

Exploratory Dynamic Integrated Assessment Model (EDIAM)

Análisis de decisiones bajo condiciones de incertidumbre

Licenciatura en Gobierno y Transformación Pública

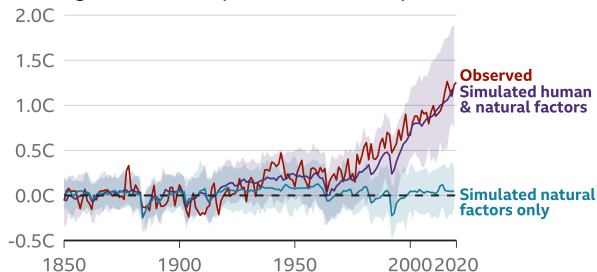
27 de abril de 2025



Problemática: Cambio climático

Human influence has warmed the climate

Change in average global temperature relative to 1850-1900, showing observed temperatures and computer simulations



Note: Shaded areas show possible range for simulated scenarios

Source: IPCC, 2021: Summary for Policymakers

BBC



Incertidumbre

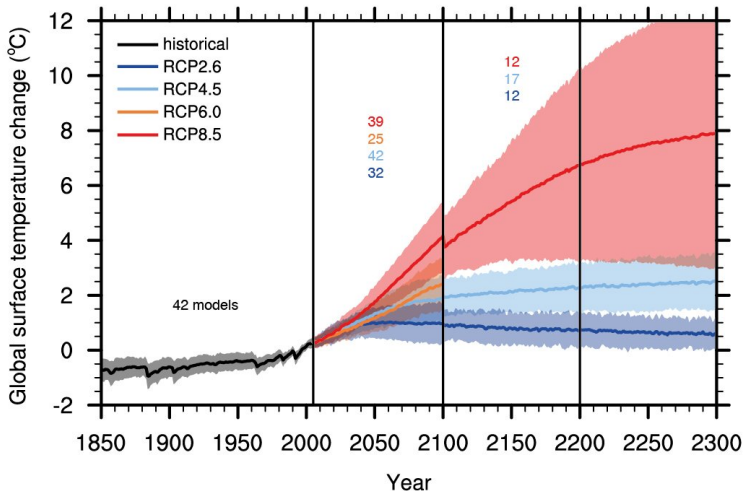
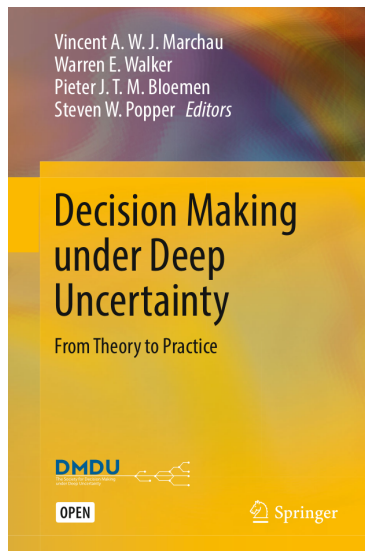


Figura: Series de tiempo de anomalías de la temperatura media mundial anual del aire en la superficie. Tomado de ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf

Decision Making Under Deep Uncertainty (DMDU)

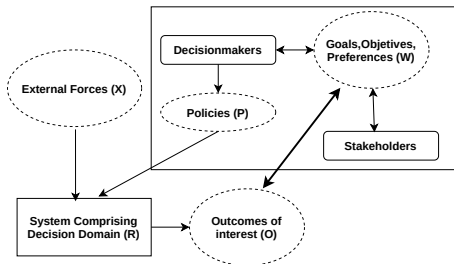
Campo emergente en la Ciencia de Decisiones

- ¿Qué condiciones afectan el desempeño de una decisión?
- ¿Bajo qué condiciones fallan nuestras decisiones con respecto a los objetivos de las diferentes partes interesadas?
- ¿Son esas condiciones lo suficientemente plausibles como para justificar opciones de adaptación?



Decision Making Under Deep Uncertainty (DMDU)

Walker (2000) views decisionmaking as choosing among alternatives in order to change system outcomes in a desired way



¿Dónde puede surgir incertidumbre?

1. **Scenario Uncertainty:** Es difícil identificar qué desarrollos externos serán relevantes para el desempeño del sistema en el futuro de largo plazo, así como el tamaño de estos y su dirección.
2. **Structural Uncertainty:** A pesar que se tuviera conocimiento de los desarrollos externos, no habría certeza acerca de cómo respondería el sistema a estos desarrollos.
3. **Mecanismo causal que determina el desempeño del sistema.**
4. **Evaluación de los resultados están sujetos a las valoraciones futuras de las partes involucradas.**

Más que un enfoque basado en pronósticos acerca del futuro, es preciso un enfoque basado en **monitorear y adaptarse**, el cual reconozca explícitamente la profunda incertidumbre que rodea a la decisión para eventos inciertos y desarrollos a largo plazo y que enfatice la necesidad de tener en cuenta esta profunda incertidumbre.

