

La prospectiva climática en la era Trump

Daira Vanessa Puga Navarrete

En la era de la Inteligencia Artificial, las diversas técnicas de Machine Learning, los modelos no supervisados y ultra complejos de comprender para la mente humana, el regreso a lo esencial puede parecer innecesario.

Sin embargo, cuando hablamos de cambio climático, ni la Inteligencia Artificial ni las técnicas de Machine Learning pueden ver tan a futuro como un modelo de optimización intertemporal.

Molina-Pérez, Esquivel-Flores y Zamora-Maldonado (2020) relatan que los modelos de simulación son herramientas muy populares en el tema de cambio climático por tres razones: 1) el largo horizonte temporal que debe ser tomado en cuenta; 2) las condiciones heterogéneas de la economía y tecnologías entre países e industrias; y 3) las no-linealidades y dependencias de las trayectorias asociadas a la política climática.

En este sentido, Molina-Pérez et al. Desarrollaron el modelo EDIAM (Exploratory Dynamic Integrated Assessment Model) retomando a Acemoglu et al. (2012). Parte de la interrelación entre mitigación climática, innovación y crecimiento. En particular, describe la propagación de los impactos de la política climática en la economía a través de los cambios endógenos de productividad que afectan los mercados de: empleo, energía y tecnología.

El EDIAM rebasa este marco al incorporar el rol del learning-by-doing, las diferentes propiedades sobre la tecnología entre sectores, modelando las decisiones de inversión de los empresarios considerando el rol de la transferencia tecnológica entre naciones, y calibrando las ecuaciones del ambiente usando un ensamble completo de las proyecciones del CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5).

Mencionan los autores que el EDIAM se basa en 4 características:

- 1) Enfatiza el rol de la política tecnológica en la mitigación climática
- 2) Describe cómo la política climática se propaga en el tiempo, cambiando los incentivos de los agentes económicos
- 3) Considera la interconexión entre regiones y entre el entorno y la economía, así como su rol para dar forma a los resultados globales.
- 4) Su especificación permite la exploración de una gran cantidad de supuestos sobre clima, economía y política.

Vayamos desglosando los elementos del modelo y explorando cómo responde ante ciertos reajustes.

Set de política climática

El modelo buscará la optimización intertemporal de los agentes dados ciertos elementos exógenos. En particular, se modelan las siguientes medidas de política climática:

Representación		Medida de política
D		Número de años en que la intervención de política está activa, comenzando en 2022
τ^k con $k \in \{A, E\}$ Donde A= advanced region E= emerging region	τ^A	Impuesto al carbono en la región avanzada
	τ^E	Impuesto al carbono en la región emergente

h^k con $k \in \{A, E\}$ Donde A= advanced region E= emerging region	h^A	Subsidio tecnológico para tecnologías de energía sostenible en la región avanzada
	h^E	Subsidio tecnológico para tecnologías de energía sostenible en la región emergente
q^k con $k \in \{A, E\}$ Donde A= advanced region E= emerging region	q^A	Subsidio a Investigación y Desarrollo para tecnologías de energía sostenible en la región avanzada
	q^E	Subsidio a Investigación y Desarrollo para tecnologías de energía sostenible en la región emergente
h^G		Subsidio tecnológico del Fondo Verde para el Clima (GCF) para tecnologías de energía sostenible en la región emergente
q^G		Subsidio a Investigación y Desarrollo del Fondo Verde para el Clima (GCF) para tecnologías de energía sostenible en la región emergente

¿De qué depende la política climática óptima?

La política óptima será la que maximice la utilidad intertemporal de los consumidores representativos tanto en la región avanzada como en la emergente:

Conociendo a nuestros agentes

$$Max_{D, \tau^A, \tau^E, h^A, h^E, q^A, q^E, h^G, q^G} \sum_{T_0}^T \frac{1}{(1+\rho)^t} (u^A + u^E) \quad \leftarrow \text{Ec. 1.1}$$

Política climática

Utilidad de ambas regiones

Y en cada región, la utilidad estará determinada por:

