



# OBSERVATORIO AMBIENTAL ARGENTINO



## INFORME III

### La paradoja de Jevons obliga a salir de una espiral perturbadora

Sobre como la mejora de la eficiencia impulsa el consumo e impide la sustentabilidad



# AZARA

DESCUBRÍ TU ESPÍRITU EXPLORADOR

[www.fundacionazara.org.ar](http://www.fundacionazara.org.ar)



# La paradoja de Jevons obliga a salir de una espiral perturbadora

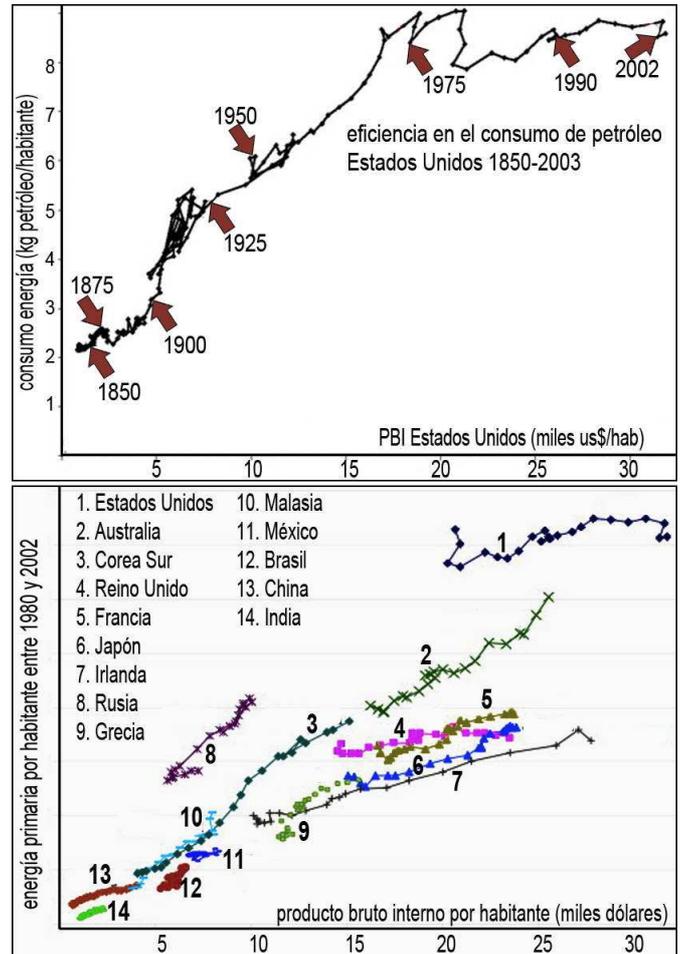
Sobre como la mejora de la eficiencia impulsa el consumo e impide la sustentabilidad

**La máquina de vapor y el consumo de carbón.** La Revolución Industrial fue posible gracias a la máquina de vapor a carbón. La máquina de T. Newcomen (1712) consistía en 3 etapas verticales: un horno a carbón que calentaba agua hasta estado de vapor, un circuito de conducción del vapor hacia el cilindro y un émbolo que se movía verticalmente y activaba una rueda. El resultado era un sobrecalentamiento que obligaba a detener la producción para enfriar la máquina. Medio siglo más tarde, J. Watt introdujo varias modificaciones, entre ellas un circuito de condensación del vapor y enfriamiento que mantenía la máquina funcionando en forma continua. Esta mejora permitió una mayor eficiencia en el uso de carbón, hecho que fue estudiado por W. Jevons un siglo más tarde. En el libro "La cuestión del carbón" (1865), se plantea una paradoja llamada "efecto rebote". Dice: aumentar la eficiencia disminuye el consumo instantáneo, pero incrementa el uso del modelo, lo que provoca un incremento del consumo total. En otras palabras: hay una disminución del impacto por cada unidad, que se anula por el aumento del total de unidades consumidas (es el rebote).

