6	2.3	36	-9	45	14.7	6	788	8	0.53	4.5	
12.5	3.7	23	0.8	28	-12	39	7.3	5	396	0.14		3.25	
16.6	7.3	27.7	2.8	36	-9	43.5	15.9	5	5	837	8	0.31	3.75
11.4	3	21.2	-4.1	31	-16	37	8.7	3	639	3	0.11	2.75	
20	14.4	27	10.9	33	4	47	12.4	5	1214	2	0.71	5.75	
14.3	7.3	23.5	2.8	27	-11	37	5.5	448	0.23			3.25	
17.3	10.6	24.9	6.9	30	0.2	39	9.2	2	653	8	0.83	4.75	

16.6	9.9	24.5	6.1	28	-7.8	37	7.2	437	3	0.25		3.5	
17.7	10.3	25	7.4	29	-2.1	36.8	8.4	2	637	4	0.34		4.5
16.2	8.7	24.3	4.5	28	-5	34.3	6.9	1	609	2	0.26		3.75

3.3 Clima futuro en los lugares de plantación según escenarios climáticos

Para cada una de las parcelas de estudio se descargaron las predicciones climáticas elaboradas por el CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Projects 6) y que representan la base del último *Assessment Report* del Panel Intergubernamental para al Cambio Climático (IPCC). Los datos se descargaron del portal WorldClim (https://www.worldclim.org/), que ofrece una resolución de 30 segundos de grado y para periodos de 20 años (FICK y HIJMANS, 2017). En concreto se descargaron los datos mensuales de temperatura media de las mínimas, temperatura media de las máximas y precipitación para el periodo 2040-2060 y de acuerdo con dos escenarios climáticos, definidos según las trayectorias socioeconómicas comunes (shared socioeconomic pathways) ssp245 y ssp585. La trayectoria ssp245 representa la trayectoria media de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero, en un escenario que presupone la adopción de medidas de protección del clima. Por el contrario, la trayectoria ssp585 representa el límite superior de la gama de escenarios descritos en la literatura. Aunque WorldClim ofrece datos para 14 modelos generales de circulación (GCMs) diferentes, se consideró que el nivel de detalle necesario no exigía la descarga y comparación de diferentes modelos, por lo que se descargaron los datos para el modelo CMCC-ESM2.

Los valores mensuales de temperatura media de las mínimas y media de las máximas, así como de precipitación, se obtuvieron para cada parcela de estudio extrayendo los datos de los ráster descargados de WorldClim, y se utilizaron para calcular los indicadores fitoclimáticos de Allué. La información disponible en WorldClim no permitió sin embargo calcular la temperatura máxima y mínima absoluta mensual – que requieren de resolución temporal diaria – y por lo tanto, tampoco el periodo de heladas probables. Estas tres variables se excluyeron por tanto de posteriores análisis.

3.4 Cálculo de la disimilaridad entre el clima futuro de la zona de estudio y el clima propio de cada región de procedencia

Para cada parcela de estudio se comparó el clima previsto para cada uno de los escenarios climáticos con los valores que caracterizan cada una de las regiones de procedencia en la actualidad. Dicha comparación se realizó de dos maneras:

- **Semicuantitativa**: se determinó, para cada uno de los indicadores bioclimáticos, si el valor del indicador en el escenario climático futuro estaba dentro del rango de valores (es decir, entre el valor mínimo y máximo) del indicador para cada una de las regiones de procedencia. Si era así se le asignaba un valor de 1, y si no, de 0. Finalmente se sumaban los valores obtenidos por cada RP, de manera que una RP con valor de 11 implicaba que todos los valores previstos para los indicadores en la parcela de estudio se encuentran dentro del rango actual para la región de procedencia. Por otro lado, un valor de 0 indicaría que ninguno de los indicadores estaría dentro del rango.
- **Cuantitativa**: se calculó la similaridad entre el valor de los indicadores previsto para la parcela de estudio y el valor medio actual en cada región de procedencia. En lugar de calcular la diferencia entre los valores indicador a indicador se optó por calcular la distancia de Gower, que es un

indicador multidimensional que calcula cómo de diferentes son pares de observaciones en base a un conjunto de variables. Esto permite considerar todos los indicadores de manera conjunta, y además presenta la ventaja de permitir el uso de variables de distinto tipo y dimensión, sin necesidad de escalar previamente los valores. Un menor valor de distancia de Gower entre una parcela de estudio y una RP indicará que las condiciones climáticas esperadas en el lugar de plantación son similares a las que la RP presenta actualmente. Al contrario, un valor alto de distancia de Gower indicará una baja similaridad entre las condiciones esperadas en el área de plantación y las presentes en la RP.

