

Límites energéticos globales

Iñigo Capellán-Pérez

Curso Transporte sostenible: Perspectivas y retos

Valladolid, 10 de Noviembre 2014



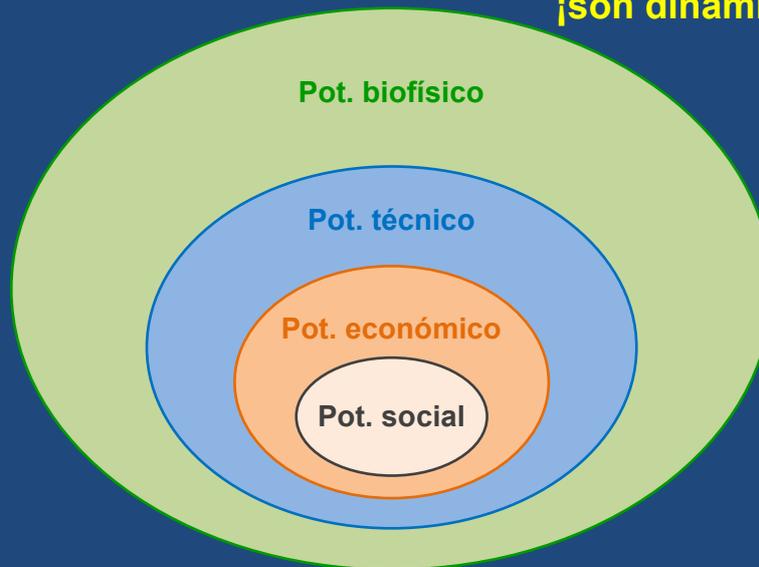
Contenidos

1. Potenciales biofísicos y técnicos - límites energéticos:
 - Fuentes no-renovables
 - Fuentes renovables
2. Integración: modelo WoLiM. Aplicación para confrontar escenarios habituales. Implicaciones
3. Una propuesta de escenario factible y deseable
4. Conclusiones

1 POTENCIALES BIOFÍSICOS Y TÉCNICOS - LÍMITES ENERGÉTICOS

3

**Potenciales extracción recursos naturales
¡son dinámicos!**



Otros: potencial sostenible

4

¿Son relevantes los potenciales biofísicos energéticos?

- Visión mayoritaria: NO (abundancia de recursos).
- ¿Por qué? -> Teoría económica neoclásica:
 - No considera el factor “Tierra”,
 - Precio como buen indicador de escasez,
 - Cuando existe escasez: transición “suave” a alternativas/sustitutos.

Pot. biofísicos
« poco » estudiados

- **No-renovables:** tendencia al optimismo/sobreestimación de recursos disponibles (ppmnt. largo plazo).

- **Renovables:** Estudios enfocados desde el punto de vista “técnico-económico”.

5

¿Son relevantes los potenciales biofísicos energéticos? (ren)

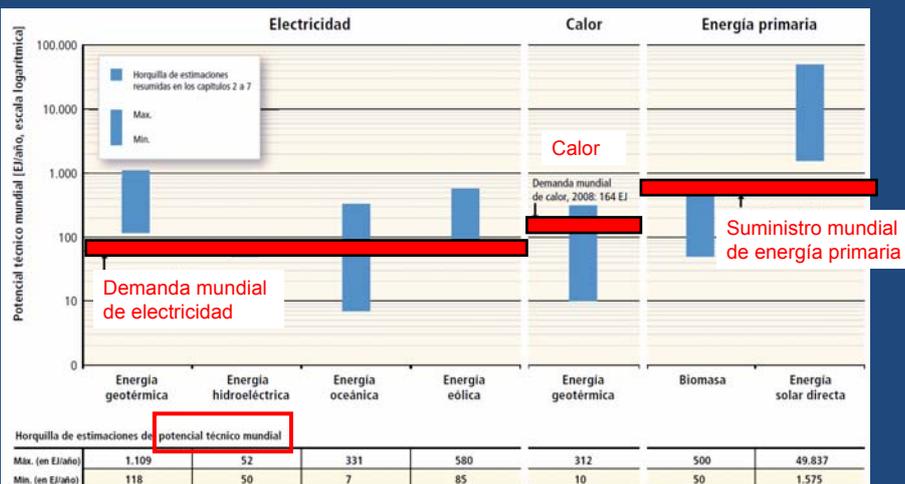
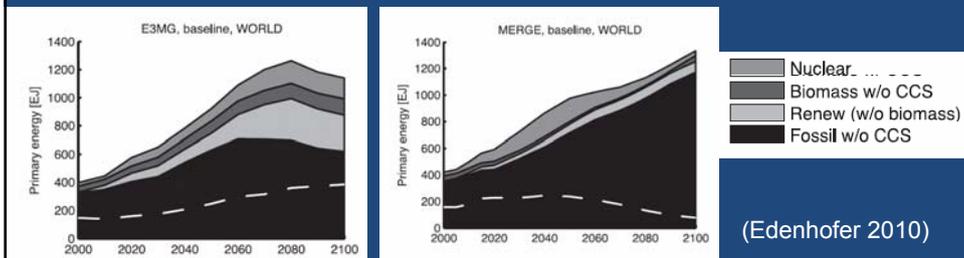


Figura RT.1.7 | Horquillas de valores del potencial técnico mundial de fuentes de energía renovables, según los estudios examinados en los capítulos 2 a 7. La biomasa y la energía solar figuran como energías primarias debido a sus múltiples usos. Obsérvese que la figura está representada en escala logarítmica, debido a la gran diversidad de datos examinados.

(IPCC SRREN 2011)

6

¿Son relevantes los potenciales biofísicos energéticos? (no-ren)



TRANSICIONES ENERGÉTICAS DIRIGIDAS POR LA DEMANDA

- Largo plazo (ej. Cambio Climático): *“Es evidente que, en ausencia de políticas climáticas, ninguno de los escenarios SRES anticipa un final prematuro de la edad de los combustibles fósiles”* (IPCC SRES, 2000)

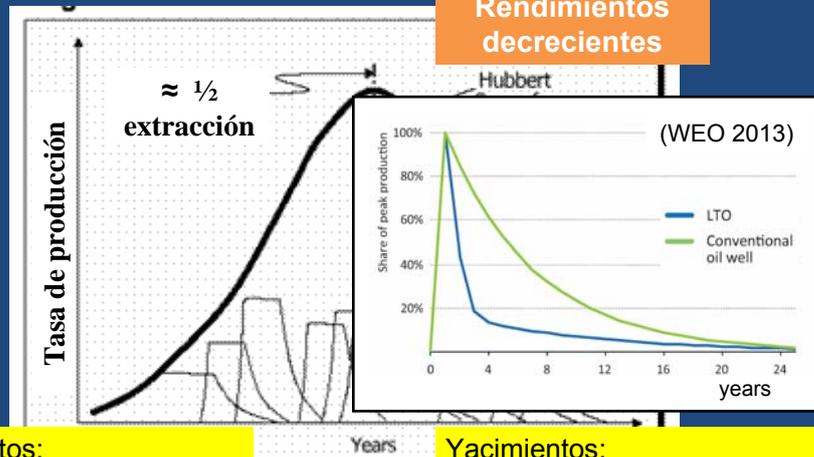
7

LÍMITES ENERGÉTICOS NO RENOVABLES

8

Agotamiento recursos no-renovables

Rendimientos decrecientes



Yacimientos:

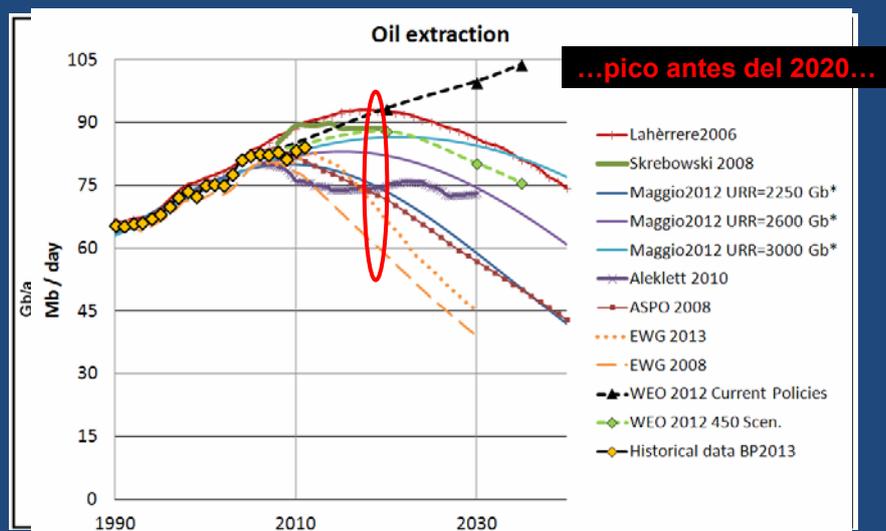
- grandes + «fáciles»
- Alta rentabilidad (E & €)
- Energía barata

Yacimientos:

- pequeños + «difíciles»
- Baja rentabilidad (E & €)
- Energía cara

9

Petróleo (I)



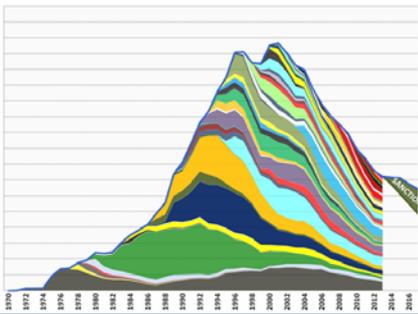
(Capellán-Pérez et al., 2014a)

10

Petróleo (II)

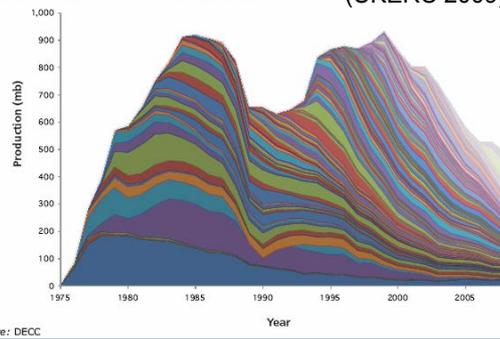
- Algunos ejemplos de pico de origen exclusivamente geológico:

NORWAY, CRUDE OIL PRODUCTION 1970 - 2013
AND A FORECAST TOWARDS 2040 WITH SANCTIONED DEVELOPMENTS ANL
ACR1048185181.MP3



Noruega
(pico: 2001)

Figure 1.6 Oil production in the UKCS by field (UKERC 2009)



UK
(pico: 1999)

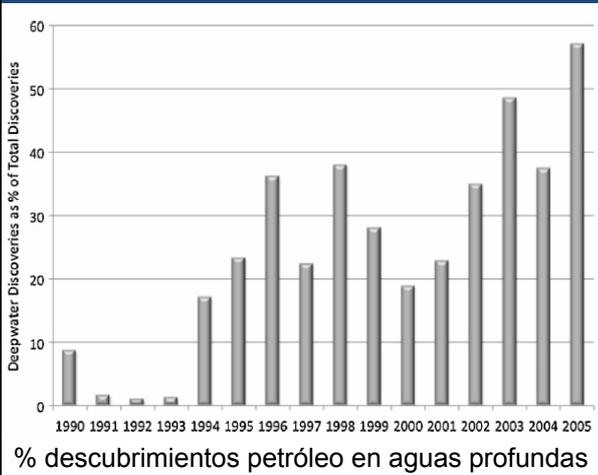
11

Petróleo (III)

... de "fácil" a "difícil":

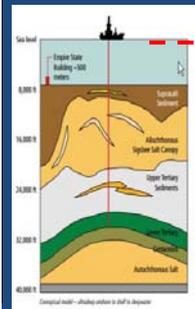


8,8 km



% descubrimientos petróleo en aguas profundas

(Jackson2009)



12 km

12

Petróleo (IV)

... de “fácil” a “difícil”:

¡+ riesgos!

¡+ presión
sobre reservas
restantes!



13

Petróleo (V)

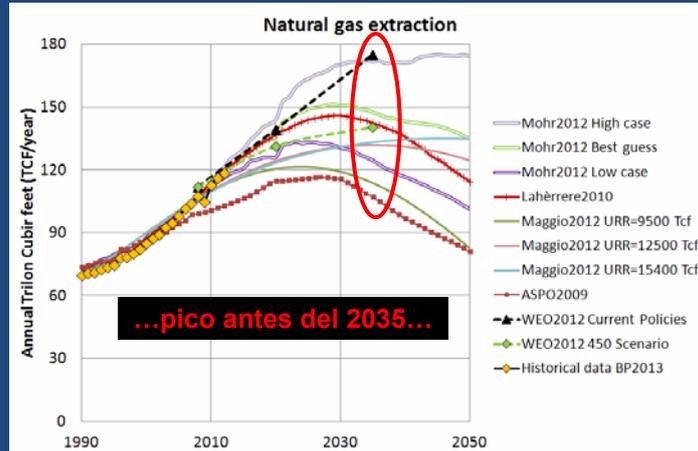
... de “barato” a “caro”:



14

Gas Natural

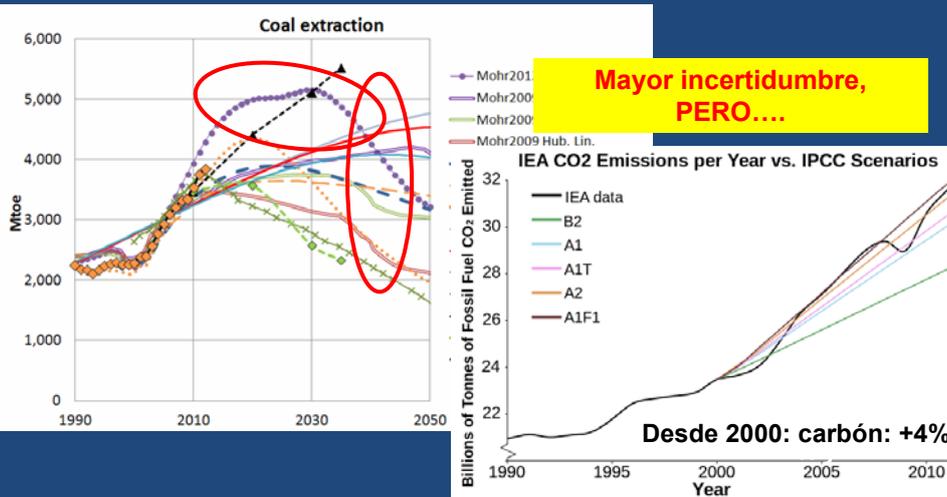
- Geología similar al petróleo (+ fracking)



(Capellán-Pérez et al., 2014a)

15

Carbón



(Capellán-Pérez et al., 2014a)

16

Tendencia a la sobreestimación de recursos/reservas (I)

- Recursos/Reservas: Agencias internacionales recogen datos nacionales → estos datos no son rigurosos:
 - Recursos estratégicos: falta de transparencia
 - No existen definiciones estándar (fuels, probabilidades, unidades, etc.)
 - Gran incertidumbre en los datos!

3 ejemplos

- Petróleo
- Petróleo no convencional
- Carbón

17

Tendencia a la sobreestimación de recursos/reservas (II)

3 ejemplos

- Petróleo
- Petróleo no convencional
- Carbón

Estimaciones antiguas (1970s) sujetas a gran incertidumbre.

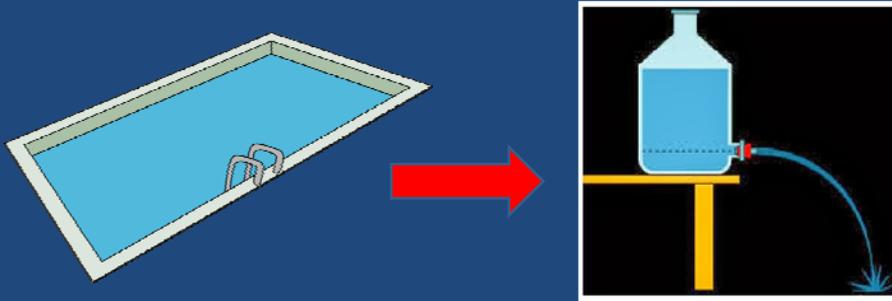
Cada vez que un país revisa sus reservas con métodos más rigurosos, las rebaja significativamente:

- **Sudánica**: -40 % (BP 2008).
- **USA**: -80% (USGS 2009).

18

Resumiendo:

- Metodologías habituales:
 - Sobreestiman el recurso disponible (**el tamaño del depósito**)
 - Ignoran la existencia de límites geológicos en la extracción (**el grifo**)



19

LÍMITES ENERGÉTICOS RENOVABLES

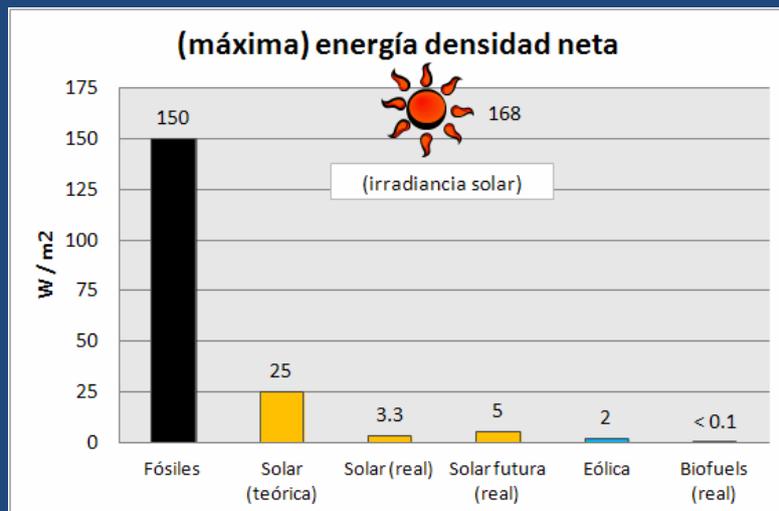
20

Límites biofísicos



21

Límites biofísicos y técnicos



(de Castro et al 2011, 2013a, 2013b)

22

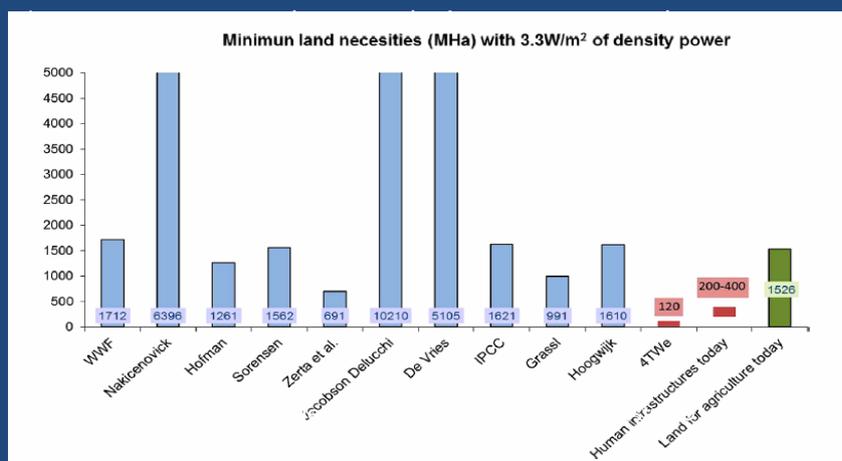
Eólica

- Encontramos estimaciones de potenciales máximos en la literatura que no tienen en cuenta la interacción entre molinos (conservación energía):
 - Lu 2008 (78 TW), Archer-Jacobson (72TW), Caldeira-Jacobson (1500TW)
 - Potencia total disipada por toda la atmósfera en los 200m más cercanos a la superficie: **100TW (pot. biofísico)**
 - ¿"Sorpresas" estilo Cambio Climático?
 - **Potencial técnico: 1TW** (frente a los actuales 0,06TW de potencia eólica y los 17TW de potencia total consumida)