Conociendo a nuestros agentes

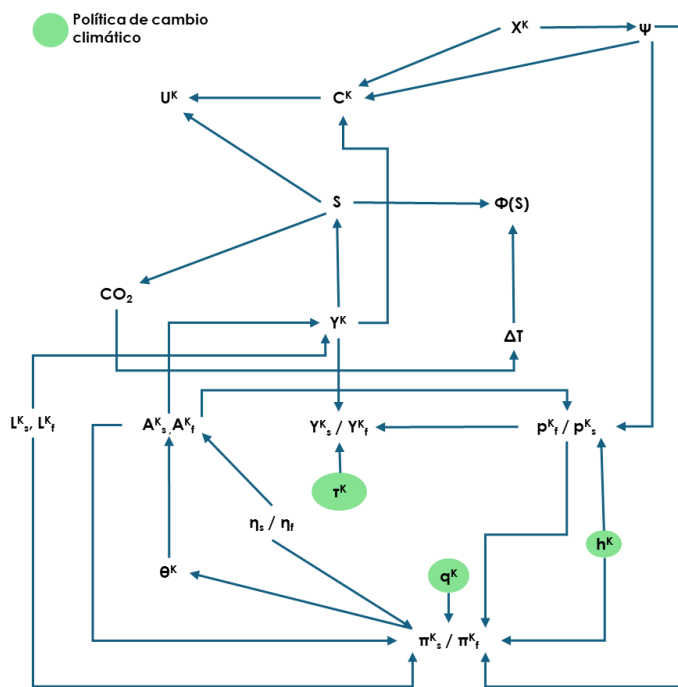
Costos de la degradación en la calidad del ambiente

$$u^k(C^k, S) = \frac{(\phi(S) C^k)^{1-\sigma}}{1-\sigma} \quad \leftarrow \text{Ec. 1.2}$$

Consumo y calidad del ambiente

Inversa de la elasticidad intertemporal de sustitución

Las restricciones del modelo marcan la pauta de las relaciones entre las variables. La siguiente figura muestra las complejas relaciones entre las variables.



El esquema da cuenta de cómo el uso de energía fósil contribuye directamente a la degradación de la calidad ambiental, mientras que el entorno natural presenta una capacidad limitada de regeneración. La calidad ambiental, a su vez, afecta el bienestar de los consumidores; los emprendedores tecnológicos asignan esfuerzos de investigación y desarrollo a los sectores de energía limpia o fósil en función de la rentabilidad esperada, lo que determina la evolución de la frontera tecnológica en ambos sectores. Las medidas de política pública serán fundamentales para alterar los incentivos de los agentes económicos, modificar la dirección del cambio tecnológico y transitar hacia trayectorias de crecimiento sostenibles y bajas en carbono.

Finalmente, el aumento de la temperatura en el mundo responderá a:

Efectos de los combustibles fósiles sobre el aumento de la temperatura

$$\Delta T = \beta \cdot \ln \left(\frac{CO_2}{CO_{2,0}} \right)$$

Ec.
1.6

Sensibilidad de la atmósfera a emisiones de CO₂

Lo más importante será encontrar la política climática que nos ayude a evitar el aumento catastrófico de la temperatura: 6.0 °C.

Simulando la situación climática a 100 años

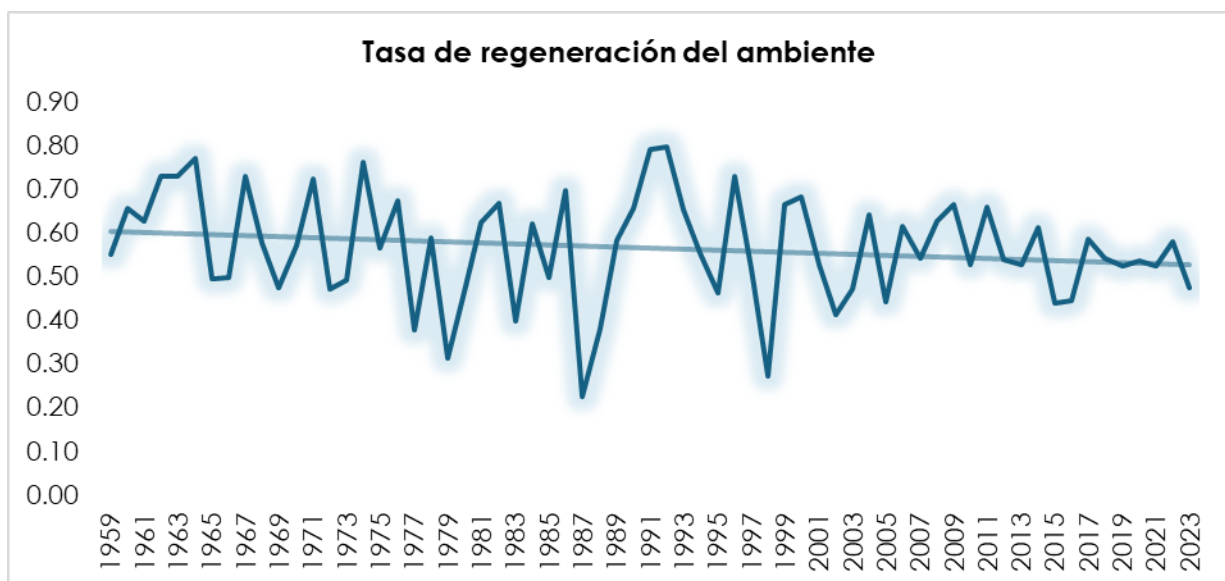
Retomando el modelo de Molina-Pérez et al., la simulación que haremos utiliza la información más reciente tanto de la situación climática como del estado actual de las políticas climáticas.