Los industriales y algunos movimientos ecologistas ponen las esperanzas en el aumento de la eficiencia en el uso de la energía para lograr una reducción de las emisiones de gases efecto invernadero y contener el calentamiento climático. ¿Es esto posible?, o como sugiere el estudio de Jevons cualquier mejora en la eficiencia será un acelerador en el consumo. Quienes reniegan de la paradoja esgrimen argumentos débiles. Dicen que si la tesis fuera cierta, para ahorrar deberíamos exigir equipos ineficientes (la explicación por el absurdo simplemente elude presentar un argumento). El problema quizás se debe a que la eficiencia en ingeniería no es igual a la eficiencia en económica. El argumento de la eficiencia tecnológica quizás no alcance para que alguien adquiera un producto más caro o lo cambie antes de tiempo. Las personas no son racionales en la mejor forma que esperamos de ellas. Toman decisiones sobre la base de los instintos básicos, sobre los presupuestos de tiempo y condición social. Además, la eficiencia no es un objetivo en general para los individuos y los hogares. Las personas no adquieren la cantidad "eficiente" de bebidas o ropa.

**El consumo de energía versus el PBI.** El contraste del consumo de energía (total o por habitante) con el Producto Bruto Interno obtenido, resulta ser una fuente de información muy interesante. Los países más desarrollados son los más eficientes en el uso de la energía (producen un mayor PBI por cada unidad de energía), pero sin embargo, son los mayores consumidores de energía y emisores de CO<sub>2</sub>. Lo que está en línea con la paradoja de Jevons. Por ejemplo, el informe de Productividad Energética del 2015 (*The Lisbon Council*) calculó cuánto PBI se puede producir por unidad de energía. En América latina los países más eficientes son Colombia y Perú con 1,2 dólares de PBI por cada 1 kWh invertido. El promedio global era de 0,55 dólares/kWh. Cuando se mira la mejora a largo plazo, se observa un incremento de la eficiencia a nivel global del 1,32 %/año en el período 2001-2011, en tanto Colombia en el mismo período mejoró el 2 %/año.

En el llamado Informe Stern (*Economics of Climate Change*, Inglaterra 2006) se dice que entre 1970 y 2004, las mejoras tecnológicas redujeron las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía (eficiencia en CO<sub>2</sub>). Pero, los ingresos crecieron el 77% y la población el 69%, lo que originó nuevas formas de consumo y el incremento global del CO<sub>2</sub>. Mientras N. Stern incluye el crecimiento poblacional y la calidad de vida, para otros no hay necesidad de esto. Dicen que ambas cosas marchan detrás de la disponibilidad de energía, de forma que la civilización se desarrolla en un circuito de retroalimentación mantenido por el consumo de energía y la incorporación de recursos naturales. Es como una máquina térmica cuya entrada es energía y recursos naturales y funciona al máximo hasta agotar las entradas. Esto significa que la eficiencia no reduce el consumo de energía, sino que se usa para estimular el crecimiento económico. Dicen: "si usted se siente bien conservando la energía, puede hacerlo. Pero no tenga pretensiones que va a hacer una diferencia." La única diferencia es el cambio a una fuente de energía libre de CO<sub>2</sub>.