(de Castro et al 2011)

23

Solar (I)



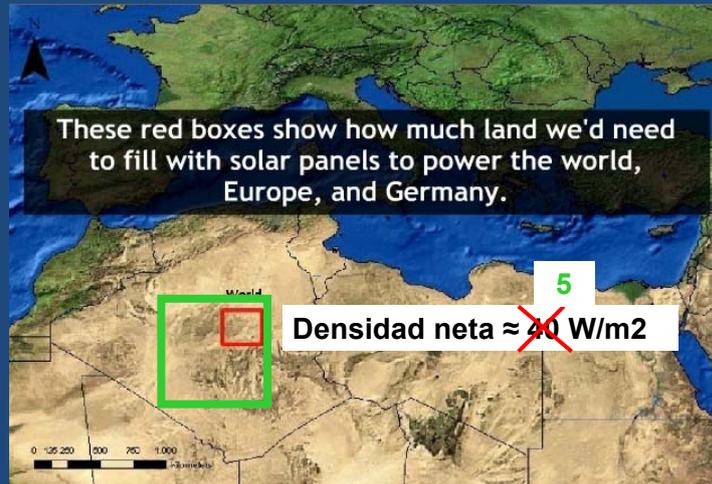
• ¿Potencial máximo realista? 60 – 120 Mha → 2 – 4 TW_e

(de Castro et al 2013b)

24

Solar (II)

- Otra manera de verlo:



25

Biocombustibles

- **Baja Tasa de Retorno Energético:** 5 (etanol Brasil), 1,25 (etanol de maíz), 3 (aceite de palma), 1,5 (soja, trigo en China)
- **Muy elevada ocupación de terreno (tierra fértil):** 0.073W/m² netos frente a los 2.8W/m² de la energía fotovoltaica
- **Tierra para biocombustibles para los coches actuales:** 3000Mha (tierra arable en el mundo 1520 Mha)
- **Huella ecológica** mucho mayor que la de los combustibles fósiles: > 2.87 Ha/pc frente a 1,47 Ha/pc (si 12TW de energía fueran sustituidos por biocombustibles)
- **Límite razonable:** < 0,1 TW ? (100 Mha de 1500 Mha arables) < 2% consumo actual de combustibles líquidos

(de Castro et al 2013b)

26

Límites de las energías renovables

- Límites absolutos:
 - **Eólica** (pot. técnico): 1 TWe,
 - **Solar** (pot. “razonable”): 2 – 4 TWe,
 - **Resto** (pot. técnico): < 1 TWe

4 – 6
TWe

- **Límites temporales: la transición**

27

2

INTEGRACIÓN: MODELO WOLIM.

**APLICACIÓN PARA CONFRONTAR
ESCENARIOS HABITUALES.**

IMPLICACIONES

28

Modelo WoLiM: ¿qué futuro no es posible?

- Puesto que las agencias internacionales políticamente influyentes (OECD, IMF, AIE, IPCC, etc.) no toman en cuenta estas restricciones:

P1: ¿cuáles de los escenarios de futuro que plantean son compatibles con estas restricciones a la transición energética?

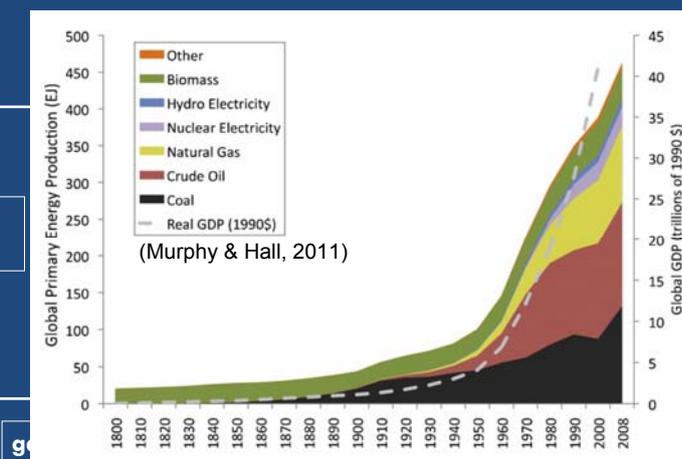
P2: ¿qué implicaciones se pueden derivar?

29

Modelos: ¿qué futuro no es posible?

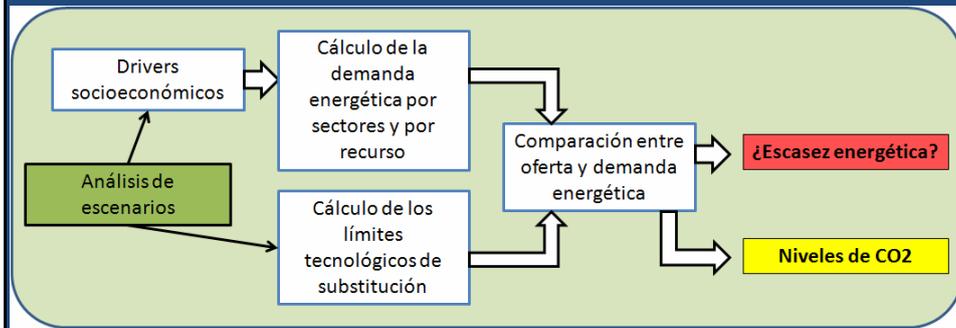
Economía-energía

petróleo



30

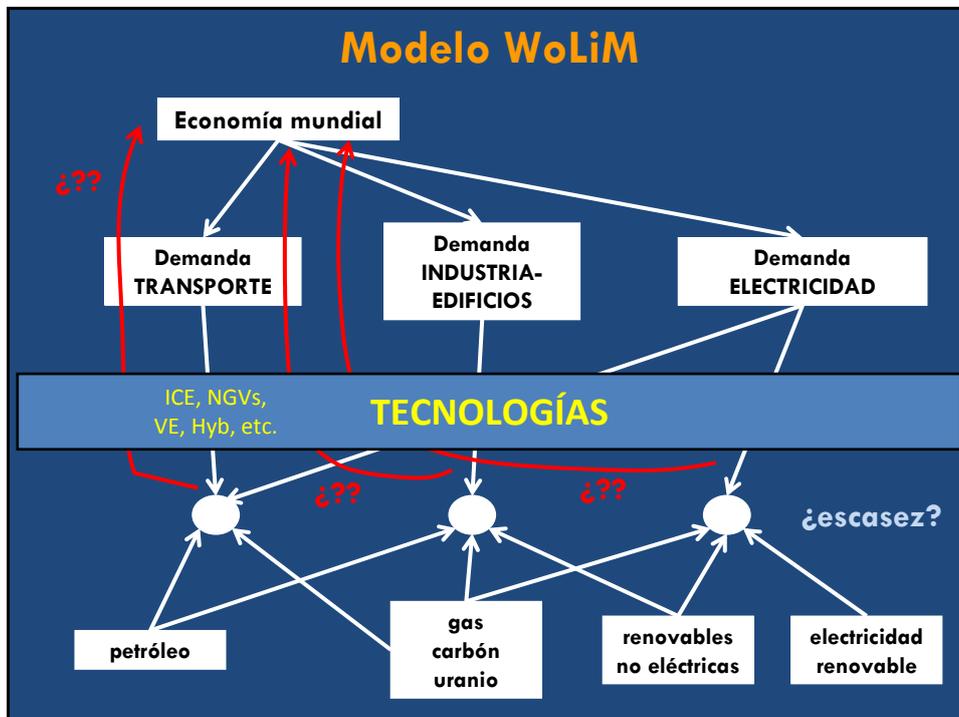
Modelo WoLiM



(Capellán-Pérez et al 2014a)

31

Modelo WoLiM

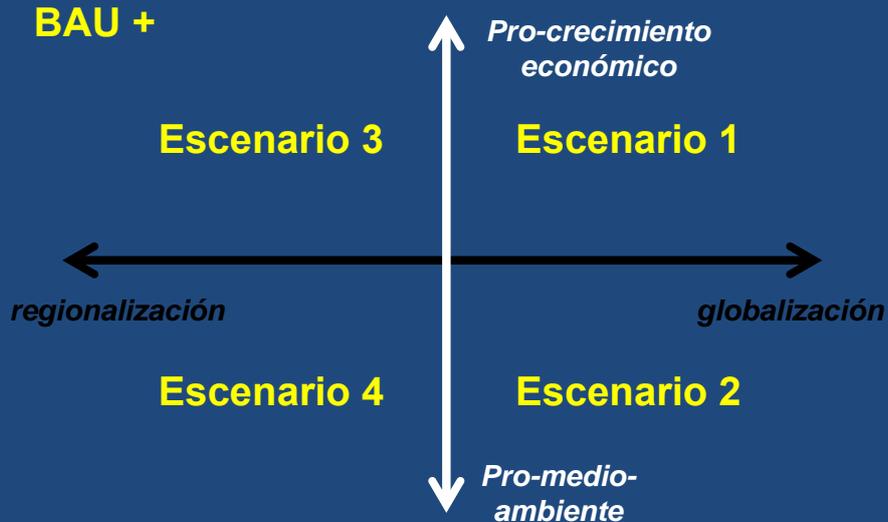


Modelo WoLiM. Políticas

	Variables exógenas
Socio-economía	PIB per capita
	Población
Mejoras de eficiencia sectoriales	$a_{Transp}, a_{elec}, a_{BI}, I_{min}$
Potencial extracción de recursos energéticos	No-renovables
	CTL, GTL
Renovables eléctricas	Solar FV&CSP, eólica, hydro, geotérmica, bioenergía, y residuos,
Nuclear	
BioEnergía	2ª/3ª generación, biofuels
Mejora de eficiencias por introducción de renovables	Sector Industrial e Inmuebles
Transporte alternativo	Eléctrico, Híbrido y de Gas Natural
Programas de aforestación (captura de carbono)	