3.5 Selección de las procedencias a utilizar en cada lugar de plantación

En base a los resultados del apartado previo se seleccionaron, para cada lugar de plantación, 6 regiones de procedencia, según lo especificado en los protocolos de actuación del proyecto Life Adapt-Aleppo. Una de las RRPP corresponde a la procedencia local, y una segunda procedencia representaría las condiciones climáticas más parecidas a las actuales, descontando la mencionada procedencia local. Dos procedencias adicionales se seleccionaron como las más próximas a las condiciones climáticas esperadas en el área de estudio bajo el escenario ssp245, y finalmente se seleccionaron dos procedencias más según el clima esperado bajo un escenario ssp585. Estas seis procedencias, que serán diferentes para cada área de estudio, se plantaron de acuerdo con las especificaciones técnicas definidas en el proyecto (ver apartado 3.1) entre diciembre de 2022 y febrero de 2024.

3.6 Determinación del éxito de cada RP según su disimilaridad climática

Para determinar el papel de la disimilaridad climática en el éxito de las plantaciones a corto plazo se analizó la tasa de supervivencia de cada RP tras el primer verano posterior a la plantación en comparación con la disimilaridad climática de dicha RP en el lugar de plantación, calculada mediante la distancia de Gower según lo indicado en el apartado 3.4. Para este análisis se tuvo que prescindir de las parcelas de Sádaba, Teresa y Zuera por no disponerse aún de tasas de supervivencia post-verano. Se analizó el papel de la distancia de Gower como predictor de la supervivencia mediante modelos lineales.

4. Resultados

a. Escenarios climáticos en las parcelas de estudio

El escenario climático ssp245 pronosticó aumentos medios de 2.3ºC en la temperatura media de las parcelas de estudio (Tabla 4), si bien el aumento fue aún mayor, de hasta 3.1ºC en las temperaturas máximas (TM y TMM), lo que a su vez conllevó a un aumento de la oscilación térmica. Este escenario predijo reducciones muy leves de la precipitación (alrededor del 3%), si bien las precipitaciones estivales se redujeron en mayor medida (entre un 6% y un 10%) lo que, unido a la mayor temperatura, condujo a un aumento tanto de la duración (+50%) como de la intensidad (+136%) de la sequía prevista. Los cambios fueron aún mayores bajo el escenario ssp585, con subidas de la temperatura media anual de 2.6ºC, y de las máximas de 4.3ºC. Este escenario predijo disminuciones de la precipitación estival mucho más importantes, de entre el 15 y el 30%, incrementando de media un 60% la duración de las sequías estivales, que en algunos rodales llegaron a los 7 meses. Cabe destacar que la subida de las temperaturas mínimas resultó en una desaparición del periodo de heladas seguras para ambos escenarios (Tabla 4).

Tabla 4. Variables bioclimáticas de cada una de las parcelas de estudio según los escenarios de emisiones SSP245 y SSP585

Rodal	SSP	T	Tm	TM	Tmm	TMM	osc	hs	p	pe	k	a
245	14.51	6.75	24.50	2.5	30.4	17.75	674	28	0.06		2	
585	14.77	6.40	25.35	2.1	31.6	18.95	632	24	0.11		2	
245	15.97	7.60	26.05	3.5	33.2	18.45	497	25	0.37		4	
585	16.16	7.20	27.20	3.1	35.5	20.00	476	21	0.50		4	
245	17.86	8.70	28.40	4.1	35.9	19.70	356	16	3.07		6	
585	18.14	8.35	29.85	3.8	38.1	21.50	336	12	4.27		6	
245	14.29	6.15	24.60	0.7	32.8	18.45	412	22	0.42		3	
585	14.55	5.90	25.65	0.5	34.3	19.75	386	18	0.66		4	
245	14.71	6.80	24.90	1.4	32.8	18.10	403	21	0.53		4	
585	14.98	6.55	25.95	1.2	34.2	19.40	379	17	0.80		4	
245	16.14	7.85	26.60	3.1	33.7	18.75	372	13	1.19		4	
585	16.44	7.65	27.60	2.9	34.8	19.95	347	11	1.71		4	
245	17.40	9.70	27.20	4.8	33.6	17.50	372	12	1.73		4	
585	17.67	9.55	28.15	4.7	34.7	18.60	350	10	2.48		4	
245	18.37	10.10	28.65	4.7	35.8	18.55	306	6	5.75		7	
585	18.70	9.90	29.50	4.5	36.8	19.60	286	5	9.14		8	
245	18.67	10.65	28.70	5.3	35.5	18.05	308	6	6.69		7	

585	19.00	10.50	29.55	5.2	36.5	19.05	289	5	10.94	8
245	16.50	8.15	27.20	2.9	34.6	19.05	359	8	1.41	4
585	16.82	7.95	28.05	2.7	35.8	20.10	337	8	1.90	5
245	18.38	9.85	28.85	4.2	36.5	19.00	311	7	4.83	7
585	18.72	9.70	29.70	4.1	37.7	20.00	291	6	7.51	8

4.

a. **Disimilaridad entre los escenarios climáticos y las regiones de procedencia**