¿En qué punto nos encontramos?

De acuerdo con Latawiec et al. (2016, p. 852) (<https://doi.org/10.1111/btp.12386>), los factores que inciden en la regeneración natural del ambiente son heterogéneos y dependen de una serie de factores biofísicos, ecológicos y socioeconómicos.

La tasa de regeneración del ambiente puede calcularse como la relación de la concentración de CO₂ en la atmósfera respecto a las emisiones de la combustión de fuentes fósiles y procesos industriales más las emisiones por el cambio de uso de suelo. Cuando esta tasa es baja implica que, de las emisiones de CO₂ que generamos, se queda una mayor cantidad en la atmósfera. Cuando esta tasa es alta, implica que más CO₂ es absorbido por océanos, bosques y suelos. En otras palabras, significa que el ambiente absorbe mejor el CO₂ que emitimos.

Los datos más recientes del Global Carbon Budget 2024 (<https://globalcarbonbudgetdata.org/latest-data.html>) muestran que la tasa de regeneración del ambiente tiene una tendencia decreciente. Alcanzamos el punto más alto en 1992 con 0.80 y el mínimo de 0.22 en 1987. Aunque no hemos caído de nuevo tan bajo en la tasa de regeneración, los últimos 10 años se ha reducido la variabilidad de esta tasa y resulta más clara la tendencia decreciente.



¿Cómo podemos introducir esta información al modelo de simulación? Los distintos modelos climáticos del CMIP5 consideran parámetros diferenciados para esta tasa de regeneración. Al interpretar esta gráfica con ChatGPT y pedir su opinión para elegir el modelo climático que más se adapta a esta situación, nos sugiere lo siguiente:

MPI-ESM-LR o MPI-ESM-MR

- Mejor alineados a los datos reales del GCB 2023.
- Reflejan una tasa de regeneración consistente con ~52% sin ser ni demasiado optimistas ni demasiado pesimistas.
- β moderada-alta \rightarrow consistente con lo que se observa del sistema climático.

Considerando que la tasa parece tener caídas más fuertes que picos, usaremos el escenario climático que tiene una degradación del ambiente mayor: MPI-ESM-MR. Los parámetros de este modelo establecen lo siguiente:

- Beta: 4.67
- Delta: 0.00161
- S0:1,045

¿Cómo se encuentra la política climática?

El EDIAM se concentra tanto en las medidas de mitigación como en la transición energética hacia fuentes no contaminantes. En este sentido, el parámetro ϵ representa la elasticidad de sustitución en la producción de los tipos de energía limpia y fósil. Para conocer las implicaciones de los valores de ϵ en el modelo, se preguntó a ChatGPT por los valores típicos que se utilizan para modelarlo y su interpretación correspondiente.

Valores típicos de ϵ y fuentes académicas / institucionales

Contexto / Modelo	Valor típico de ϵ	Fuente / Referencia	Interpretación
IAMs conservadores (integrated assessment models clásicos, calibraciones estándar)	0.5 – 1	Golosov et al. (2014, <i>Econometrica</i>); Stern (2007); IAMs AR5 / AR6 IPCC	Sustitución difícil; lock-in tecnológico importante; cambios de precios no producen grandes cambios de mix energético.
IAMs con tecnología dirigida / políticas activas	1 – 3	Acemoglu et al. (2012, <i>AER</i>); Luderer et al. (2013, <i>Nature Climate Change</i>); Papageorgiou et al. (2017)	Sustitución moderada-alta; política de precios y subsidios facilitan el cambio de mix.
Estimaciones microeconómicas (empíricas, firmas industriales)	2 – 3	Ara Jo (2020, ETH Zürich Working Paper); Sue Wing (2008, <i>Energy Economics</i>)	En sectores específicos, la sustitución entre tecnologías es alta ante precios relativos.
Modelos optimistas (no estándar, exploratorios, no empíricamente validados)	4 – 6	Algunos escenarios exploratorios de EMF y NGFS (no típicos; documentado en sensitivity tests, no en calibraciones centrales)	Alta flexibilidad supuesta; se asume rápida respuesta a políticas.