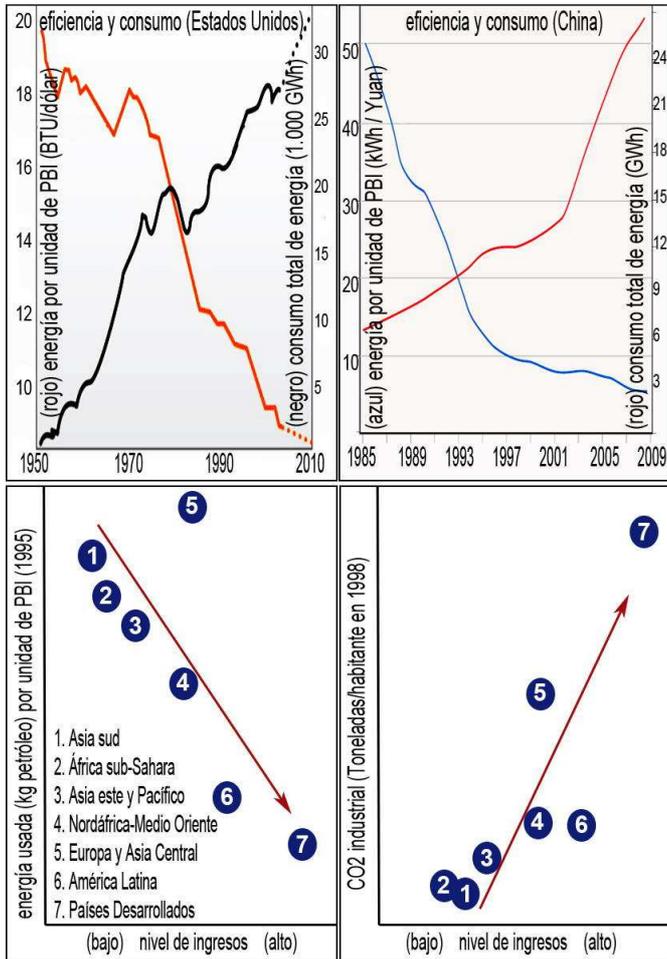


El consumo de energía en Estados Unidos desde 1850 siguió una relación lineal con el producto bruto interno PBI en dólares por habitante hasta 1975 (arriba). Cuando se observan otros países (abajo) se tiene un camino similar en el período 1990-2002. La conclusión es que una mejora del PBI requiere de un aumento de energía, a pesar de las innumerables mejoras tecnológicas y de eficiencia que están contenidas en estos años de progreso.

El Informe Stern indica además que desde el año 1850, Estados Unidos y Europa generaron el 70% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, de forma que los países desarrollados fueron los grandes aportantes a la huella de carbono global actual. En el mismo informe se afirma la necesidad de una inversión equivalente al 1% anual del PIB mundial para mitigar los efectos del cambio climático. De no hacerse se podría llegar a una recesión del orden del 20% del PIB global (invertir el 1% al año para evitar una pérdida del 20%). También se sugiere la imposición de eco-impuestos para minimizar los desequilibrios socioeconómicos. Años después, se calculó que la renta media global se reducirá el 23% para el 2100 si la contaminación de CO<sub>2</sub> sigue el ritmo actual. Pero, mientras algunos países (Rusia, Mongolia y Canadá) tendrían beneficios económicos por el calentamiento global, la mayor parte de África, Asia, América del Sur y el Oriente Medio sufriría de forma muy grave. El cambio climático sería una transferencia de valor desde las partes calientes a las frías del planeta. Así, los costos y beneficios no serán distribuidos entre los mismos actores.

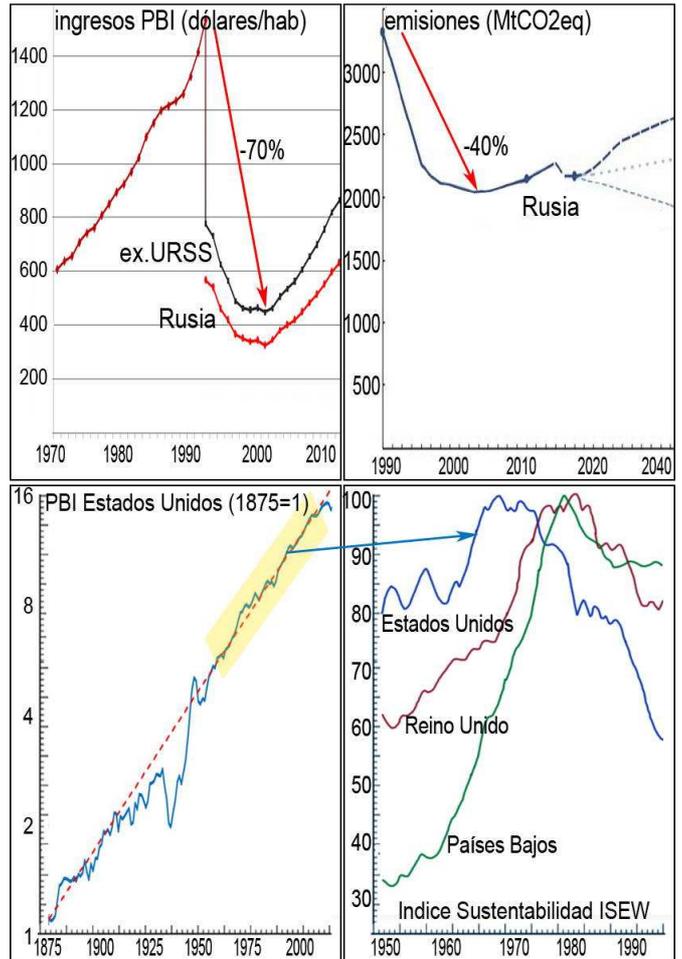
Volvamos al argumento del absurdo: si Jevons tuviera razón, la forma de mejorar sería tener equipos ineficientes. Un ejemplo cercano a esta situación se observó en la caída de la Unión Soviética (1990-91), debido al cambio de sistema económico con privatizaciones y corrupción. Durante la década de los '90, Rusia perdió un 70% en el valor del PBI por habitante, sin embargo la contracción en las emisiones de carbono fueron del 40%.