El análisis semicuantitativo de la correspondencia entre el clima previsto en cada lugar de plantación y los valores de las regiones de procedencia reveló que ninguna de las RP cumplía con los 11 indicadores analizados, y que muchas de las RP cumplían con tan solo unos pocos indicadores, revelando las importantes diferencias en clima entre regiones (Figura 2). Incluso bajo el escenario ssp245 la región que cumplía con más indicadores raramente correspondía con la procedencia local del lugar de plantación, lo que indica un desplazamiento importante de los rangos bioclimáticos incluso para el escenario más moderado. Las RP propias del Levante y las Béticas septentrionales sugirieron una alta plasticidad, ya que de media cumplieron con más indicadores, y presentaban un encaje relativamente adecuado para todas las plantaciones, incluso aquellas geográficamente más alejadas. En cambio, otras RP (por ejemplo, las propias de Baleares o Cataluña Interior) mostraron un rango climático mucho más específico, ya que apenas coincidían en un indicador con ninguna de las zonas de plantación.

	ALTA CATALUNYA	CATALUNYA LITORAL	CATALUNYA INTERIOR	BARDENAS - RIBAGORZA	IBÉRICO ARAGONÉS	MONEGROS - DEPESIÓN DEL EBRO	ALCARRIA	LA MANCHA	MAESTRAZGO - LOS SERRANOS	LEVANTE INTERIOR	LITORAL LEVANTINO	PITIUSAS	SUDESTE	BÉTICA SEPTENTRIONAL NORTE	BÉTICA SEPTENTRIONAL CENTRO	BÉTICA SEPTENTRIONAL SUR	BÉTICA MERIDIONAL	CAZORLA	SUR	MALLORCA Y CABRERA	MENORCA
Rodal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14A	14B	14C	15	16	17	18A	18B
Tous	6	**10**	6	7	7	6	2	2	2	7	4	1	2	5	5	6	6	6	5	3	2
Sádaba	5	7	2	4	7	4	4	6	6	**9**	6	1	3	7	7	**9**	6	4	**9**	4	2
Zuera	4	5	2	2	2	3	1	1	1	4	**6**	3	4	**6**	3	4	1	2	4	1	2
Teresa	2	7	2	8	**9**	8	5	8	8	8	5	2	2	7	8	**9**	7	7	4	3	2
Andilla	2	7	2	3	9	**10**	3	6	5	9	5	1	2	9	9	9	8	6	6	4	3
Cortes	4	6	1	2	7	6	3	3	3	8	5	1	2	**9**	5	**9**	4	4	6	2	2
Pedralba	3	5	1	2	4	4	3	3	3	6	**7**	1	4	6	3	6	3	3	5	2	5
Cabeza Asno	2	3	1	1	1	1	1	2	2	3	6	3	**8**	4	2	3	3	3	4	3	3
Cabezo Ciervos	2	3	1	1	1	1	1	2	2	3	7	3	**8**	3	2	3	3	3	4	2	2
Pila	3	5	1	1	6	4	3	3	3	6	6	2	2	**8**	5	**8**	4	5	5	3	3
Serrata Puerto	3	3	1	1	2	1	1	2	2	4	**6**	3	**6**	5	3	3	2	2	4	2	2

Figura 2. Análisis semicuantitativo de la correspondencia entre el clima previsto en los lugares de plantación bajo el escenario ssp245 y el rango climático de las regiones de procedencia de Pinus halepensis

Los valores de distancia de Gower entre los valores bioclimáticos actuales para las RRPP y los esperados en las zonas de estudio mostraron patrones similares a los del análisis semicuantitativo, si bien el hecho de considerar no solamente si una variable está dentro de un rango, sino también su distancia al mismo hizo que algunas RP mostraran patrones diferentes (Figura 3). Por ejemplo, las procedencias del tercio norte peninsular mostraron una distancia baja respecto al clima previsto en las parcelas de Tous (Barcelona) y Sádaba (Zaragoza), mientras que las parcelas de Murcia mostraron una mayor similaridad con las RRPP del sudeste (Sudeste y Bética Septentrional). Por otro lado, las parcelas ubicadas en la provincia de Valencia mostraron una similaridad grande con un rango mayor de RRPP, incluyendo algunas geográficamente distantes.