¿Cómo
enfrentamos
estas
incertidumbres?

Elaborado a partir de Marchau et al (2019)

En términos generales, los enfoques de DMDU están compuestos de los siguientes elementos:

1. Acotar el análisis:
 - Formular el problema u oportunidad desencadenante.
 - Especificar la estructura del sistema y sus límites (S).
 - Especificar las metas y objetivos y los indicadores de resultado (O).
 - Especificar las políticas (P).
2. Realizar un análisis exploratorio de incertidumbre:
 - Especificar las incertidumbres acerca de fuerzas externas (X), estructura del sistema (R), indicadores de resultados (O), y valuación de resultados (W).
 - Explorar los resultados de política y sus vulnerabilidades (y oportunidades) dadas las incertidumbres (usando modelos u opiniones de expertos)
3. Elegir acciones iniciales y acciones contingentes:
 - Seleccionar y planificar la adopción de la política (inicial) y los mecanismos de ajuste.
 - Plan de comunicación, seguimiento y de posibles adaptaciones de la política.
4. Iterar y reexaminar

Matriz XLRM

Uncertainties (X)	Policy Levers (L)
¿Qué elementos no controlamos del sistema?	¿Qué mecanismos disponemos para intervenir en el sistema?
System Relationships (R)	Metrics (M)
¿Cómo analizamos el sistema?	¿Cómo evaluamos las intervenciones?

Directed International Technological Change and Climate Policy

New Methods for Identifying Robust Policies
Under Conditions of Deep Uncertainty

Edmundo Molina-Perez



Computational Intelligence for Studying Sustainability Challenges: Tools and Methods for Dealing With Deep Uncertainty and Complexity

Edmundo Molina-Perez^{1*}, Oscar A. Esquivel-Flores² and Hilda Zamora-Maldonado³

¹ Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ciencias Sociales y Gobierno, Monterrey, Mexico, ² Institute for Research in Applied Mathematics and Systems, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico, ³ Institute of Economics Research, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico

The study of sustainability challenges requires the consideration of multiple coupled systems that are often complex and deeply uncertain. As a result, traditional analytical methods offer limited insights with respect to how to best address such challenges. By analyzing the case of global climate change mitigation, this paper shows that the combination of high-performance computing, mathematical modeling, and computational intelligence tools, such as optimization and clustering algorithms, leads to richer analytical insights. The paper concludes by proposing an analytical hierarchy of computational tools that can be applied to other sustainability challenges.

Keywords: decision support tools, sustainability, end-of-century climate targets, computational intelligence, climate change, deep uncertainty

OPEN ACCESS

Edited by:
Daniel Polani,
University of Hertfordshire,
United Kingdom

Reviewed by:
Giovanni De Gasparis,
Università dell'Aquila, Italy

¿De donde partimos?

Uncertainties (X)	Policy Levers (L)
<p>Climate uncertainty</p> <ul style="list-style-type: none">• 12 Climate Scenarios <p>Economic Uncertainty:</p> <ul style="list-style-type: none">• 10 Elasticity of Substitution Scenarios• 5 Discount Rate Scenarios	<ul style="list-style-type: none">• P0. FWA (Future Without Action)• P1. I. Carbon Tax [Both]<ul style="list-style-type: none">• P2. I. Carbon Tax + I.Tech-R&D[Both]• P3. H. Carbon Tax + Co-Tech + R&D• P4. H. Carbon Tax + Co-Tech + I. R&D[Both]• P5. H. Carbon Tax + Co-R&D + Tech• P6. H. Carbon Tax + Co-R&D + I. Tech[Both]• P7. H. Carbon Tax + Co-Tech-R&D
System Relationships (R)	Metrics (M)
<ul style="list-style-type: none">• Exploratory Dynamic Integrated Assessment Model (EDIAM)	<ul style="list-style-type: none">• End-of-century temperature rise• Stabilization of GHG emissions• Economic costs of policy intervention

EDIAM(Molina-Perez, 2016)

- [Molina-Perez \(2016\)](#) hace uso de métodos de RDM para identificar políticas adaptativas robustas para promover la descarbonización internacional, en un escenario donde tanto el cambio climático como el cambio tecnológico presentan alta incertidumbre.
- Presenta un *Exploratory Dynamic Integrated Assessment Model* (EDIAM) que describe los procesos de cambio tecnológico entre países avanzados y emergentes, y su conexión con el crecimiento económico y el cambio climático ([Groves et al., 2019](#)).

EDIAM(Molina-Perez, 2016)

El modelo involucra principalmente tres mecanismos.

- El primero determina el volumen de inversión en R&D que es dirigido hacia tecnologías de energía sostenible y tecnologías de energía fósil ([Acemoglu, 2002](#); [Acemoglu et al., 2012](#)).
- El segundo mecanismo describe cómo las tecnologías se desenvuelven en las regiones desarrolladas (*i.e.* cómo los emprendedores usan la tecnología existente para desarrollar nuevas tecnologías).
- El tercer mecanismo describe cómo se desenvuelven las tecnologías en regiones emergentes.