Considerando estas interpretaciones, configuraremos el EDIAM para los escenarios donde ϵ tome una situación moderada con políticas activas y con fundamentos microeconómicos ($\epsilon = 3$) y una situación optimista con respuesta relevante a las políticas de transición energética ($\epsilon = 5$).

En relación a la situación actual de las políticas climáticas, con un presidente que no “cree” en el calentamiento global y generando el 13% de los gases de dióxido de carbono global (solo después de China <https://apnews.com/article/climate-change-pollution-carbon-dioxide-rising-worsening-df9814ea7e39dd214fd3042f299af914>), la política climática de EEUU es de gran relevancia a nivel mundial.

Por este motivo, la simulación se ajusta a 100 años (esperando que un plazo corto permita ver los efectos sobre el clima y pueda ser relevante para los policy makers) y se ajustan los niveles de política para identificar lo que sucedería de continuar con estas mismas medidas en EEUU y los beneficios que se podrían obtener al reforzar las estrategias de mitigación. Con ayuda de ChatGPT, se identificó la situación siguiente en términos de la política climática actual de EEUU:

Elemento de política	Detalle
Impuestos de carbono	No existe un carbon tax federal vigente. Se han evaluado propuestas como el Energy Innovation and Carbon Dividend Act, pero aún no se aprueban (energyanalytics.org , en.wikipedia.org).
Subsidios a energías limpias (clean tax credits)	Con la IRA, EE. UU. amplió masivamente créditos fiscales (solar, eólica, vehículos eléctricos).
Subsidios tecnológicos y a R&D	Se financia I+D e infraestructura (hidrógeno, captura de carbono, baterías) tanto por vía federal como vía cooperación internacional .
Cooperación internacional en I+D (Tech, R&D)	Participación en fondos globales (Green Climate Fund) y colaboración en tecnologías limpias, pero aún limitada pese al IRA y esfuerzo institucional .
Coordinación entre países	Aunque EE. UU. aporta fondos y colaboración tecnológica, no ha armonizado impuestos de carbono ni políticas globales conjuntas.

En resumen:

- **No hay impuesto explícito al carbono** (P0/P1), aunque existen herramientas como el Social Cost of Carbon.
- Predominan **subsidios a energías limpias** a través de la Inflation Reduction Act → régimen P2.
- Se financia activamente **I+D en tecnologías limpias** (hidrógeno, captura de carbono, baterías) → aún en P2, con indicios de P3.
- Hay cooperación internacional tecnológica, pero todavía incipiente → se mueve lentamente hacia **P3**.

Por ello, sugiere el siguiente ajuste de parámetros

Parámetro	Valor sugerido	Justificación
ceN.0	0	EE. UU. no tiene carbon tax federal .
ceS.0	0	Sin carbon tax armonizado ni aplicado al Sur.
tn.0	0.15 o 0.20	Sube el subsidio para reflejar fuerte apoyo IRA a solar, eólica, EV.
sn.0	2.0 (mantén)	Ya modelas fuerte I+D. Consistente con realidad.
ts.0	0	No hay subsidio directo al Sur por parte de EE. UU.
ss.0	0	Sin cofinanciamiento real de I+D al Sur.

Considerando estas sugerencias, en el modelo se ajusta el valor del subsidio inicial en el Norte a 0.15 y máximo 0.20, siendo el punto de partida actual y una expectativa conservadora de su incremento en el futuro. Además, considerando los conflictos que han surgido con los

países del Sur, se va a suponer una reducción del cofinanciamiento real en Investigación y Desarrollo a 0.20.

Por último, se retoman las combinaciones de políticas de Molina-Pérez, et al., que en lo sucesivo se mencionarán como P1, P2, P3, etcétera:

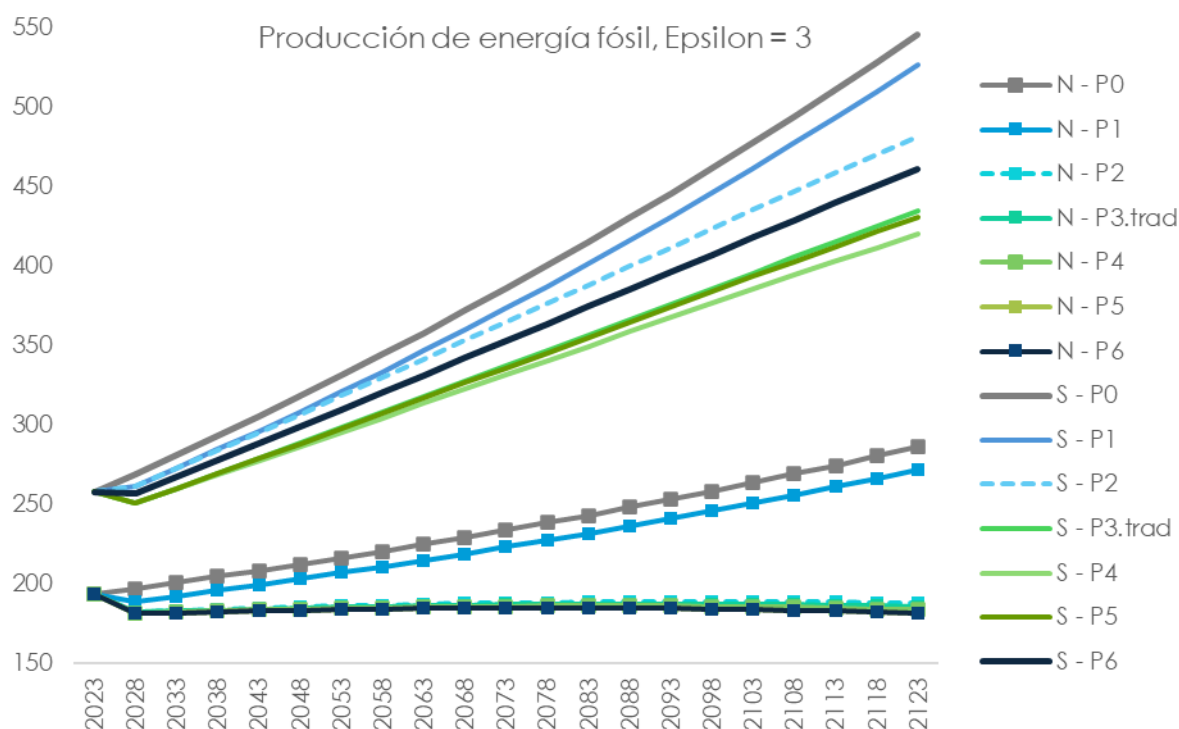
Régimen	Carbon tax	Tech subsidy (h)	R&D subsidy (q)	Cooperación internacional	Resumen conceptual
P0	No	No	No	No	Libre mercado sin política climática activa.
P1	Sí (independiente o armonizado)	No	No	No	Impuesto al carbono como único instrumento.
P2	Sí	Sí (indep.)	Sí (indep.)	No	Carbon tax + tech subsidies y R&D subsidies, todo gestionado de forma independiente en cada región.
P3	Sí (armonizado)	Sí (co-funded tech)	No	Tech co-funded	Harmonized carbon tax + co-funded technology subsidies (ejemplo: Green Climate Fund).
P4	Sí (armonizado)	Sí (co-funded tech)	Sí (indep. R&D)	Tech co-funded	Harmonized carbon tax + co-funded tech subsidies + R&D independiente.
P5	Sí (armonizado)	No	Sí (co-funded R&D)	R&D co-funded	Harmonized carbon tax + co-funded R&D subsidies.
P6	Sí (armonizado)	Sí (co-funded tech)	Sí (co-funded R&D)	Tech + R&D co-funded	Harmonized carbon tax + co-funded tech and R&D subsidies.

¿Qué depara el futuro?