La reducción del PBI (caída del consumo) no fue suficiente para bajar las emisiones, ya que el sistema siguió funcionando con menor eficiencia (organización de las empresas) y casi sin nuevas inversiones.



La paradoja de Jevons se hace más notoria cuando se presenta la eficiencia y el consumo de energía por países o regiones. La eficiencia es definida como la cantidad de energía necesaria para producir una unidad de PBI. En Estados Unidos y China (arriba), mientras la eficiencia mejoró el consumo total de energía aumentó. Lo mismo es válido cuando se comparan distintas regiones del planeta (abajo). En este caso, las regiones más eficientes resultan ser las que más emisiones de CO<sub>2</sub> producen. Alto ingresos significa, alta eficiencia y alta emisión de contaminantes.

**Mejorar el cálculo del PBI.** El aumento de la eficiencia y del PBI va de la mano. Pero el PBI está mal interpretado. El PBI mide la actividad económica, aunque muchos lo asimilan al "bienestar" o calidad de vida. Así, "crecer a tasas chinas" (aumento del PBI del orden de 10% anual) parece un símbolo de bienestar. Pero las objeciones son tantas que deben ser analizadas con cuidado. El PBI no considera el consumo de recursos naturales no renovables o la destrucción de activos por desastres naturales o contaminación. Si un desastre natural destruye un pueblo que luego se reconstruye, solo cuenta la reconstrucción. No mide las externalidades, de forma que si una fábrica contamina y enferma a los vecinos se considera varias veces en forma positiva: la producción del contaminante, la limpieza de la contaminación y el cuidado de los enfermos. Un país puede aumentar el consumo de un recurso natural hasta agotarlo (p.e., un acuífero) y el PBI seguirá aumentando sin notarlo hasta el día del desastre. En forma opuesta, si se cambian equipos eléctricos por otros más eficientes, el PBI señalará una reducción del consumo eléctrico y será un indicador negativo. Se dijo: "Adam Smith no escribió sobre el PBI de la naciones, escribió sobre la riqueza de las naciones. Lo que se debe hacer, es estimar la riqueza que incluye al capital natural."

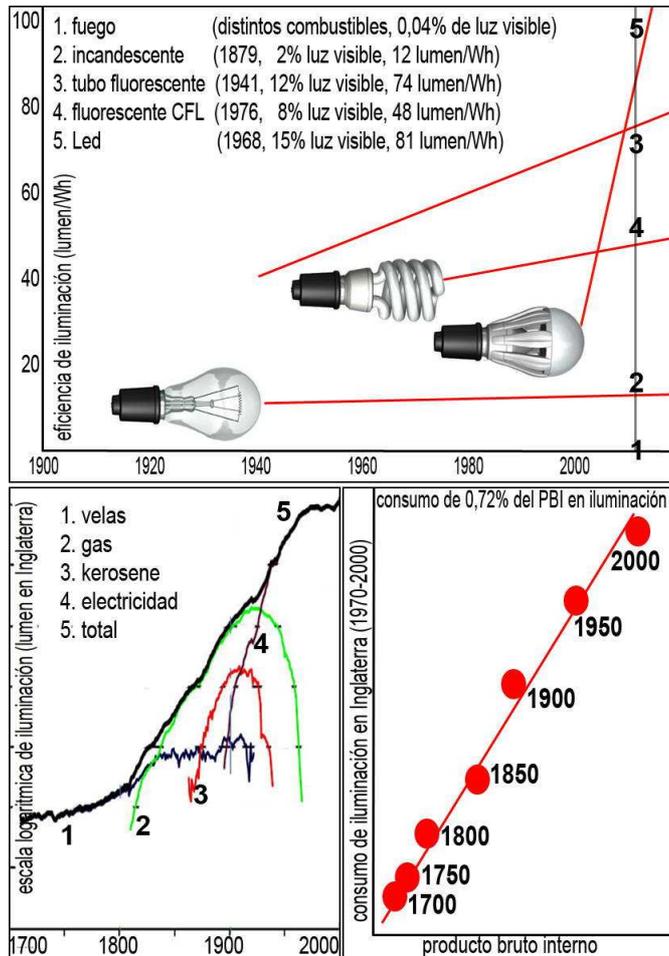


Dos casos donde el PBI se reduce. En la caída de la Unión Soviética el PBI cayó más profundo que las emisiones de carbono (arriba). El PBI también se reduce cuando se ajusta la forma de cálculo considerando los costos ambientales y el consumo de reservas naturales no renovables. Tal es el caso del índice de sustentabilidad ISEW (abajo).