Volumen de inversión en R&D

El primero determina el volumen de inversión en R&D que es dirigido hacia tecnologías de energía sostenible y tecnologías de energía fósil (Acemoglu, 2002; Acemoglu et al., 2012).

$$\frac{\Pi_{set}^k(t)}{\Pi_{fet}^k(t)} = (1 + q_{se}^k) \times \frac{\eta_{se}}{\eta_{fe}} \times \frac{1}{(1 - t_{set}^k)^{\frac{1}{1-\alpha}}} \times \left(\frac{\psi_{fe}}{\psi_{se}} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \\ \times \left(\frac{p_{se}^k(t)}{p_{fe}^k(t)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \frac{L_{se}^k(t)}{L_{fe}^k(t)} \times \frac{A_{se}^k(t)}{A_{fe}^k(t)}$$

Si $\frac{\Pi_{set}^k(t)}{\Pi_{fet}^k(t)} > 1$ la mayoría de investigación y desarrollo es dirigida hacia tecnologías de energía sostenible. ($\Pi_{set}^k(t)$ y $\Pi_{fet}^k(t)$ son las ganancias en el sector de energía sostenible y fósil, respectivamente). q_{se}^k es el subsidio en R&D para tecnologías de energía sostenible, y α es la tasa de retorno del capital.

Volumen de inversión en R&D

El primero determina el volumen de inversión en R&D que es dirigido hacia tecnologías de energía sostenible y tecnologías de energía fósil (Acemoglu, 2002; Acemoglu et al., 2012).

$$\frac{\Pi_{set}^k(t)}{\Pi_{fet}^k(t)} = (1 + q_{se}^k) \times \frac{\eta_{se}}{\eta_{fe}} \times \frac{1}{(1 - t_{set}^k)^{\frac{1}{1-\alpha}}} \times \left(\frac{\psi_{fe}}{\psi_{se}} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \\ \times \left(\frac{p_{se}^k(t)}{p_{fe}^k(t)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \frac{L_{se}^k(t)}{L_{fe}^k(t)} \times \frac{A_{se}^k(t)}{A_{fe}^k(t)}$$

Efecto directo en productividad $\frac{A_{se}^k(t)}{A_{fe}^k(t)}$

- Incentiva la investigación en el sector con las tecnologías más avanzadas y productivas ($A_{se}^k(t)$ y $A_{fe}^k(t)$ son las productividades en el sector de energía sostenible y fósil, respectivamente).

Volumen de inversión en R&D

El primero determina el volumen de inversión en R&D que es dirigido hacia tecnologías de energía sostenible y tecnologías de energía fósil (Acemoglu, 2002; Acemoglu et al., 2012).

$$\frac{\Pi_{set}^k(t)}{\Pi_{fet}^k(t)} = (1 + q_{se}^k) \times \frac{\eta_{se}}{\eta_{fe}} \times \frac{1}{(1 - t_{set}^k)^{\frac{1}{1-\alpha}}} \times \left(\frac{\psi_{fe}}{\psi_{se}} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \\ \times \left(\frac{p_{se}^k(t)}{p_{fe}^k(t)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \frac{L_{se}^k(t)}{L_{fe}^k(t)} \times \frac{A_{se}^k(t)}{A_{fe}^k(t)}$$

Market size effect $\frac{L_{se}^k(t)}{L_{fe}^k(t)}$

- Hace más ambiciosa la investigación en R&D hacia sectores con el tamaño de mercado más grande. ($L_{se}^k(t)$ y $L_{fe}^k(t)$ es el tamaño de mercado del sector de energía sostenible y fósil, respectivamente).

Volumen de inversión en R&D

El primero determina el volumen de inversión en R&D que es dirigido hacia tecnologías de energía sostenible y tecnologías de energía fósil (Acemoglu, 2002; Acemoglu et al., 2012).

$$\frac{\Pi_{set}^k(t)}{\Pi_{fet}^k(t)} = (1 + q_{se}^k) \times \frac{\eta_{se}}{\eta_{fe}} \times \frac{1}{(1 - t_{set}^k)^{\frac{1}{1-\alpha}}} \times \left(\frac{\psi_{fe}}{\psi_{se}} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \\ \times \left(\frac{p_{se}^k(t)}{p_{fe}^k(t)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \frac{L_{se}^k(t)}{L_{fe}^k(t)} \times \frac{A_{se}^k(t)}{A_{fe}^k(t)}$$

Efecto precios $\frac{p_{se}^k(t)}{p_{fe}^k(t)}$

- Incentiva la investigación en el sector de energía con los precios más altos. ($p_{se}^k(t)$ y $p_{fe}^k(t)$ son los precios en el sector de energía sostenible y fósil, respectivamente).