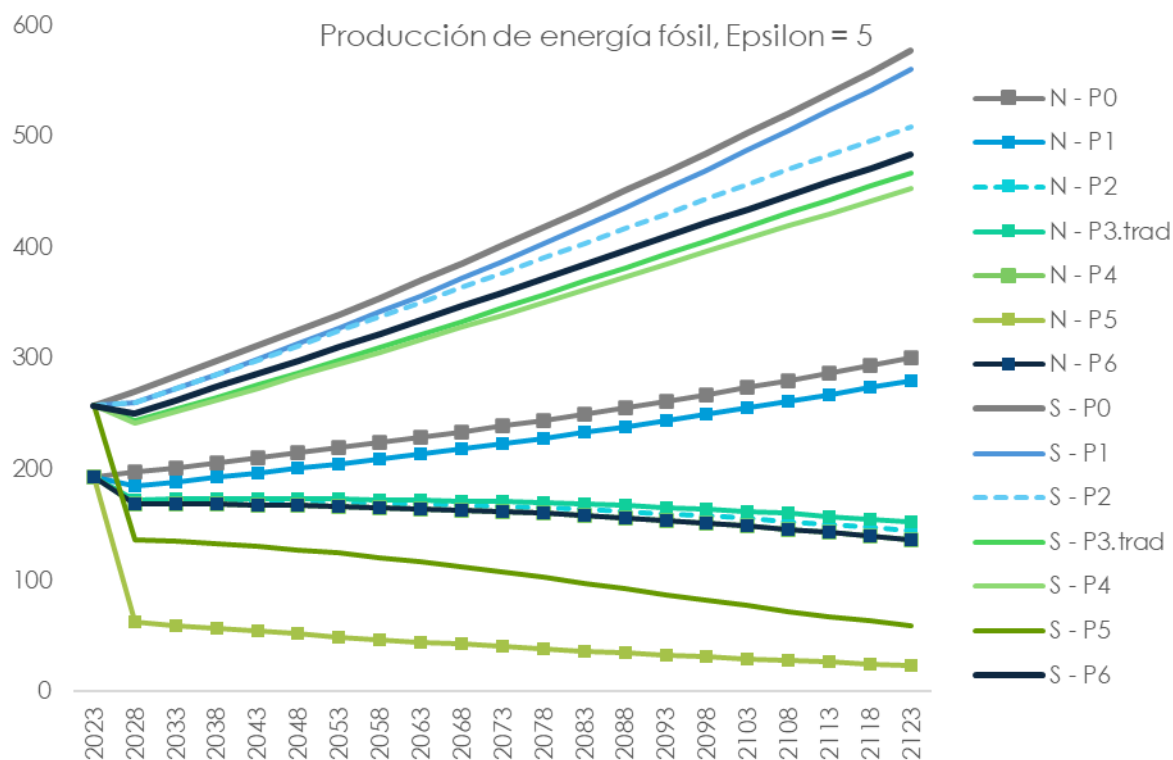
La simulación del EDIAM con los parámetros especificados nos permite conocer el resultado de las distintas políticas sobre todas las variables endógenas del modelo, distinguiendo por el tipo de región (Norte y Sur). En particular, nos interesa conocer el efecto sobre la producción de energías fósiles, de energías renovables, la concentración de emisiones de CO₂ y el efecto final sobre el aumento de temperatura.

La situación moderada donde existe sustitución alta entre tecnologías ante las variaciones de los precios relativos nos referiremos como Epsilon = 3. En todos los casos, la región Sur generaría los mayores niveles de producción de energías fósiles. Si la región Sur no realiza ninguna política climática, en 100 años se dispararía la producción de energías fósiles. No obstante, aún con el uso de cualquiera de los tipos de política considerados, la producción de estas energías seguiría siendo muy superior a la del Norte.

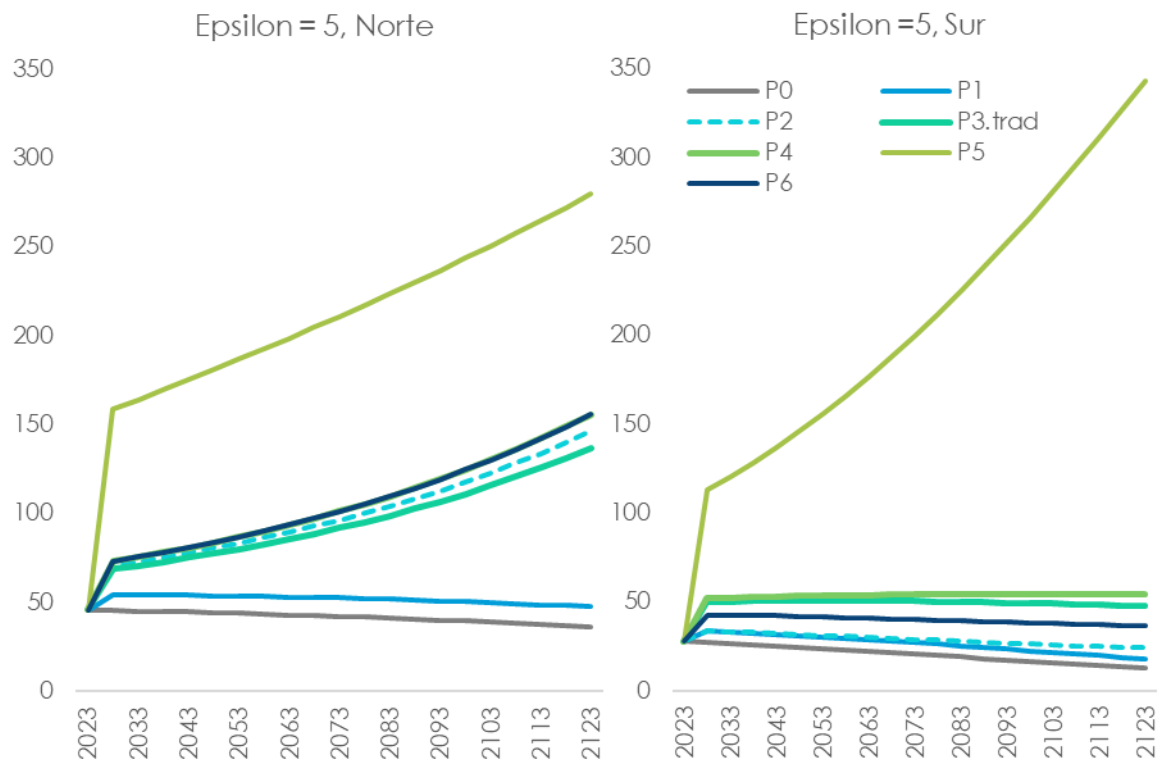
Por otro lado, en la región Norte todas las políticas son más eficientes para reducir la producción de estas energías sucias que la P1 y la ausencia de medidas de mitigación (P0). Además, se estima alrededor del año 2068 un comportamiento decreciente en la producción de estas energías, en especial con la política P6.