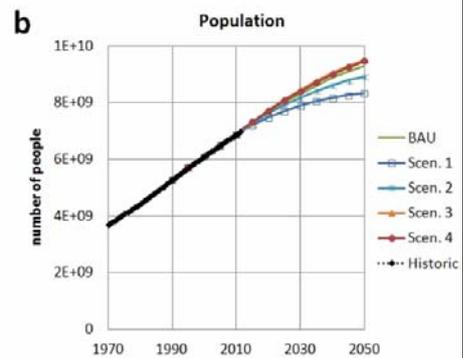
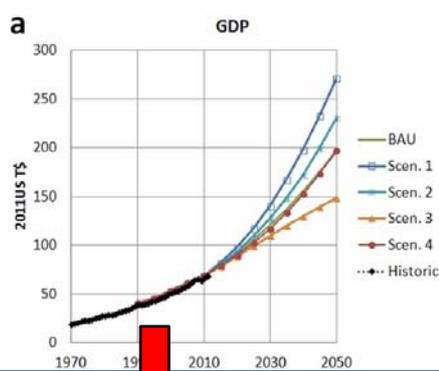
Modelo WoLiM. 5 Escenarios

BAU +



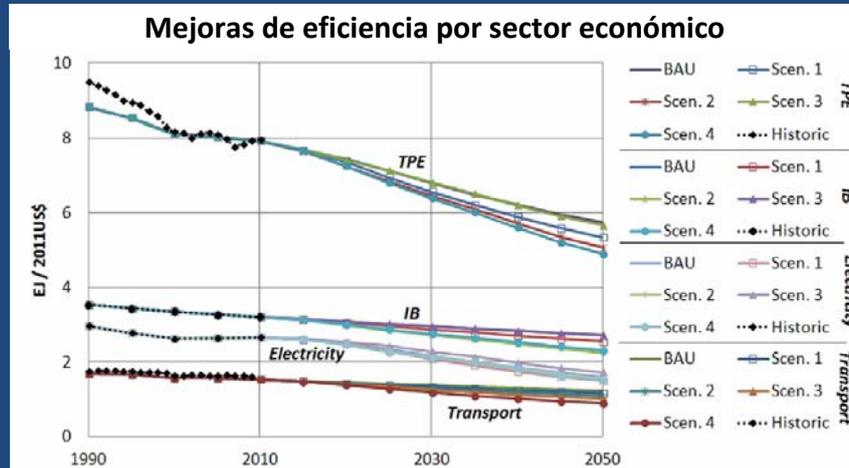
RESULTADOS

Socio-economía (I)

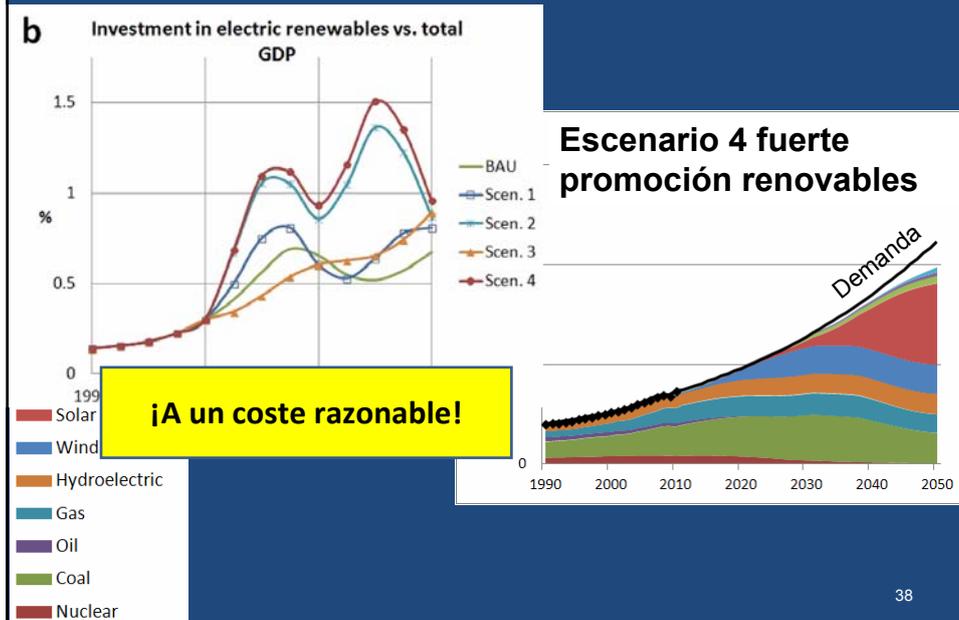


Visión imperante: crecimiento económico como motor de desarrollo y bienestar.

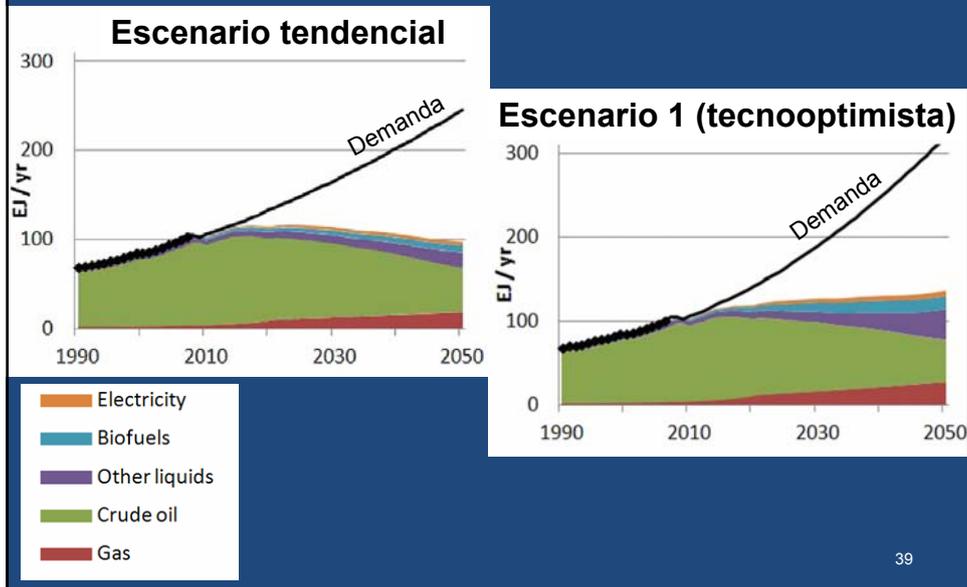
Socio-economía (II)



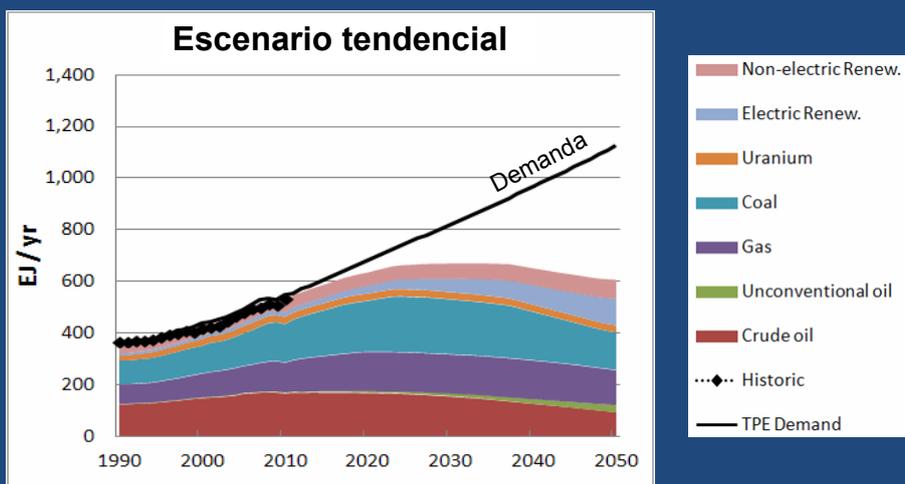
Electricidad



Transporte

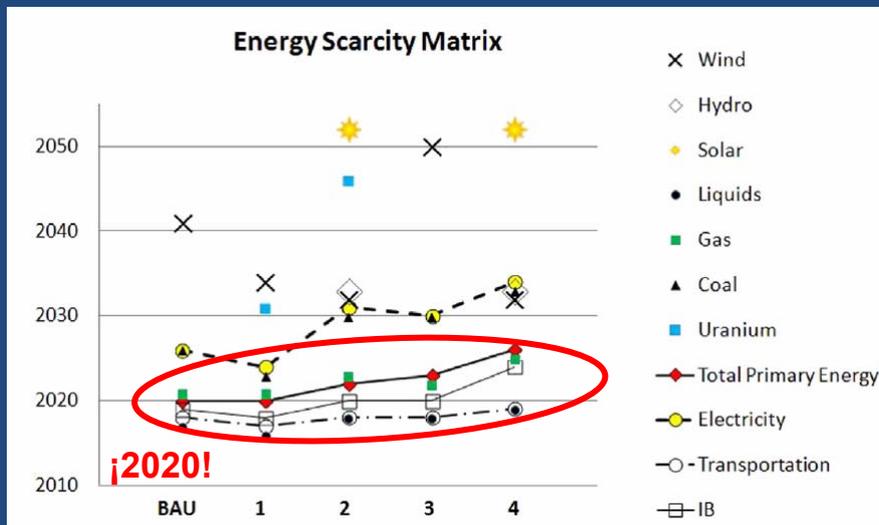


Energía total: tendencial (BAU)



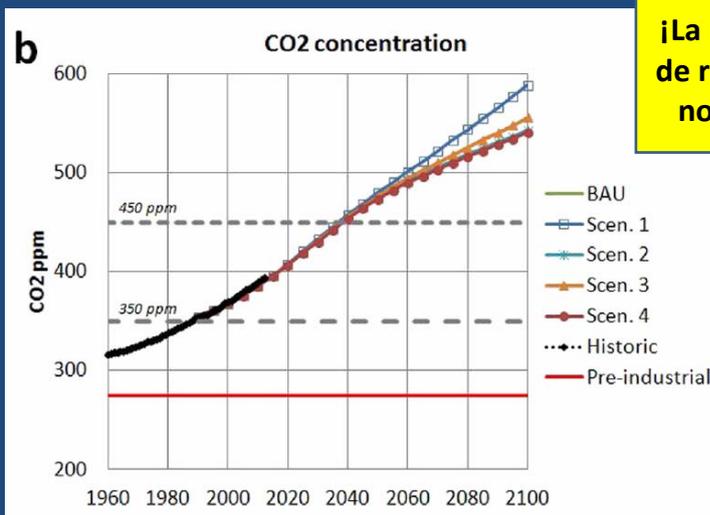
La tendencia pasada (+2.6% anual) no puede ser mantenida en ningún escenario.