Volumen de inversión en R&D

El primero determina el volumen de inversión en R&D que es dirigido hacia tecnologías de energía sostenible y tecnologías de energía fósil ([Acemoglu, 2002](#); [Acemoglu et al., 2012](#)).

$$\frac{\Pi_{set}^k(t)}{\Pi_{fet}^k(t)} = (1 + q_{se}^k) \times \frac{\eta_{se}}{\eta_{fe}} \times \frac{1}{(1 - t_{set}^k)^{\frac{1}{1-\alpha}}} \times \left(\frac{\psi_{fe}}{\psi_{se}} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \\ \times \left(\frac{p_{se}^k(t)}{p_{fe}^k(t)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \frac{L_{se}^k(t)}{L_{fe}^k(t)} \times \frac{A_{se}^k(t)}{A_{fe}^k(t)}$$

Efecto experiencia $\left(\frac{\psi_{fe}}{\psi_{se}} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}$

- Dirige las actividades de innovación hacia el sector que más rápidamente reduce los costos de producción tecnológicos. (ψ_{fe} y ψ_{se} son los costos unitarios de producción en el sector de energía sostenible y fósil, respectivamente).

Volumen de inversión en R&D

El primero determina el volumen de inversión en R&D que es dirigido hacia tecnologías de energía sostenible y tecnologías de energía fósil ([Acemoglu, 2002](#); [Acemoglu et al., 2012](#)).

$$\frac{\Pi_{set}^k(t)}{\Pi_{fet}^k(t)} = (1 + q_{se}^k) \times \frac{\eta_{se}}{\eta_{fe}} \times \frac{1}{(1 - t_{set}^k)^{\frac{1}{1-\alpha}}} \times \left(\frac{\psi_{fe}}{\psi_{se}} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \\ \times \left(\frac{p_{se}^k(t)}{p_{fe}^k(t)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \times \frac{L_{se}^k(t)}{L_{fe}^k(t)} \times \frac{A_{se}^k(t)}{A_{fe}^k(t)}$$

Efecto propensión a la innovación $\frac{\eta_{se}}{\eta_{fe}}$

- Incentiva la R&D en el sector que más rápidamente produce nuevas tecnologías. (η_{fe} y η_{se} son las propensiones a la innovación el sector de energía sostenible y fósil, respectivamente).

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\xi(Y_{fe}^A + Y_{fe}^E) + \delta S \\ \frac{dA_j^A}{dt} &= \gamma_j (A_j^A) \eta_j \theta_j^A A_j^A \\ \frac{dA_j^E}{dt} &= \nu_j \gamma_j (A_j^E) \theta_j^E (A_j^A - A_j^E)\end{aligned}\tag{1}$$

Donde:

- Y_{fe} : energía fósil,
- Y_{se} : energía sostenible,
- S : calidad de ambiente,
- ξ : daño marginal al ambiente por unidad de energía fósil usada en ambas regiones,
- δ : la tasa promedio de regeneración ambiental,
- θ_j^A : proporción de emprendedores en el sector j ,
- A_j^A : productividad actual del sector j al tiempo t .
- γ_j : retorno promedio de R&D a la productividad del sector j .
- η_j : propensión a la innovación en el sector j .
- ν_j denota la probabilidad de éxito al imitar/adaptar las tecnologías del sector j desarrolladas en la región avanzada.

Parámetros del modelo

- α : proporción del ingreso de capital en el ingreso total.
- ϵ : elasticidad de sustitución.
- γ_{re} : retornos a la productividad de R&D en el sector renovable.
- γ_{ce} : retornos a la productividad de R&D en el sector de carbono.
- η_{re} : propensión a la innovación en el sector renovable.
- η_{ce} : propensión a la innovación en el sector de carbono.
- ν_{re} : probabilidad de éxito al imitar o adaptar tecnología del sector renovable desarrollada en la región avanzada por parte de la región emergente.
- ν_{ce} : probabilidad de éxito al imitar o adaptar tecnología del sector de carbono desarrollada en la región avanzada por parte de la región emergente.
- qsi : measures the rate of environmental degradation resulting from the production of dirty inputs
- ΔT : incremento de la temperatura desde tiempos preindustriales (grados celsius).
- $\Delta T_{disaster}$: 6.0 (grados celsius).
- β : sensibilidad de la atmósfera a emisiones de CO_2 (grados celsius)
- ξ : daño marginal al ambiente por unidad de energía fósil usada en ambas regiones
- δ : tasa promedio de regeneración ambiental natural
- $CO_{2,0}$: nivel inicial de concentración de CO_2 en la atmósfera al inicio del siglo XX.
- $CO_{2|6.0^\circ C}$: nivel de emisiones de CO_2 que resultaría en un incremento de la temperatura de $6.0^\circ C$ con respecto a niveles preindustriales.
- r^N : tasa de crecimiento de la oferta laboral en la región desarrollada.
- r^S : tasa de crecimiento de la oferta laboral en la región emergente.
- ρ : tasa de descuento.
- σ : inversa de la elasticidad intertemporal de sustitución.