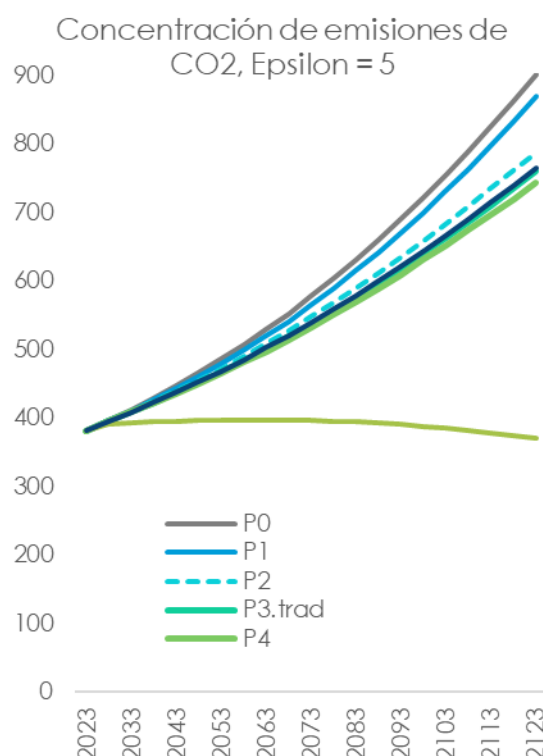
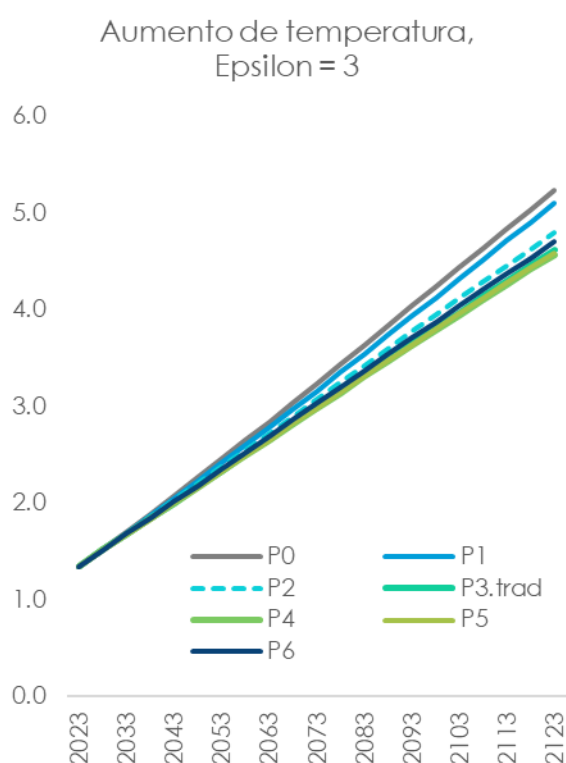
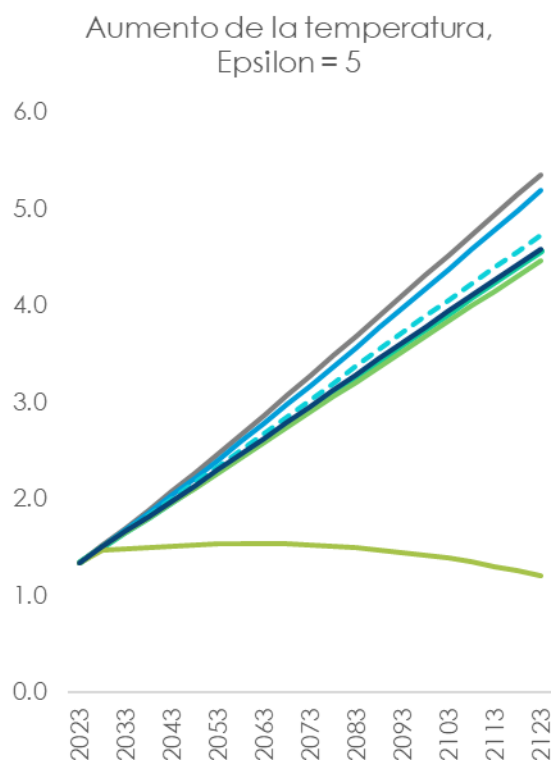
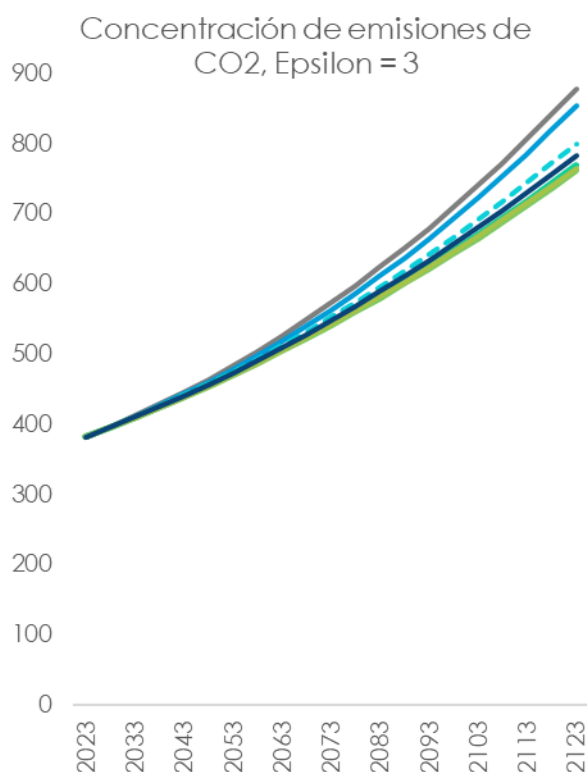
Cuando consideramos una situación muy optimista sobre la sustitución entre tecnologías ante las variaciones de los precios relativos le denominaremos Epsilon = 5. Aunque el comportamiento en la región Sur es muy similar a cuando Epsilon = 3, la política P5 genera una disminución de la producción de energías fósiles incluso inferiores a las de la región Norte. Además, esta misma política generaría fuertes efectos en la región Norte donde al cabo de 100 años se había disminuido casi en un 88% la producción de energías contaminantes.