	ALTA CATALUNYA	CATALUNYA LITORAL	CATALUNYA INTERIOR	BARDENAS - RIBAGORZA	IBÉRICO ARAGONÉS	MONEGROS - DEPESIÓN DEL EBRO	ALCARRIA	LA MANCHA	MAESTRAZGO - LOS SERRANOS	LEVANTE INTERIOR	LITORAL LEVANTINO	PITIUSAS	SUDESTE	BÉTICA SEPTENTRIONAL NORTE	BÉTICA SEPTENTRIONAL CENTRO	BÉTICA SEPTENTRIONAL SUR	BÉTICA MERIDIONAL	CAZORLA	SUR	MALLORCA Y CABRERA	MENORCA
Rodal	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14A**	**14B**	**14C**	**15**	**16**	**17**	**18A**	**18B**
Tous	**0,16**	0,20	0,25	0,24	0,20	0,19	0,23	0,36	0,20	0,19	0,33	0,43	0,51	0,29	0,21	0,27	0,21	0,30	0,33	0,30	0,29
Sádaba	0,25	0,26	0,42	0,37	0,21	0,24	0,25	0,31	0,21	**0,17**	0,21	0,34	0,38	0,22	0,19	0,25	0,22	0,35	0,32	0,26	0,28
Zuera	0,46	0,47	0,65	0,60	0,39	0,38	0,44	0,48	0,42	0,35	0,26	0,35	0,28	**0,26**	0,35	0,41	0,41	0,53	0,41	0,37	0,40
Teresa	0,27	0,25	0,34	0,29	0,14	**0,13**	0,16	0,24	0,18	0,17	0,31	0,40	0,45	0,19	0,14	0,20	0,17	0,27	0,39	0,32	0,33
Andilla	0,28	0,25	0,38	0,33	0,13	0,15	0,19	0,24	0,16	0,17	0,26	0,36	0,41	0,16	**0,12**	0,18	0,17	0,30	0,35	0,28	0,30
Pedralba	0,36	0,38	0,56	0,51	0,30	0,29	0,32	0,37	0,32	0,24	**0,15**	0,26	0,25	0,22	0,23	0,29	0,30	0,42	0,29	0,23	0,26
Cortes	0,33	0,32	0,50	0,45	0,24	0,23	0,27	0,31	0,26	0,20	0,20	0,31	0,31	**0,18**	0,18	0,24	0,24	0,36	0,32	0,27	0,29
Cabeza Asno	0,57	0,58	0,77	0,71	0,51	0,50	0,52	0,55	0,53	0,45	0,30	0,36	**0,19**	0,32	0,42	0,46	0,47	0,59	0,43	0,39	0,43
Cabezo Ciervos	0,59	0,60	0,79	0,74	0,53	0,52	0,55	0,57	0,55	0,47	0,32	0,36	**0,16**	0,34	0,44	0,49	0,49	0,61	0,43	0,40	0,44
Pila	0,37	0,37	0,55	0,50	0,29	0,28	0,31	0,33	0,31	0,24	0,21	0,32	0,31	**0,19**	0,20	0,26	0,26	0,38	0,33	0,27	0,29
Serrata Puerto	0,56	0,57	0,76	0,71	0,50	0,49	0,52	0,54	0,52	0,44	0,30	0,36	**0,22**	0,31	0,41	0,46	0,47	0,59	0,44	0,40	0,43
Promedio	**0,38**	**0,39**	**0,54**	**0,50**	**0,31**	**0,31**	**0,34**	**0,39**	**0,33**	**0,28**	**0,26**	**0,35**	**0,32**	**0,24**	**0,26**	**0,32**	**0,31**	**0,43**	**0,37**	**0,32**	**0,34**

Figura 3. Análisis cuantitativo de la correspondencia entre el clima previsto en los lugares de plantación bajo el escenario ssp245 y el clima actual de las regiones de procedencia de Pinus halepensis. Valores bajos indican una menor disimilaridad, es decir, una mayor correspondencia entre la parcela de estudio y la RP según la distancia de Gower.

En el caso del escenario severo los valores de distancia de Gower aumentaron considerablemente, y la procedencia Sudeste fue la más similar a numerosas de las parcelas de estudio. En el caso de las parcelas del tercio norte, mostraron una mayor adecuación esperada con procedencias más distantes geográficamente, como Levante Interior o incluso Béticas o Sudeste (Figura 4).