Parámetros del modelo

- α : proporción del ingreso de capital en el ingreso total.
- ϵ : elasticidad de sustitución.
- γ_{re} : retornos a la productividad de R&D en el sector renovable.
- γ_{ce} : retornos a la productividad de R&D en el sector de carbono.
- η_{re} : propensión a la innovación en el sector renovable.
- η_{ce} : propensión a la innovación en el sector de carbono.
- ν_{re} : probabilidad de éxito al imitar o adaptar tecnología del sector renovable desarrollada en la región avanzada por parte de la región emergente.
- ν_{ce} : probabilidad de éxito al imitar o adaptar tecnología del sector de carbono desarrollada en la región avanzada por parte de la región emergente.
- qsi : measures the rate of environmental degradation resulting from the production of dirty inputs
- ΔT : incremento de la temperatura desde tiempos preindustriales (grados celsius).
- $\Delta T_{disaster}$: 6.0 (grados celsius).
- β : sensibilidad de la atmósfera a emisiones de CO_2 (grados celsius)
- ξ : daño marginal al ambiente por unidad de energía fósil usada en ambas regiones
- δ : tasa promedio de regeneración ambiental natural
- $CO_{2,0}$: nivel inicial de concentración de CO_2 en la atmósfera al inicio del siglo XX.
- $CO_{2|6.0^\circ C}$: nivel de emisiones de CO_2 que resultaría en un incremento de la temperatura de $6.0^\circ C$ con respecto a niveles preindustriales.
- r^N : tasa de crecimiento de la oferta laboral en la región desarrollada.
- r^S : tasa de crecimiento de la oferta laboral en la región emergente.
- ρ : tasa de descuento.
- σ : inversa de la elasticidad intertemporal de sustitución.

Calibración del Modelo : Problemas Inversos

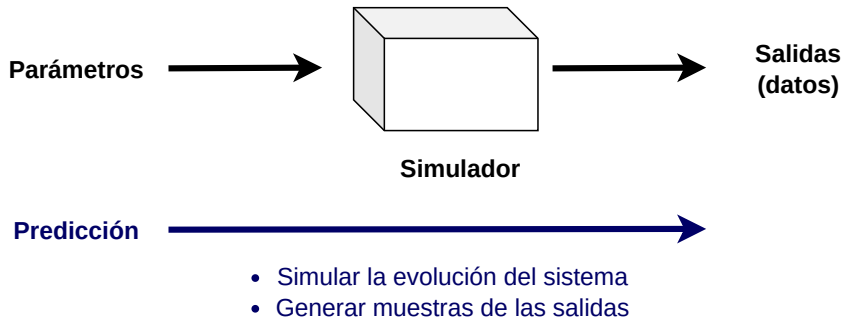


Figura: Adaptado de Atılım Güneş Baydin, *Probabilistic Programming for Inverse Problems in the Physical Sciences*. Recurso : https://www.youtube.com/watch?v=E3_Ey0z068o

Calibración del Modelo : Problemas Inversos

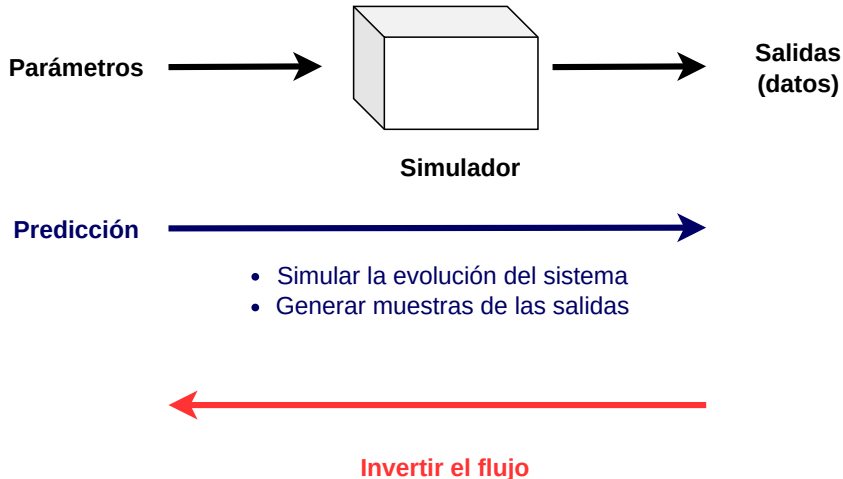


Figura: Adaptado de Atılım Güneş Baydin, *Probabilistic Programming for Inverse Problems in the Physical Sciences*. Recurso : https://www.youtube.com/watch?v=E3_Ey0z068o