En el PBI, el empleo público se cuenta como generadora de riqueza, cuando muchas veces no lo es. Solo cuenta a los valores monetarios y no contabiliza el impacto ecológico o las desigualdades en la distribución de la riqueza. La economía informal se puede estimar, pero no se considera la producción para autoconsumo (granjas comunitarias); el trabajo sin fines de lucro (ONG) y las obras de bien. Lo que se hace por sí mismo solo se contabiliza si pasa por el mercado formal. En la Argentina, en el 2011 se publicó que el 82% del personal en las ONG son voluntarios. En el 2014 se estimó que si esta actividad fuera rentada equivaldría a 5.000 millones de dólares. El mismo año la Unión Europea recomendó incluir en el cálculo del PBI los servicios de prostitución y las drogas. ¿Es este un indicador de bienestar? ¿Es voluntaria la elección de la prostitución y las drogas? Si un número importante de personas se vuelcan a la prostitución o como agentes de seguridad privada, ¿se trata de un indicador de mejora? Además, ¿mayor PBI significa mayor felicidad? Una encuesta a nivel global mostró una correlación entre ambos aspectos hasta un PBI de 36.000 dólares. Por encima, la felicidad cae debido a que aumentan las aspiraciones por encima de los ingresos. Lo que aspiramos tener se convierte en un objetivo móvil.

Para corregir los defectos del PBI una de las alternativas es el índice ISEW (Index Sustainable Economic Welfare). El ISEW elimina del PBI los gastos en defensa públicos y privados (por considerarse contrarios al bienestar); los costos de degradación ambiental (contaminación) y la depreciación del capital natural (reducción de los recursos naturales). Además, suma los trabajos no rentados. Así contabilizado, el PBI de Estados Unidos deja de

crecer en forma permanente. En el período 1950-1994 el PBI pasa de 8.000 a 17.000 dólares por habitante al año; pero el ISEW desciende de 6.000 a 4.000 us\$/hab/año. El ISEW máximo de Estados Unidos se dio a fines de los años '60, coherente con la reducción de la biocapacidad (la capacidad natural de reponer lo extraído). En el 2004 se anunció en China el cambio del PBI por un "PBI verde", que debía restar el deterioro de los recursos naturales. La idea se abandonó muy pronto porque la reducción era tan grande que se convirtió en políticamente inaceptable. Además, es muy compleja la cuantificación de los costos por contaminación del aire en las ciudades.