Años de ruptura



41

Cambio climático



¡La restricción de recursos no nos librerá!

42

LIMITACIONES MODELADO

- Estudio de energía primaria. Mejor: energía final neta (tras pérdidas y EROEI):
 - Declive energía neta: mecanismo de colapso dominante en el escenario BAU del WORLD3.
- No contabiliza otros recursos: por ejemplo agua, materiales (e.g. cobre, fósforo, etc.)
- No consideración de otros problemas y sus realimentaciones (e.g. huella ecológica, biodiversidad, ciclo N, etc.)
- **La omisión de restricciones implica la obtención de una solución optimista.**

43

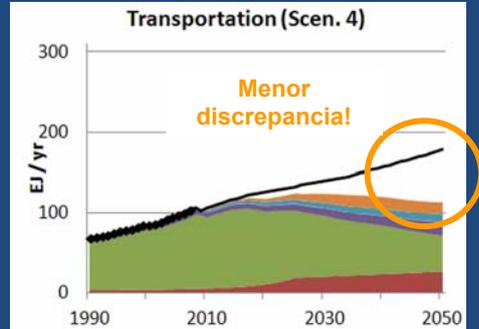
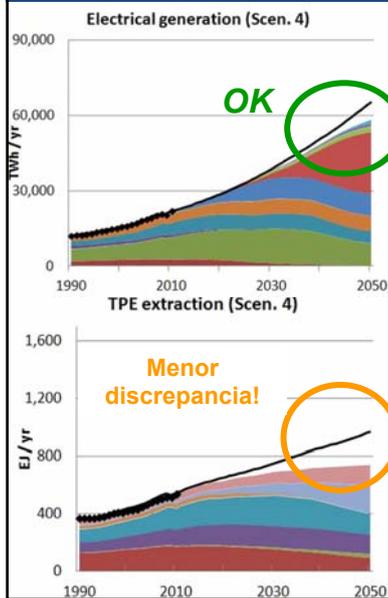
P2: IMPLICACIONES

- La reducción de producción fósil sólo puede ser parcialmente compensada por la combinación de energías renovables, políticas alternativas y mejoras en eficiencia.
- **Del set de escenarios habitualmente planteados, ninguno parece factible.**
- PERO...

44

Escenario 4 tiene la clave

(*Regionalización + pro-medioambiente*)



1. Fuerte crecimiento energías renovables
2. Escenario de desglobalización (menor transporte)
3. “Bajo” crecimiento GDP

45

3

UNA PROPUESTA DE ESCENARIO
FACTIBLE Y DESEABLE

46

Imaginando un escenario factible y deseable

sostenible y equitativo a nivel mundial

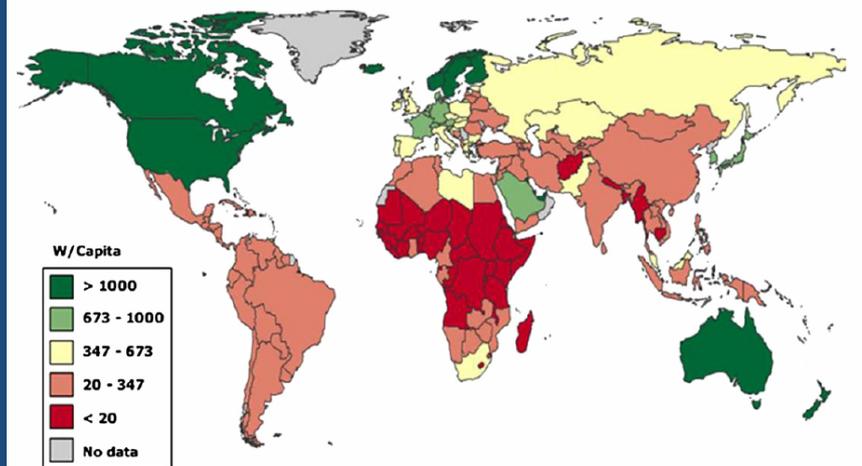
4 CARACTERÍSTICAS CLAVE:

1. Adaptación a las limitaciones energéticas,
2. Cambio Climático en niveles “no peligrosos”,
3. Estado Estacionario: GDP no podrá crecer mucho más:
 1. Vínculo energía disponible – GDP,
 2. Reducción absoluta de los impactos sobre la biosfera.
4. Supresión desigualdades en consumo de energía.

47

Desigualdades acceso energía

Total Average Electrical Power Consumed (2005)

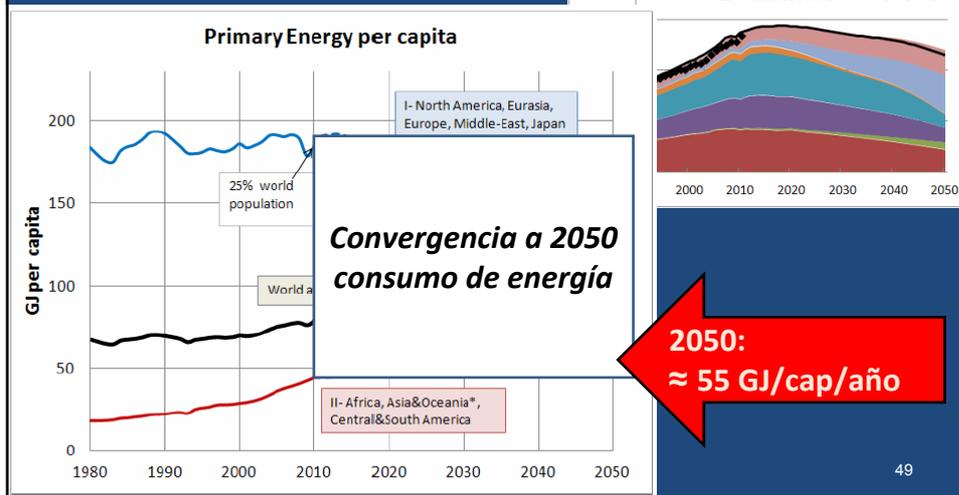


(Mechtenberg, 2012)

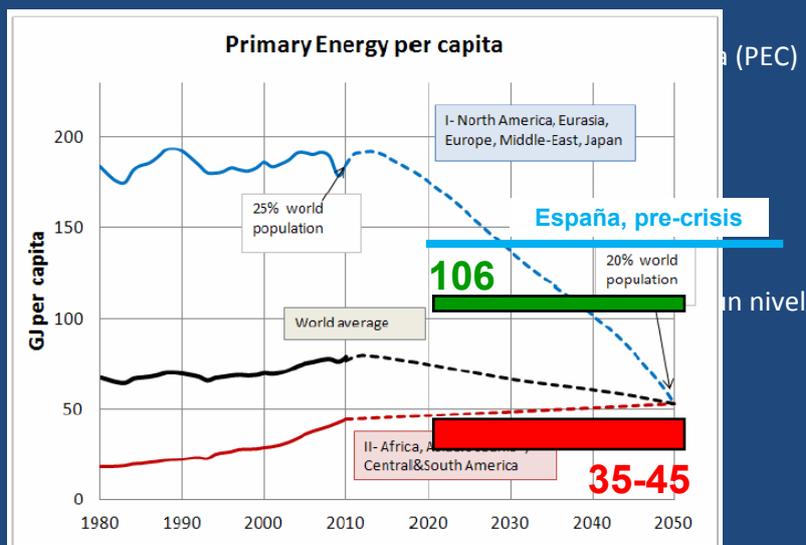
48

Resultados: convergencia uso energía

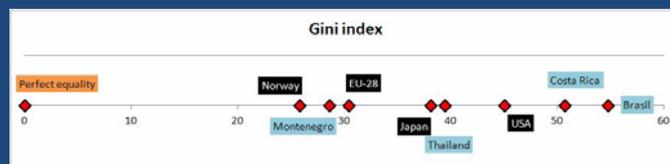
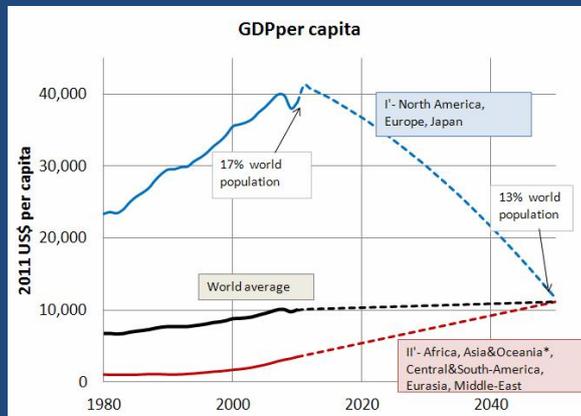
(Capellán-Pérez et al., 2014b)



¿Qué tal se vive hoy con 55 GJ/cap/año?



Resultados: convergencia GDP



(Capellán-Pérez et al., 2014b)

51

¿Qué tal se vive hoy con 55 GJ/cap/año o 11,500 \$/cap/año?

- **HDI**: mide el desarrollo humano de un país, elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); compuesto por tres parámetros: vida larga y saludable, educación y nivel de vida digno (PIB ppa).