Calibración del Modelo : Problemas Inversos

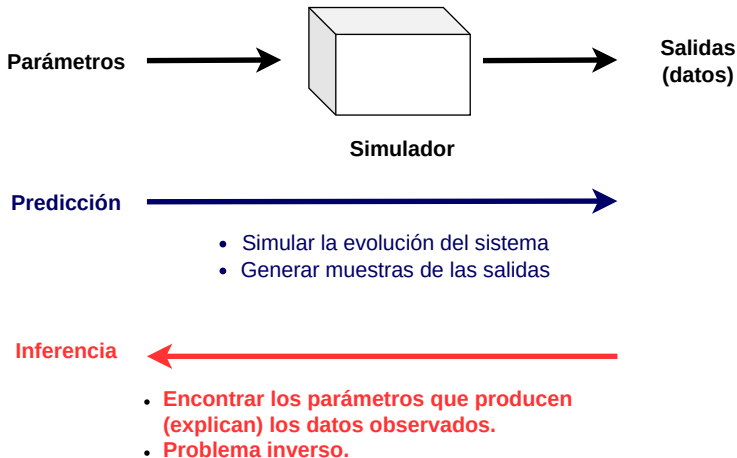


Figura: Adaptado de Atılım Güneş Baydin, *Probabilistic Programming for Inverse Problems in the Physical Sciences*. Recurso : https://www.youtube.com/watch?v=E3_Ey0z068o

Calibración del Modelo : Problemas Inversos

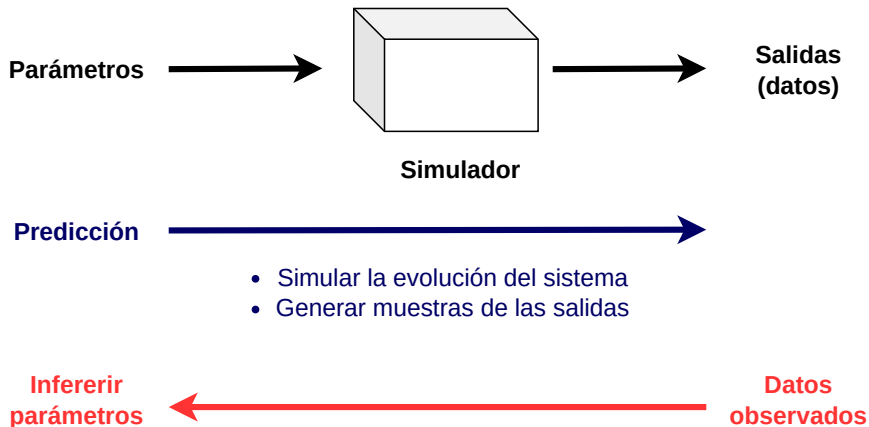


Figura: Adaptado de Atılım Güneş Baydin, *Probabilistic Programming for Inverse Problems in the Physical Sciences*. Recurso : https://www.youtube.com/watch?v=E3_Ey0z068o

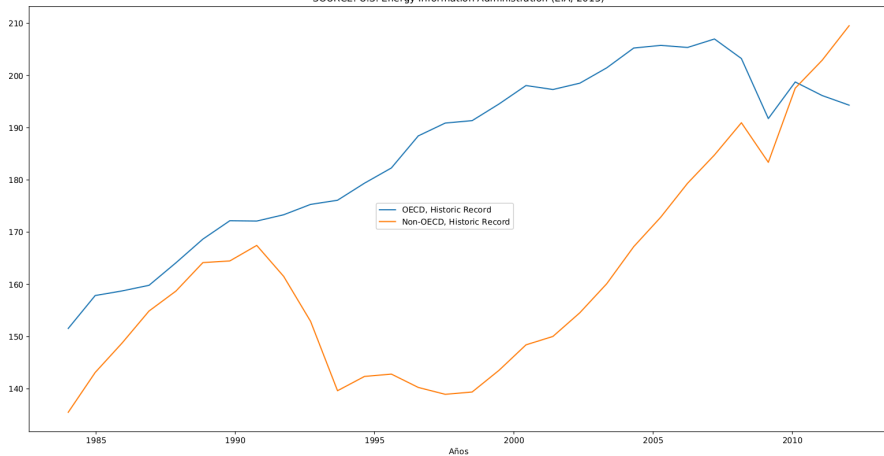
Calibración del modelo

La calibración del modelo consiste en reproducir las series históricas de consumo de energía fósil en las dos regiones de mundo.