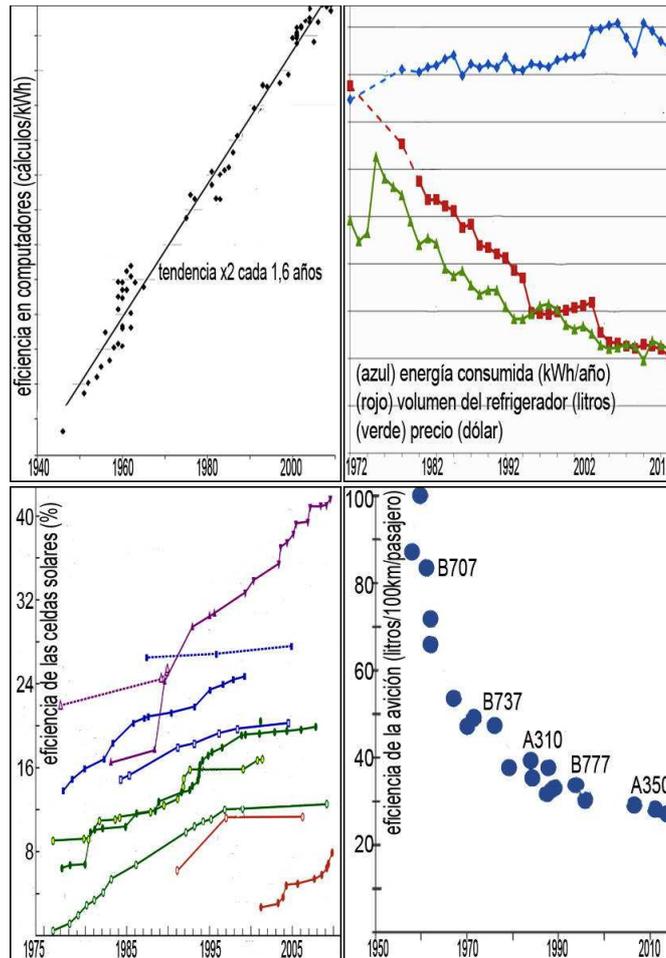


Cada generación en los sistemas de iluminación permitió una mejora en la eficiencia medida como cantidad de lumen por watt consumido (arriba). Además, cada generación cubrió un consumo de luz creciente (abajo). Una conclusión de interés es que la relación entre la iluminación producida y el PBI se mantiene constante a lo largo de la historia.

**La eficiencia en la iluminación.** Si los valores macroeconómicos como el PBI resultan inseguros, veamos algunos ejemplos a escala humana. Cuando se estudió la evolución de la iluminación y el consumo de energía asociado, se encontró un ejemplo de la paradoja de Jevons. Un estudio publicado en el 2010, sobre 3 siglos de datos, entregó las siguientes conclusiones: (1) Cada vez que se cambió la fuente de luz (velas, gas, kerosene, electricidad) o se introdujeron mejoras de eficiencia (lámparas incandescentes, fluorescentes y leds), el consumo de iluminación aumentó (medido en lumen que es la unidad de medida de potencia luminosa). Más eficiencia de la fuente luminosa se tradujo en mayor uso de la iluminación. (2) La relación entre la cantidad de iluminación generada y el PBI permaneció constante: el 0,72% del PBI se consumió en iluminación durante los últimos 2 siglos. (3) Las nuevas tecnologías de iluminación más eficientes (led) aumentarán el consumo a futuro. Las razones son psicológicas: más luz artificial significa más creatividad, más productividad

y menor depresión. Más luz significa más crecimiento del PBI y necesidad de energía.

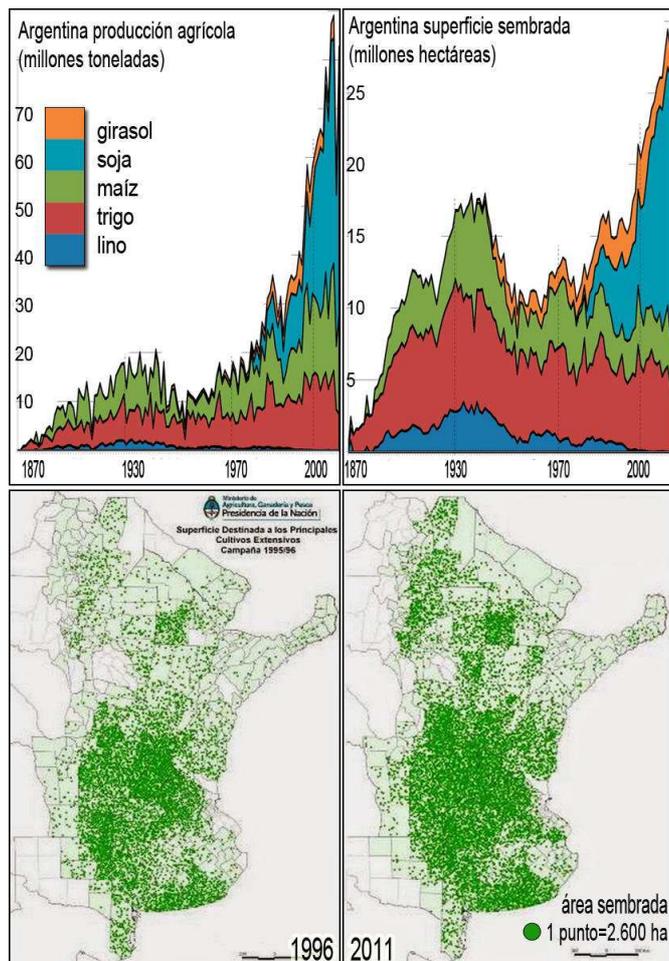
Otro caso bien documentado son los electrodomésticos. Se correlacionó la evolución del consumo de energía eléctrica (eficiencia energética) con las características físicas y la cantidad de unidades. El resultado parece obvio. A un aumento de la eficiencia (reducción del consumo de energía) le corresponde un aumento en la variedad de electrodomésticos (congeladores, microondas, cafeteras, tostadoras, lavavajillas, etc.) En el caso particular de los refrigeradores, se observa desde 1972 una tendencia constante a la baja en el consumo por unidad, una reducción del precio y un volumen del equipo levemente creciente.