(2011)	HDI
Montenegro	0.791
Uruguay	0.789
Costa Rica	0.77
Lebanon	0.744
Macedonia (FYR)	0.738
Brazil	0.728
Thailand	0.686
Gabon	0.679

HDI > 0.8:
"Desarrollado"

52

4 CONCLUSIONES

53

CONCLUSIONES

- Próximas décadas: **declive de las fósiles** (petróleo → gas → carbón),
- Es muy dudoso que las energías renovables puedan cubrir el hueco dejado por las fósiles y **mantener el actual modelo socioeconómico**,

Escenario de igualdad al acceso a la energía muestra que:

- Los **países desarrollados deberán decrecer** en su consumo de energía para que los más desfavorecidos puedan incrementar su parte,
- No es previsible que el flujo energético per capita a mediados de siglo sea suficiente para soportar **un nivel de vida alto (actual modelo socioeconómico)** para toda la población mundial,
- Es posible cubrir las **necesidades básicas** de toda la población.

→ **Crisis sistémica**: soluciones tecnológicas son necesarias pero no suficientes. **Cambio de sistema**: cambios culturales, sociales, infraestructuras, modos de consumo, etc.

54



MUCHAS GRACIAS

Iñigo Capellán-Pérez, Low Carbon Programme, Universidad del País Vasco
inigo.capellan@ehu.es

55

REFERENCIAS (I)

ASPO. "ASPO Newsletter N. 100," 2009. <http://www.aspo-ireland.org>.

BP: [Statistical Review of World Energy](#). British Petroleum

Capellán-Pérez et al (2014a): "[Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: an integrated approach](#)". Accepted for publication in *Energy*.

Capellán-Pérez et al (2014b): "[More growth? An unfeasible option to overcome critical energy constraints and climate change](#)". Accepted in the Call for papers: "Special issue on Framing Degrowth: from diagnosis to development alternatives".

Dale, Michael, and Sally M. Benson. "[Energy Balance of the Global Photovoltaic \(PV\) Industry - Is the PV Industry a Net Electricity Producer?](#)" *Environmental Science & Technology* 47, no. 7 (Abril 2013): 3482–89. doi:10.1021/es3038824.

De Castro, C. et al., "[Global Wind Power Potential: Physical and Technological Limits.](#)" *Energy Policy* 39, no. 10 (October 2011): 6677–6682. doi:10.1016/j.enpol.2011.06.027.

De Castro, C. et al., "[Global Solar Electric Potential: A Review of Their Technical and Sustainable Limits.](#)" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28 (Diciembre 2013): 824–835. doi:10.1016/j.rser.2013.08.040.

De Castro, C. et al., "[A Top-down Approach to Assess Physical and Ecological Limits of Biofuels.](#)" *Energy*. Accessed December 11, 2013. doi:10.1016/j.energy.2013.10.049.

Edenhofer, O. et al. "[The Economics of Low Stabilization: Model Comparison of Mitigation Strategies and Costs.](#)" *The Energy Journal* 31, no. 01 (September 1, 2010). doi:10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol31-NoSI-2.

REFERENCIAS (II)

May, Nadine. "Eco-Balance of a Solar Electricity Transmission from North Africa to Europe." *Technical University of Braunschweig*, August 17 (2005).

Mechtenberg, Abigail R., Kendra Borchers, Emanuel Wokulira Miyingo, Farhan Hormasji, Amirtha Hariharan, John Vianney Makanda, and Moses Kizza Musaazi. "Human Power (HP) as a Viable Electricity Portfolio Option below 20 W/Capita." *Energy for Sustainable Development* 16, no. 2 (June 2012): 125–45. doi:10.1016/j.esd.2011.12.006.

Mediavilla, Margarita, Carlos de Castro, Iñigo Capellán, Luis Javier Miguel, Iñaki Arto, and Fernando Frechoso. "The Transition towards Renewable Energies: Physical Limits and Temporal Conditions." *Energy Policy* 52 (January 2013): 297–311. doi:10.1016/j.enpol.2012.09.033.

Murphy, David J., and Charles A. S. Hall. "Energy Return on Investment, Peak Oil, and the End of Economic Growth." *Annals of the New York Academy of Sciences* 1219, no. 1 (February 1, 2011): 52–72. doi:10.1111/j.1749-6632.2010.05940.x.

Rockström, J. et al. "A Safe Operating Space for Humanity." *Nature* 461, no. 7263 (September 23, 2009): 472–75. doi:10.1038/461472a.

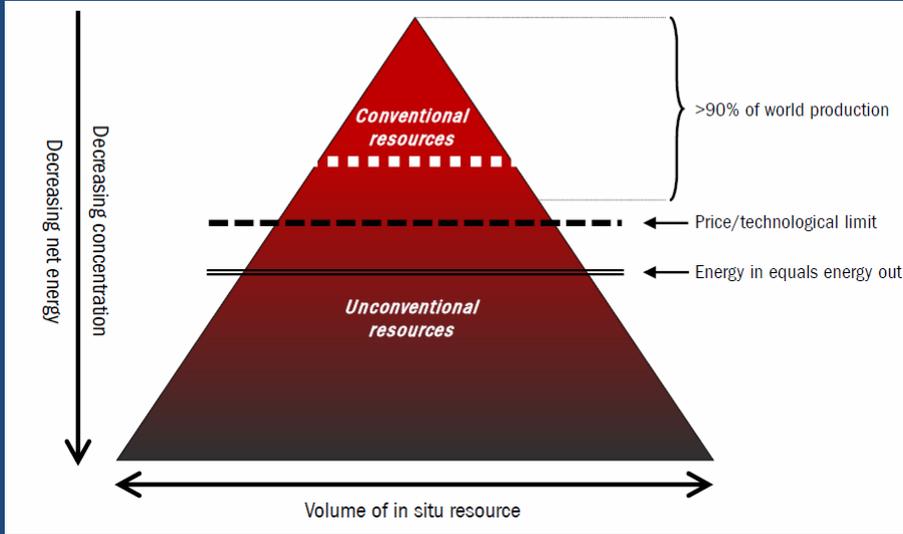
Sorrell, S. et al., *Global Oil Depletion. An Assessment of the Evidence for a near-Term Peak in Global Oil Production*. USpecial Report on Emissions ScenariosK Energy Research Centre, August 2009.

USGS. "The National Coal Resource Assessment Overview." Edited by B.S. Pierce and K.O. Dennen. *US Geological Survey Professional Paper 1625-F*, 2009, 402.

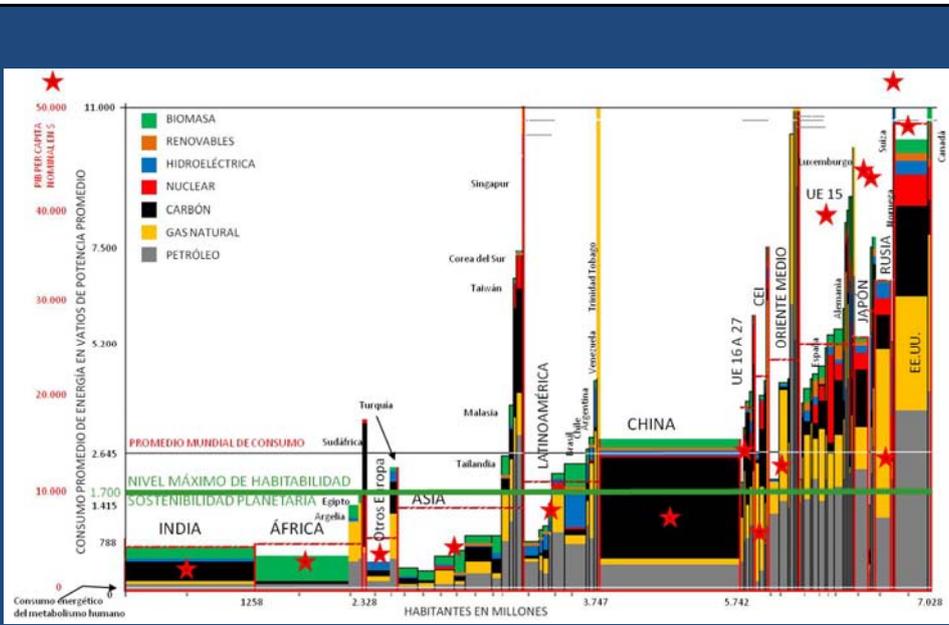
WEO: *World Energy Outlook* (IEA)