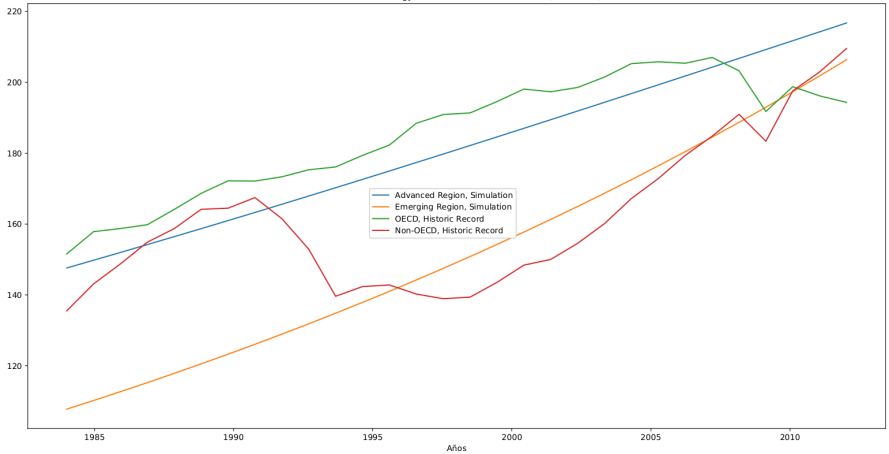
Para esto, se plantea un problema de minimización de la suma de los Errores Cuadráticos Medios de las series simuladas y observadas del consumo de energía fósil en las dos regiones de mundo.

$$\begin{aligned} & \underset{\gamma_{re}, \gamma_{ce}, \eta_{re}, \eta_{ce}, \nu_{re}, \nu_{ce}, r^N, r^S}{\text{mín}} && MSE_N + MSE_S && (2) \\ & \text{s.t.} && && \\ & \gamma_{re}, \gamma_{ce}, \eta_{re}, \eta_{ce}, \nu_{re}, \nu_{ce}, r^N, r^S \in [0.001, 0.12] \end{aligned}$$

Fossil Energy Consumption Across Regions Simulated Output vs Historic Record
SOURCE: U.S. Energy Information Administration (EIA, 2015)



Fossil Energy Consumption Across Regions Simulated Output vs Historic Record
SOURCE: U.S. Energy Information Administration (EIA, 2015)



Problema de optimización

El problema de optimización consiste en maximizar la utilidad intertemporal de consumidores representativos en las regiones avanzadas y emergentes, la cual depende del consumo y de la calidad del ambiente.

$$\max_{\tau^A, \tau^E, h^A, h^E, q^A, q^E} \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+\rho)^t} (u^A + u^E) \quad (3)$$

s.t.

$$\tau^A, \tau^E, h^A, h^E, q^A, q^E \in [0, 1)$$

Donde:

- τ^A : impuesto al carbono en la región avanzada,
- τ^E : impuesto al carbono en la región emergente,
- h^A : subsidio para tecnologías de energía sostenible en la región avanzada,
- h^E : subsidio para tecnologías de energía sostenible en la región emergente,
- q^A : subsidio en R&D para tecnologías de energía sostenible en la región avanzada,
- q^E : subsidio en R&D para tecnologías de energía sostenible en la región emergente,

Estrategías de Política

Régimen de Política	Problema de optimización
Futuro sin acción	<ul style="list-style-type: none">• $\tau^A, \tau^E, h^A, h^E, q^A, q^E = 0$
Impuestos al carbono	<ul style="list-style-type: none">• $\tau^A, \tau^E > 0$• $h^A, h^E, q^A, q^E = 0$
Impuestos al carbono + Subsidios tecnológicos	<ul style="list-style-type: none">• $\tau^A, \tau^E, h^A, h^E > 0$• $q^A, q^E = 0$
Impuestos al carbono + Subsidios tecnológicos + Subsidios a R&D	<ul style="list-style-type: none">• $\tau^A, \tau^E, h^A, h^E, q^A, q^E > 0$

Configuración de los experimentos para generación de escenarios

Se realizan experimentos computacionales para explorar el efecto de distintas transformaciones económicas y climáticas y así construir un diseño experimental al estresar los parámetros calibrados alrededor de un margen $[1 - \Delta, 1 + \Delta]$ donde $\Delta \in [0, 1]$.

La forma de estresar los parámetros se realiza mediante un muestreo Latin Hypercube.

Variar elasticidad de sustitución, ε , y tasa de descuento, ρ en $\Delta = 0.1$

- ε
- ρ

General circulation model (GCM) $\Delta = 0.1$

- β
- $CO_{2,0}$
- $CO_{2|6.0^\circ C}$
- ξ
- δ

Identificación de condiciones de vulnerabilidad

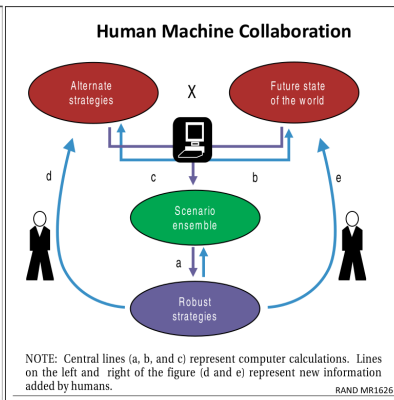
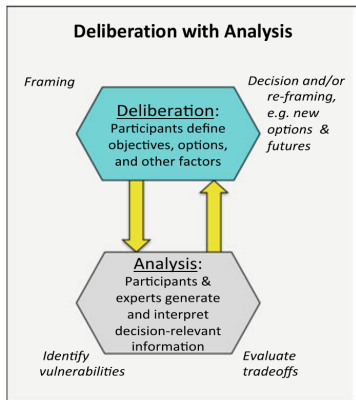
Hay dos tipos de resultados de interés en los experimentos:

- Simulaciones en las que se cumple el objetivo de aumento de temperatura de 2°C al fin del siglo.
- Simulaciones en las que se cumplen los objetivos de aumento de temperatura de 2°C al fin del siglo así como la estabilización de emisiones de CO_2 .