Cuatro casos de eficiencia creciente y consumo en aumento. Siguiendo la ley de Moore, las computadoras aumentaron la capacidad de cálculo (el doble cada 1,57 años). Los refrigeradores redujeron el consumo y el precio desde 1972 pero el volumen y la cantidad de equipos aumentó (arriba). La eficiencia de las celdas solares en distintas tecnologías aumenta medida como porcentaje de radiación solar capturada. Los aviones consumen menos combustible por pasajero (abajo). En todos estos casos la eficiencia colaboró para el aumento del consumo. La paradoja de Jevons describe los hechos, no nos entrega una solución a cada problema.

**La ley de G. Moore.** En 1975 se describió una tendencia que se mantuvo vigente hasta el presente: los componentes electrónicos son un 46 %/año más pequeños, más densos, más rápidos y más baratos. Es equivalente a decir que duplica la velocidad de cálculo cada 18 meses (1,57 años). Esta ley es una predicción de la mejora en la eficiencia de las computadoras que tendrá un límite en la medida que nos acercamos a las dimensiones atómicas. También generó una confusión importante, ya que elevó las expectativas del progreso tecnológico. La tendencia de la eficiencia en

transistores (46 %/año) no es una guía para el progreso en general. El maíz mejoró los rendimientos en el 2 %/año desde 1950. La eficiencia en la generación eléctrica desde carbón aumentó 1,5 %/año en el siglo XX. La iluminación entre 1881 y 2014 aumentó cerca de 3 %/año, medido en lúmenes por watt. La velocidad de los viajes intercontinentales aumentó en 5,6 %/año desde 1900 a 1950, pero se mantiene constante desde entonces. El consumo de combustible en los aviones por pasajero se redujo el 2,4 %/año desde 1960. Entre 1973-2014 la eficiencia de conversión en los automóviles creció al 2,5 %/año. Entre 1975 y 2010 la eficiencia de conversión de las celdas solares aumento un 10 %/año, es lo más parecido a la electrónica. En tanto algunos perdieron eficiencia debido al agotamiento de recursos naturales. Por ejemplo, el coste energético del acero entre 1950 y 2010 se redujo en -1,7 %/año. Fuera del mundo de los microchip, la innovación no obedece a la ley de Moore.



La agricultura aumentó la eficiencia medida como toneladas de producto cosechado por unidad de hectárea. En la Argentina, desde 1980 a la fecha se pasó de 1,5 t/ha a 4 t/ha en promedio gracias a la aplicación de tecnología agropecuaria (arriba). La eficiencia no impidió que el área sembrada aumente y se extienda la frontera del agro (abajo).

**La eficiencia en la agricultura.** La producción de alimentos es quizás el sector de mayor riesgo. La producción de energía tiene una salida abierta al encierro: pasar a energía renovables. Pero la agricultura debe probar que tiene una salida compatible con las condiciones de contorno: alimentación de más habitantes y más exigentes; consumo de recursos naturales (combustibles, agua, tierras silvestres, fertilizantes) y convivencia con el ambiente natural.

En la Argentina el mayor salto en la eficiencia agraria ocurrió desde 1980 con la incorporación de las siguientes tecnologías: siembra directa (sin