	ALTA CATALUNYA	CATALUNYA LITORAL	CATALUNYA INTERIOR	BARDENAS - RIBAGORZA	IBÉRICO ARAGONÉS	MONEGROS - DEPESIÓN DEL EBRO	ALCARRIA	LA MANCHA	MAESTRAZGO - LOS SERRANOS	LEVANTE INTERIOR	LITORAL LEVANTINO	PITIUSAS	SUDESTE	BÉTICA SEPTENTRIONAL NORTE	BÉTICA SEPTENTRIONAL CENTRO	BÉTICA SEPTENTRIONAL SUR	BÉTICA MERIDIONAL	CAZORLA	SUR	MALLORCA Y CABRERA	MENORCA
Rodal	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14A**	**14B**	**14C**	**15**	**16**	**17**	**18A**	**18B**
Tous	0,18	0,20	0,27	0,24	0,18	0,18	0,20	0,32	0,18	**0,17**	0,27	0,39	0,42	0,22	0,19	0,24	0,17	0,28	0,32	0,29	0,28
Sádaba	0,29	0,27	0,44	0,40	0,22	0,24	0,27	0,32	0,23	0,21	0,22	0,35	0,35	0,22	**0,20**	0,26	0,24	0,36	0,34	0,28	0,30
Zuera	0,47	0,48	0,66	0,62	0,42	0,41	0,44	0,49	0,44	0,36	0,29	0,36	**0,27**	0,28	0,35	0,42	0,42	0,54	0,43	0,39	0,41
Teresa	0,32	0,29	0,38	0,34	0,15	0,15	0,19	0,24	0,20	0,20	0,27	0,36	0,37	0,15	**0,15**	0,20	0,18	0,29	0,37	0,31	0,33
Andilla	0,30	0,28	0,40	0,36	0,17	0,16	0,21	0,26	0,19	0,18	0,25	0,34	0,34	**0,14**	0,14	0,20	0,19	0,31	0,35	0,29	0,31
Pedralba	0,37	0,39	0,56	0,52	0,33	0,31	0,34	0,38	0,35	0,26	**0,16**	0,27	0,22	0,21	0,25	0,31	0,31	0,43	0,30	0,24	0,27
Cortes	0,34	0,33	0,51	0,47	0,27	0,25	0,28	0,33	0,29	0,22	0,21	0,32	0,28	**0,17**	0,19	0,26	0,26	0,38	0,33	0,27	0,29
Cabeza Asno	0,56	0,58	0,76	0,72	0,52	0,50	0,54	0,57	0,54	0,46	0,33	0,38	**0,22**	0,36	0,43	0,48	0,48	0,60	0,45	0,40	0,43
Cabezo Ciervos	0,59	0,61	0,78	0,74	0,55	0,53	0,56	0,59	0,57	0,48	0,34	0,38	**0,22**	0,38	0,46	0,50	0,50	0,62	0,45	0,41	0,45
Pila	0,39	0,38	0,56	0,51	0,32	0,30	0,33	0,36	0,34	0,27	0,22	0,31	0,26	**0,18**	0,23	0,29	0,29	0,41	0,33	0,28	0,30
Serrata Puerto	0,56	0,57	0,75	0,71	0,51	0,50	0,53	0,56	0,53	0,45	0,33	0,38	**0,23**	0,35	0,42	0,47	0,47	0,59	0,45	0,41	0,43
Promedio	0,40	0,40	**0,55**	0,51	0,33	0,32	0,36	0,40	0,35	0,30	0,26	0,35	0,29	0,24	0,27	0,33	0,32	0,44	0,37	0,33	0,35

Figura 4. Análisis cuantitativo de la correspondencia entre el clima previsto en los lugares de plantación bajo el escenario ssp585 y el clima actual de las regiones de procedencia de Pinus halepensis. Valores bajos indican una menor disimilaridad, es decir, una mayor correspondencia entre la parcela de estudio y la RP según la distancia de Gower.

4.

a. **Papel de la disimilaridad climática en la supervivencia**

La disimilaridad climática entre la RP y el clima de la zona de estudio (medida a través de la distancia de Gower) resultó un predictor significativo de la tasa de supervivencia de las procedencias, de manera que la supervivencia fue mayor cuanto más similar fuera el clima de la RP al clima esperado en la zona de estudio (Figura 5). Dicho efecto se observó tanto para el escenario climático moderado como para el severo, si bien fue más fuerte en este último caso.