En cuanto a la producción de energías limpias que reemplacen las fósiles, cuando Epsilon = 5, es notorio que la política P5 es la que cataliza con mayor fuerza la producción de estas energías. Aunque en el Sur, es la única política que no disminuye la producción de estas energías en el escenario más optimista, es claro que en la región Norte las políticas P6, P3 y P2, que actualmente implementa Estados Unidos, es prometedora. No obstante, al pasar 100 años, estas tres políticas alcanzarían apenas lo que la P5 lograría en 5 años.



Finalmente, el impacto climático de estas medidas difiere en función de la elasticidad entre los dos tipos de energía. En una situación moderada, la concentración de emisiones sin política climática nos llevaría sin duda a los mayores niveles de CO₂ y, por lo tanto, a un aumento de la temperatura global de 5.2 °C. Si se continua con la política P2, se obtendrían resultados moderados, con un incremento de la temperatura de 4.7 °C. Solo la política P5 nos permitiría reducir al máximo la concentración de emisiones y, por tanto, alejarnos lo más posible del aumento catastrófico de la temperatura (6 °C).



Si logramos incrementar la elasticidad de las energías fósiles y limpias (Epsilon = 5), toda política diferente a P1 y P0 tendría mayores efectos positivos sobre la concentración de emisiones. No obstante, solamente la P5 (*Harmonized carbon tax + co-funded R&D subsidies*) nos garantizaría un futuro más pleno donde se pueda comenzar a reducir la concentración de emisiones de CO₂ en la atmósfera, y llevar el aumento de la temperatura global a 1.2 °C en los próximos 100 años.