APÉNDICE

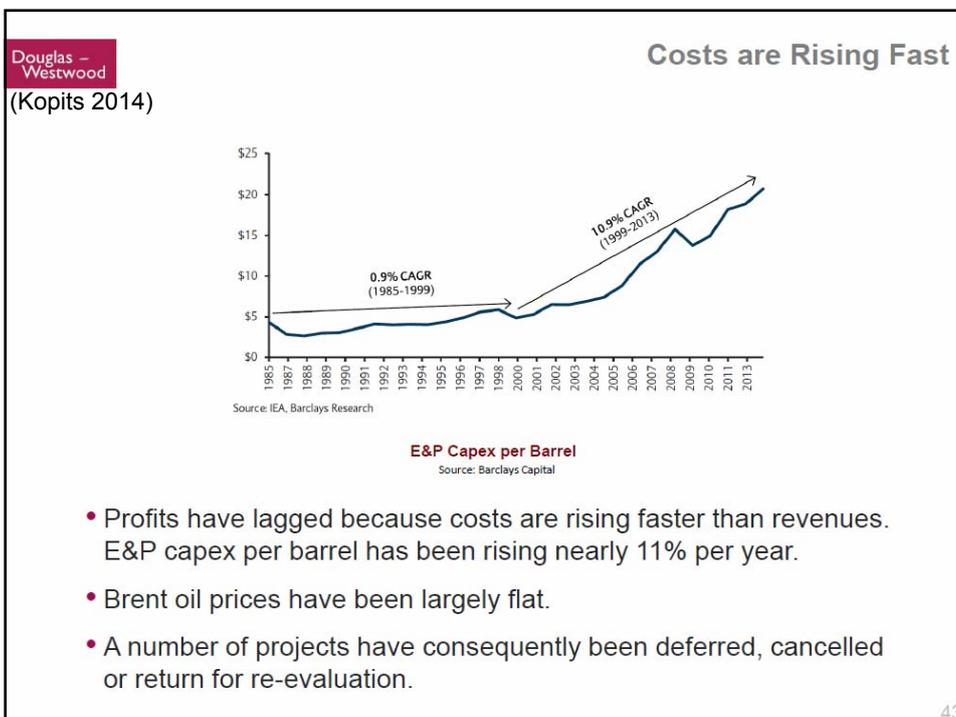
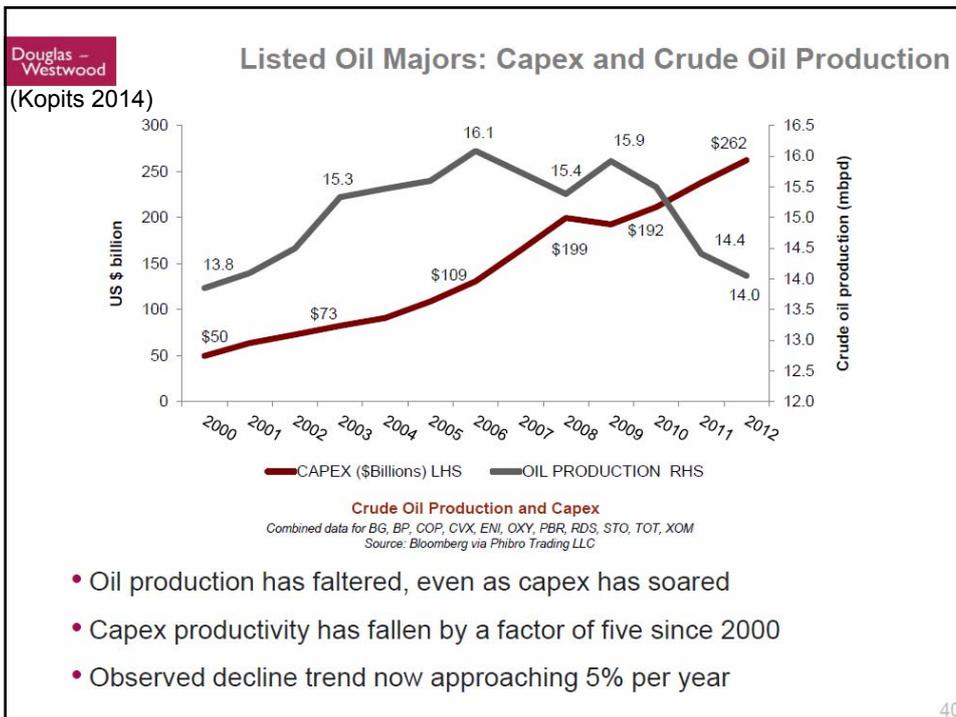
Recursos energéticos no-renovables



(Hughes 2013 "Drill Baby Drill")

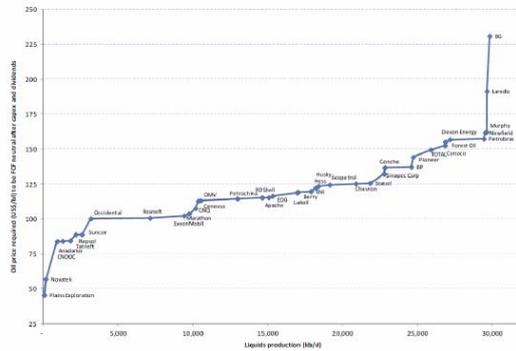


Fuente: Pedro Prieto



(Kopits 2014)

The Industry Needs \$100+ Oil Prices



Oil Price Required by Oil Companies to be Free Cash Flow Neutral After Capex and Dividends

Source: Goldman Sachs

- Costs have outpaced revenues by 2-3% per year. Profitability is down 10-20%.
- The vast majority of public oil & gas companies require oil prices of over \$100/bbl to achieve positive free cash flow under current capex and dividend programs
- Nearly half of the industry needs more than \$120/bb. The 4th quartile, where most US E&Ps cluster, needs \$130/bbl or more.

Shale Gas in USA: wells vs. production

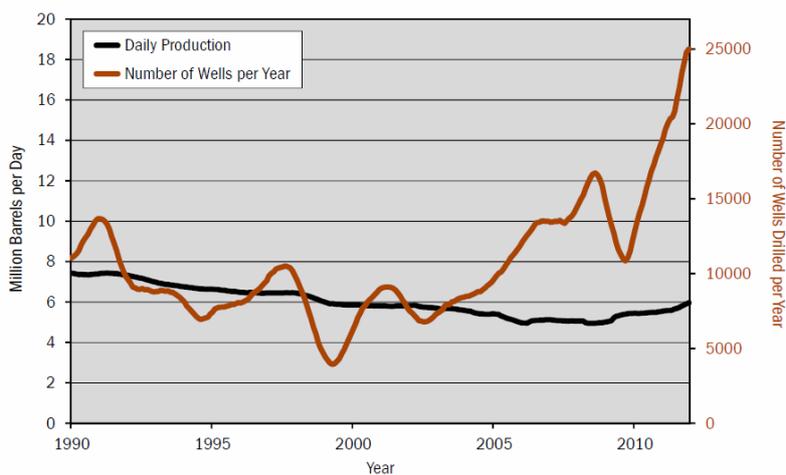


Figure 15. U.S. annual oil well drilling rate and overall oil production, 1990-2012 (12-month centered moving average).²⁰

Drilling rates have increased by 159% since early 2005.

Tight Oil in USA: outlook

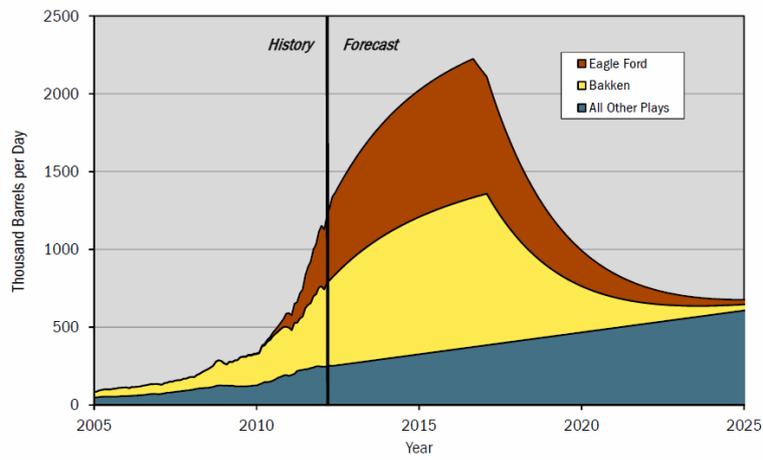
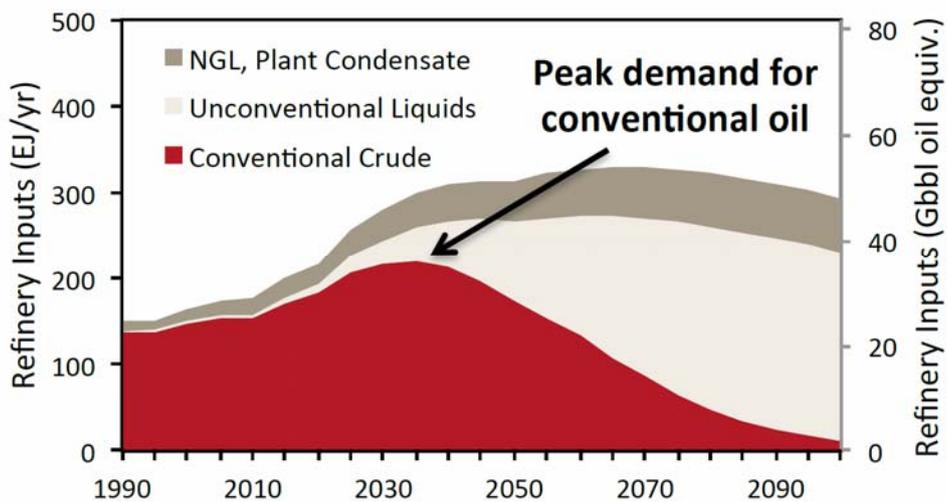


Figure 80. Projection of tight oil production by play in the U.S. through 2025.

Based on vintaged type curve production, the number of drilling locations projected by the EIA for the Bakken and Eagle Ford plays, and the assumption of continued recent growth rates in the other plays.