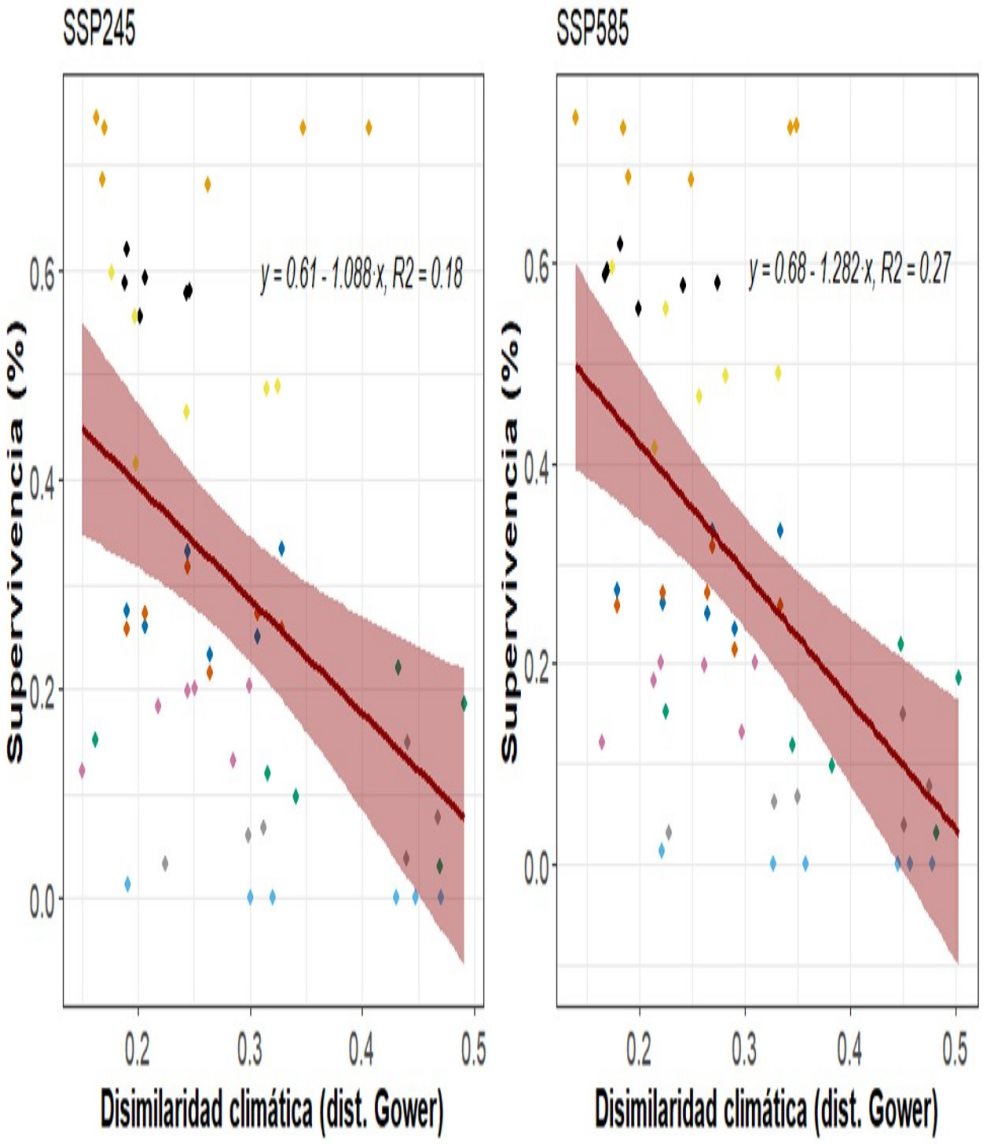

Figura 5. Relación entre la disimilaridad climática de las regiones de procedencia y su tasa de supervivencia tras el primer verano tras la plantación. Los diversos colores de los puntos corresponden a los diferentes lugares de plantación

5. **Discusión**Nuestros resultados, aunque preliminares, muestran una relación negativa entre la disimilaridad climática de la región de

procedencia utilizada y su tasa de supervivencia a corto plazo. Los modelos testados, aunque estadísticamente significativos, explican tan sólo entre el 18 y el 30% de la variabilidad en supervivencia, lo que resulta esperable teniendo en cuenta la multitud de factores que no se han tenido en cuenta en este análisis (calidad de planta, suelo, clima durante los meses posteriores a la plantación, método de ahoyado, etc.) y que pueden influir en el éxito de una repoblación (DEL CAMPO et al. 2021).A pesar de que observamos esta relación global entre la disimilaridad climática y la supervivencia, es interesante destacar que esta relación no se observó a nivel de cada lugar de plantación. Es decir, en cada parcela, las procedencias de clima menos similar al previsto en el lugar no necesariamente sobrevivieron menos que las más similares. En cambio, la supervivencia de una determinada región de procedencia sí resultó menor en aquellos lugares en los que el clima del lugar estaba más alejado del clima propio de la RP. Esto sugiere que las diferentes poblaciones tendrían diferencias genéticas basales en supervivencia, pero serían igualmente plásticas en adaptarse en función del ambiente, resultados que corroborarían algunas experiencias previas (VOLTAS et al. 2018).Debemos reconocer que la asociación entre la supervivencia y la disimilaridad climática puede resultar sorprendente, ya que esta última evalúa la asociación entre el clima actual de la región de procedencia y el esperado en el lugar de plantación en el futuro, mientras que la supervivencia del primer año se debe obviamente a las condiciones climáticas actuales, no las futuras. Sorprende también que la asociación observada sea más fuerte para las condiciones climáticas del escenario severo, en principio más alejadas de las actuales. En este sentido, cabe destacar que la caracterización bioclimática de las regiones de procedencia se realizó en los años 90, y es bien posible que las condiciones climáticas actuales en las regiones de procedencia presenten desviaciones importantes debido a los efectos del cambio climático, que en los últimos 10-20 años se han hecho evidentes. Por lo tanto, una actualización de dicha caracterización climática con valores más recientes podría ayudar a mejorar la metodología de elección de procedencias (VOLTAS, 2023). Además, algunas de las plantaciones se llevaron a cabo durante el invierno de 2022/2023, por lo que tuvieron que hacer frente a una primavera y verano excepcionalmente calurosos y secos en todo el arco mediterráneo, lo que probablemente situó los valores registrados muy cercanos a los previstos por los modelos climáticos para la mitad de siglo.Por otro lado, los datos de clima futuro proceden de la web WorldClim, que ofrece datos climáticos mensuales a resolución espacial de 30 segundos de grado. Aunque a priori esta resolución es suficiente para captar diferencias entre lugares de plantación, los valores proceden de modelos regionales que a menudo no han pasado por un filtro robusto de “downscaling” y corrección de sesgos (DE CÁCERES et al. 2018). El uso de predicciones climáticas más robustas podría también ayudar a mejorar los cálculos efectuados.