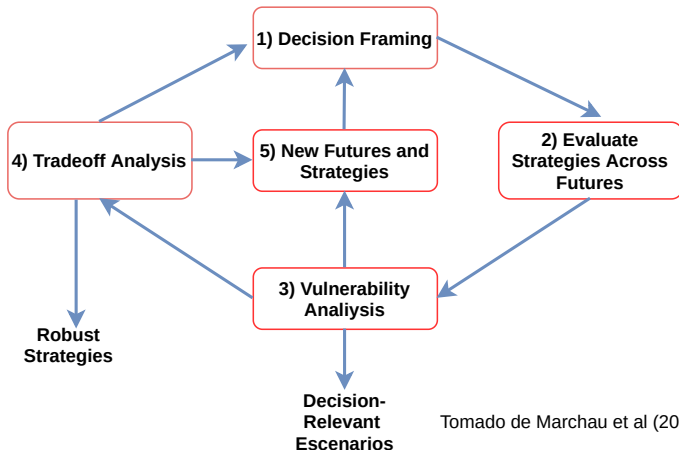
Identificación de condiciones de vulnerabilidad

- Molina-Perez et al. (2020) usan el PRIM (Patient Rule Induction Method) (Friedman and Fisher, 1999) para describir cuantitativamente la condición de vulnerabilidad de diferentes políticas.
- Siguiendo el método de *scenario discovery* desarrollado por Bryant and Lempert (2010), para cada régimen de política, clasifican los resultados de la simulación en dos casos de interés:
 - ▶ casos en los que se cumple el objetivo de la política.
 - ▶ casos en los que no se cumple el objetivo de la política.
- Entonces se utiliza PRIM para analizar la base de datos de simulación en grupos concisos que describen las condiciones en las que las políticas no cumplen los objetivos.

Deliberación con análisis



Robust Decision Making (RDM)



Tomado de Marchau et al (2019)

References I

- Acemoglu, D. (2002). Directed Technical Change. *The Review of Economic Studies*, 69(4):781–809.
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., and Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 102(1):131–66.
- Bryant, B. P. and Lempert, R. J. (2010). Thinking inside the box: A participatory, computer-assisted approach to scenario discovery. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(1):34–49.
- Czupryna, M., Franzke, C. L. E., Hokamp, S., and Scheffran, J. (2020). An Agent-Based Approach to Integrated Assessment Modelling of Climate Change. *JASSS-THE JOURNAL OF ARTIFICIAL SOCIETIES AND SOCIAL SIMULATION*, 23(3).
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2):182–197.

References II

- Friedman, J. H. and Fisher, N. I. (1999). Bump hunting in high-dimensional data. *Statistics and Computing*, 9(2):123–143.
- Ge, H., Xu, K., and Ghahramani, Z. (2018). Turing: A language for flexible probabilistic inference. In Storkey, A. and Perez-Cruz, F., editors, *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, volume 84 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 1682–1690. PMLR.
- Groves, D. G., Molina Perez, E., Bloom, E., and Fischbach, J. R. (2019). Robust decision making (rdm): application to water planning and climate policy. In *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice*, pages 135–163. Springer.
- Gu, G. and Wang, Z. (2018). Research on global carbon abatement driven by R&D investment in the context of INDCs. *ENERGY*, 148:662–675.

References III

- Gu, G. and Wang, Z. (2019). The Limit of Global Carbon Tax and its Climatic and Economic Effects. *COMPUTATIONAL ECONOMICS*, 53(1):169–189.
- Gu, G., Wang, Z., and Wu, L. (2021). Carbon emission reductions under global low-carbon technology transfer and its policy mix with r&d improvement. *Energy*, 216:119300.
- Gutiérrez, E. (2021). Métodos computacionales en la inferencia bayesiana.
- Heris, M. K. and Rahnamayan, S. (2020). Multi-objective optimal control of dynamic integrated model of climate and economy: Evolution in action. In *2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 1–8. IEEE.
- Molina-Perez, E. (2016). *Directed International Technological Change and Climate Policy: New Methods for Identifying Robust Policies Under Conditions of Deep Uncertainty*. Phd dissertation, Pardee RAND Graduate School, Santa Monica, CA.

References IV

- Molina-Perez, E., Esquivel-Flores, O. A., and Zamora-Maldonado, H. (2020). Computational intelligence for studying sustainability challenges: Tools and methods for dealing with deep uncertainty and complexity. *Frontiers in Robotics and AI*, 7:111.
- Srinivas, N. and Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3):221–248.