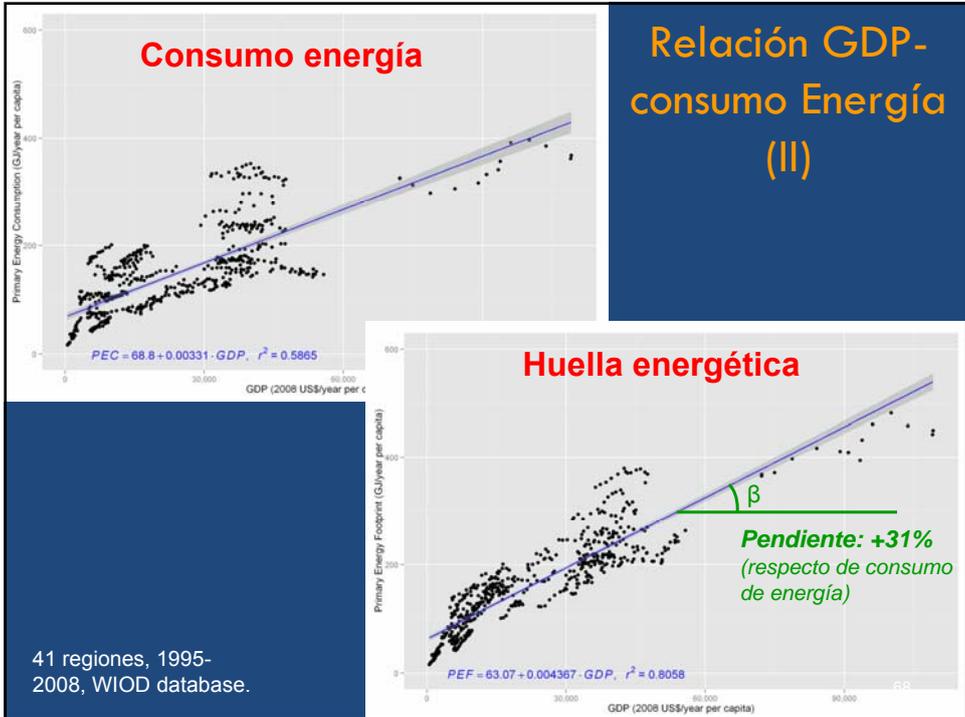
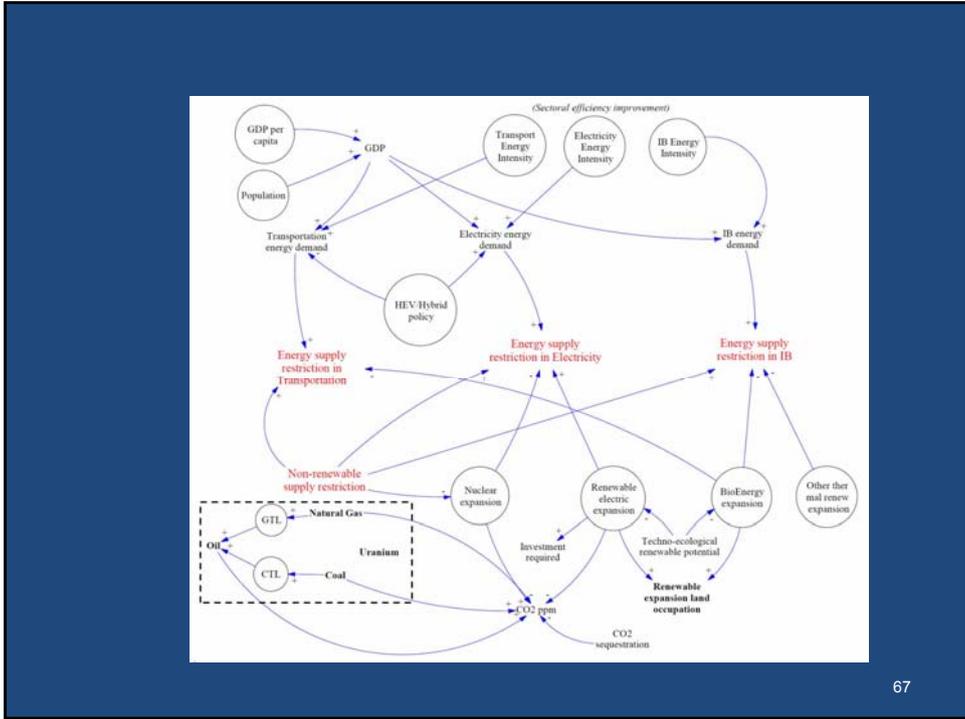
(Hughes 2013)

65

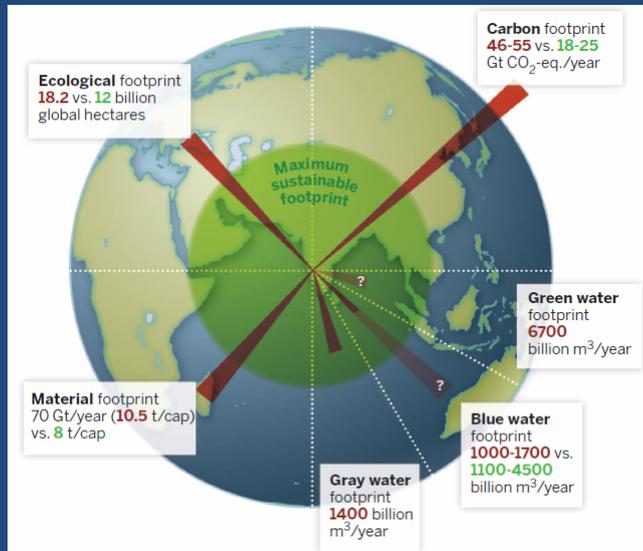


(Brandt et al., 2013)

66



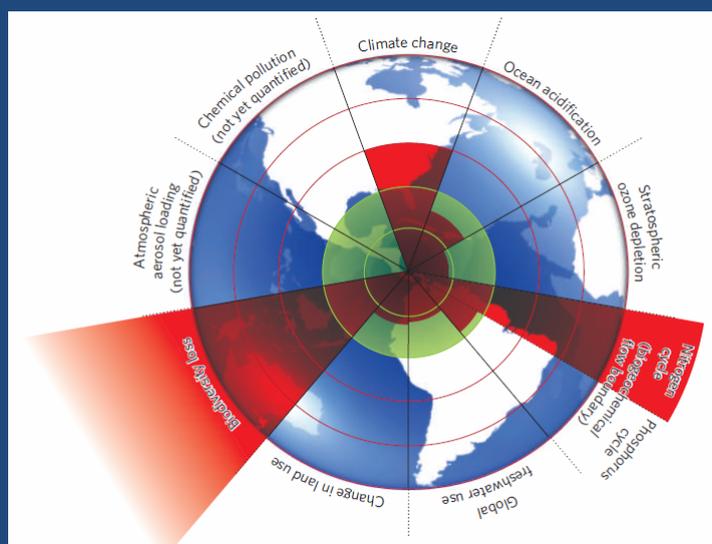
Contextualizando la crisis energética: Huellas ecológicas



(Hoekstra 2014)

69

Contextualizando la crisis energética: Límites planetarios

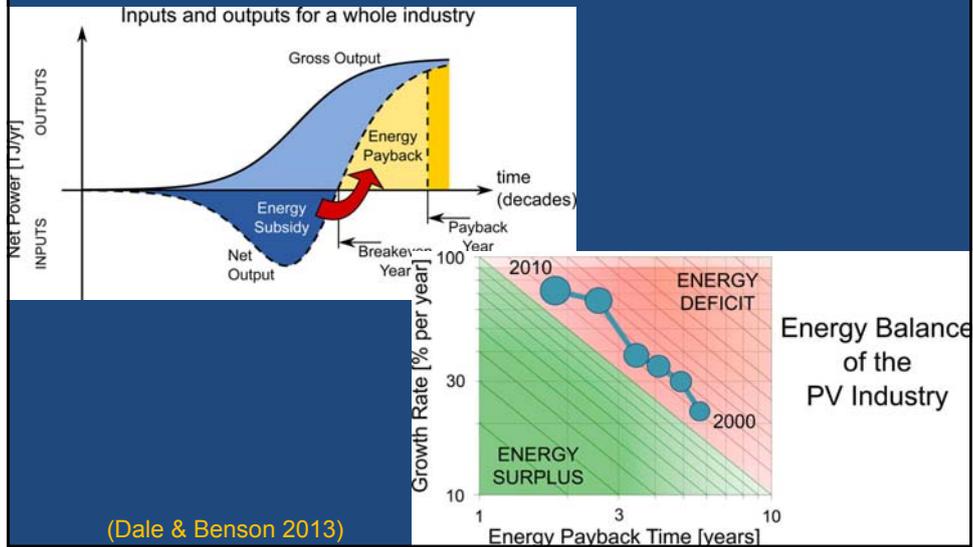


(Rockström 2009)

70

Solar (III)

- Otra manera (más) de verlo:



Modelo WoLiM. Políticas

	Exogenous variables
Socioeconomic	GDPcap Population
Sectoral efficiency improvements	$a_{Transp}, a_{elec}, a_{Bl}, I_{min}$
Resource availability	Non-renewables CTL, GTL
Electric renewables	Solar FV&CSP, Wind, Hydroelectric, Geothermal, Bioenergy&Waste, Oceanic
Nuclear	
BioEnergy	2nd generation, 3rd generation, Residues
Thermal renewables & efficiencies	Industrial sector, Buildings sector
Alternative transport	HEV & Hybrid, NGVs

<http://breakingenergy.com/2013/08/13/oil-gas-reserves-dont-compare-apples-with-oranges/>

PROVED DEVELOPED: The fish is in the boat. You have weighed him. You can smell him and you will eat him.

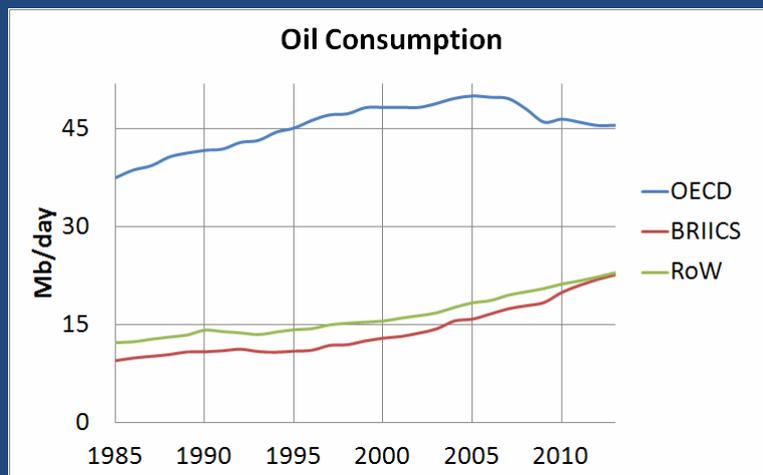
PROVED UNDEVELOPED: The fish is on your hook in the water by the boat and you are ready to net him. You can tell how big he looks (they always look bigger in the water).

PROBABLE: There are fish in the lake. You may have caught some yesterday. You may even be able to see them, but you have not caught any today.

POSSIBLE: There is water in the lake. Someone may have told you there are fish in the lake. You have your boat on the trailer but you may go play golf instead.

PROSPECTIVE RESOURCES (WILDCAT): You have heard that a lake is going to be built somewhere, but are not sure and decide to buy a piece of property and build a cabin on the riverside where you hope the lake will be and dream about it going up in value, dividing up the lots and making a killing when you do.

Arlen Edgar, 2013 73



74

Sintetizando: Huella ecológica