a. **Metodología de elección de regiones de procedencia**En este trabajo se ha desarrollado una metodología para elegir procedencias de pino carrasco en actividades de reforestación que pretendan buscar su adaptación al contexto climático futuro. Aunque esta iniciativa, así como la red de parcelas experimentales del proyecto Life Adapt-Aleppo, se enmarca en el contexto de la

migración asistida de poblaciones (DALRYMPLE et al. 2021), nuestra metodología no propone la sustitución completa de las plantas de procedencias locales por plantas procedentes de regiones con climas más áridos, ni tampoco supone un juicio de valor sobre la mejor estrategia para combinar diferentes orígenes de las plantas. Existe numerosa bibliografía en el que se valoran y debaten diferentes estrategias en el marco del "provenancing" (BROADHURST et al. 2008; BREED et al. 2013; PROBER et al. 2015). En este sentido, lo que ofrecemos es una metodología cuantitativa que puede ayudar a la toma de decisiones en cuanto al material a seleccionar, independientemente de la aproximación elegida.La metodología desarrollada se aplicó a 12 plantaciones experimentales ubicadas en un amplio gradiente geográfico, lo que permitió detectar algunos patrones dignos de mención. Por ejemplo, destaca que las procedencias con un rango climático más similar al previsto para el futuro no siempre correspondían con procedencias más meridionales. En muchos casos, sobre todo para el escenario moderado, las previsiones de cambio climático resultaron en una mayor aridez estival y/o una reducción del periodo de heladas, por lo que las procedencias seleccionadas a menudo eran las más termófilas o las más xéricas, sin que necesariamente fueren regiones ubicadas más al sur del lugar de plantación. En el caso del escenario severo, en cambio, las procedencias identificadas como más adecuadas si provenían en la mayor parte de los casos de regiones más meridionales, seguramente como resultado del incremento más acusado en las temperaturas máximas.La cuantificación de la disimilaridad entre las zonas de plantación y las RRPP también reveló la disparidad de rangos climáticos que presentan las diferentes regiones definidas. Así, algunas procedencias como las catalanas (Cataluña Interior, Cataluña Litoral o Alta Cataluña) o las baleares presentaron una correspondencia muy baja con la mayoría de los lugares de plantación. Del mismo modo, la procedencia Sudeste se correspondía muy bien con el clima esperado en la mayor parte de las plantaciones de Murcia, pero presentaba una gran distancia a los climas esperados en las parcelas del tercio norte (Aragón y Cataluña). Procedencias intermedias, como las levantinas (Levante Interior, Litoral levantino o Maestrazgo) presentaron en cambio una correspondencia mayor con parcelas ubicadas fuera de su ámbito territorial. Esto puede deberse a su situación geográfica intermedia entre las poblaciones de pino carrasco septentrionales y las meridionales, pero también parece responder a un rango bioclimático más amplio, que les podría conferir ventajas adaptativas (BLANCO-CANO et al., en revisión). Estudios previos ya han apuntado a que pueden existir importantes diferencias en plasticidad entre procedencias de pino carrasco (VOLTAS et al. 2018). En cualquier caso, habría que profundizar más en el comportamiento futuro de estas procedencias, para evaluar cómo difieren las diferentes poblaciones en términos de supervivencia y crecimiento durante los próximos años y detectar las interacciones genética-ambiente.

   b. **Relación entre la disimilaridad climática de las regiones de procedencia y supervivencia**

6. **Conclusiones**Aunque la plantación con procedencias no locales no es aún una práctica extendida en la actualidad, el contexto de cambio climático puede llevar a considerar el uso de plantas procedentes de zonas con clima más similar al esperado en el futuro. Este trabajo presenta una metodología para identificar, de manera cuantitativa, aquellas regiones de procedencia cuyo clima sea más similar al clima futuro previsto en los lugares de plantación. La metodología permite reducir la subjetividad en el proceso de elección de las regiones a utilizar, y es suficientemente general para poder utilizarse en cualquier ámbito geográfico, para cualquier especie de la que existan regiones de procedencia definidas, y para cualquier escenario climático definido. Además, se basa en información bioclimática ya existente y disponible en abierto, haciéndola accesible para todo tipo de trabajos de investigación y proyectos de índole técnica.Los resultados preliminares muestran una relación negativa entre la disimilaridad climática de la región de procedencia con el lugar de plantación y la tasa de supervivencia de dicha procedencia, sugiriendo que la metodología podría ser una herramienta interesante para aumentar las tasas de éxito en proyectos de restauración forestal. No obstante, fututos análisis con series de datos más largas podrán acabar de confirmar este extremo.
7. **Agradecimientos**Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea a través del proyecto Life Adapt-Aleppo (LIFE20CCA/ES00189). Los autores agradecen el trabajo de todo el personal implicado en la ejecución y monitorización de las plantaciones, en especial al Ministerio de Transición Ecológica y Forestal Catalana por la cesión de las semillas, y a los viveros de las administraciones públicas donde se ha producido la planta.
8. **Bibliografía**

ALLUÉ ANDRADE, J.L. (1990). Atlas Fitoclimático de España. INIA, Madrid, 223 pp.

AUBIN, I., GARBE, C.M., COLOMBO, S., DREVER, C.R., MCKENNEY, D.W., MESSIER, C., PEDLAR, J., SANER, M.A., VENIER, L., WELLSTEAD, A.M., WINDER, R., WITTEN, E., STE-MARIE, C., 2011. Why we disagree about assisted migration: Ethical implications of a key debate regarding the future of Canada's forests. For Chron 87, 755–765.

BLANCO-CANO, L., PÉREZ-ROMERO, J., VICENTE-VALERO, L., AMEZTEGUI, A., DEL CAMPO, A.D. (en revisión). Assessment of various assisted migration approaches to determine the highest performance in Pinus halepensis seed sources.

BREED, M.F., STEAD, M.G., OTTEWELL, K.M., GARDNER, M.G., LOWE, A.J., 2013. Which provenance and where? Seed sourcing strategies for revegetation in a changing environment. Conserv. Genet. 14, 1–10.

BROADHURST, L.M., LOWE, A., COATES, D.J., CUNNINGHAM, S.A., MCDONALD, M., VESK, P.A., YATES, C., 2008. Seed supply for broadscale restoration: maximizing evolutionary potential. Evol. Appl. 1, 587–597.

DECÁCERES, M., MARTIN-STPAUL, N., TURCO, M., CABON, A., GRANDA, V., 2018. Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. Environ Modell Softw 108, 186–196.

HANDLER, S., PIKE, C., ST. CLAIR, B., ABBOTTS, H., & JANOWIAK, M. (2018). Assisted Migration. USDA Forest Service Climate Change Resource Center

DALRYMPLE, S.E., WINDER, R., CAMPBELL, E.M., 2021. Exploring the potential for plant translocations to adapt to a warming world. J Ecol 109, 2264–2270.

DEL CAMPO, A.D., SEGURA-ORENGA, G., BAUTISTA, I., CEACERO, C.J., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., MOLINA, A.J., HERMOSO, J., 2021. Assessing reforestation failure at the project scale: The margin for technical improvement under harsh conditions. A case study in a Mediterranean Dryland. Sci. Total Environ. 796, 148952. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148952

FICK, S.E., HIJMANS, R.J. (2017) WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. Int J Climatol 37, 4302–4315.

GIL, L., DÍAZ-FERNÁNDEZ, P.M., JIMÉNEZ, M.P., ROLDÁN, M., ALÍA, R., AGÚNDEZ, D., DE MIGUEL, J., MARTÍN, S., DE TUERO Y REINA, M. (1996). Las regiones de procedencia de Pinus halepensis Mill. En España. Madrid. Organismo Autónomo Parques Nacionales

JUMP, A.S., MÁTYÁS, C., PEÑUELAS, J., 2009. The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species. Trends Ecol Evol 24, 694–701.

PROBER, S.M., BYRNE, M., MCLEAN, E.H., STEANE, D.A., POTTS, B.M., VAILLANCOURT, R.E., STOCK, W.D., 2015. Climate-adjusted provenancing: a strategy for climate-resilient ecological restoration. Front. Ecol. Evol. 3, 65.

VADELL, E., 2021. Repoblación y gestión forestal en España desde el siglo XIX hasta la actualidad. Estudio de su desarrollo, fases históricas y resultados, Tesis doctoral. Universitat de Lleida.

VOLTAS, J., SHESTAKOVA, T.A., PATSIOU, T., MATTEO, G. DI, KLEIN, T., 2018. Ecotypic variation and stability in growth performance of the thermophilic conifer Pinus halepensis across the Mediterranean basin. For. Ecol. Manag. 424, 205–215.

VOLTAS, J., 2023. Tres siglos de Genética Forestal: situación actual, retos e incertidumbres. Cuad. Soc. Española Cienc. For. 49, 101–116.

WANG, T., O'NEILL, G. A., AND AITKEN, S. N. (2010). Integrating environmental and genetic effects to predict responses of tree populations to climate. Ecol. Appl. 20, 153–163.

WESSELY, J., ESSL, F., FIEDLER, K., GATTRINGER, A., HÜLBER, B., IGNATEVA, O., MOSER, D., RAMMER, W., DULLINGER, S., & SEIDL, R. (2024). A climate-induced tree species bottleneck for forest management in Europe. Nature Ecol Evol, 8(6), 1109-1117.

WILLIAMS, M.I., DUMROESE, R.K., 2013. Preparing for Climate Change: Forestry and Assisted Migration. J. For. 111, 287–297.