arado), rotación de cultivos, cultivos de cobertura, semillas transgénicas, plaguicidas, fertilizantes, agricultura de precisión. Algunas de estas técnicas tienen daños colaterales, pero lograron en conjunto incrementar la producción medida como toneladas por hectárea. Se pasó de 20 a 100 Mt (millones de toneladas) con un incremento de 13 a 26 Mha (millones de hectáreas). La producción aumento 5 veces contra 2 veces del área sembrada. Se pasó de 1,5 t/ha a 4 t/ha. El aumento de eficiencia se tradujo en un incremento de la demanda (mejora y excesos en la alimentación), en tanto, el discurso oficial dice que hay que producir el doble para el 2050. Con todo, la industria agrícola de la Argentina es una de las más eficientes y conservacionistas del mundo. Esta tendencia choca contra varios límites naturales: (1) La provisión de agua es mayoritariamente de lluvias y depende del clima, el uso de riego no es rentable y sería contraproducente a largo plazo. (2) La extensión de la frontera agropecuaria llega a tierras poco fértiles, compete con el ambiente natural y por la baja calidad del suelo en algunas temporadas la cosecha se estanca. (3) La cosecha anual retira elementos químicos que deben ser repuestos desde fertilizantes naturales (orgánicos o biológicos) o minerales (limitados físicamente). Es la combinación de una agricultura extractiva de elementos y un suelo que es un recurso natural limitado.

A inicios del siglo XXI los mejores rendimientos se usaron para maximizar los beneficios a corto plazo, se estimuló la demanda y se descuidó la conservación del suelo. La conciliación de la agricultura y la conservación del suelo productivo y del ambiente natural es uno de los mayores desafíos de este siglo. La reserva de extensiones de tierra como hábitat natural es mucho mejor que hacer centros de rehabilitación de animales silvestres con muy bajo rendimiento. En la Argentina se aplican casi todas las buenas prácticas para el incremento de la eficiencia agrícola. Pero aún falta desarrollar la agricultura de precisión para una fertilización dirigida y el mantenimiento del potencial del suelo. Los objetivos a cumplir son: (1) aumento de eficiencia (t/ha) y cierre de la brecha con las regiones menos eficientes (África); (2) conservación del suelo (reposición de nutrientes naturales biológicos) y del agua mediante el uso de agricultura de precisión; (3) detener la expansión de la frontera agropecuaria mediante incentivos a la conservación; (4) cambios en el tipo de dieta (variedad de alimentos y gestión) que tengan menor huella de carbono; (5) reasignación estratégica para reducir el "problema Goldilocks": demasiado en algunos lugares, muy poco en otros y rara vez lo justo. (6) Evitar la competencia entre alimentos y otros usos (ganado y biocombustibles). (7) Reducción de residuos en las granjas (descarte o consumo de plagas) y en el procesado y consumo de alimentos finales.

**¿Es sustentable el crecimiento?** Hay muchos argumentos para considerar que el crecimiento no es sustentable (lo que puede ser sustentable es el desarrollo). La paradoja de Jevons nos muestra que apostar a la eficiencia en el consumo de energía y las mejoras tecnológicas no hará otra cosa que aumentar el consumo sobre un planeta que está explotado al 150% (huella ecológica). Desde un punto de vista termodinámico, estamos consumiendo insumos de baja entropía acumulados en el planeta y en extinción (tierras raras, minerales metálicos, combustibles fósiles). El incremento del consumo de energía básica (combustible líquido y electricidad) tiene el problema que produce gases efecto invernadero e incentiva el calentamiento global. Pero también tiene una salida reemplazando los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) por renovables (solar, eólica y nuclear). Esto permitiría reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Plantar árboles beneficia, pero no es la solución al problema del CO<sub>2</sub>. Mejorar la eficiencia en el uso de energía beneficia, pero la solución pasa por contener el uso de energía y migrar a energías renovables en forma acelerada. Solo el consumo de energía mantiene a la civilización tal cual la conocemos. Se calculó que la producción económica acumulada en toda la historia estuvo ligada a un consumo de energía con un factor constante de 9,7 mW/dólar (dólar constante de 1990 como referencia). En cualquier momento de la historia, cada dólar de 1990 ajustado por inflación estaría

apoyado por 9,7 mW (miliwatt) de consumo de energía primaria. El problema es que, con el fin de estabilizar las emisiones (sin reducirlas), debemos cambiar a fuentes de energía no emisivas a una velocidad de 2,1 %/año. Eso equivale a casi una nueva planta de energía nuclear por día.

La mejora de eficiencia requiere contener a la demanda. Las limitaciones deben ser gubernamentales: límite en los niveles globales de emisiones;

límite a la cantidad de tierra utilizada o la cantidad de agua consumida; impuestos que benefician las tecnologías más apropiadas. Este enfoque "de arriba hacia abajo" puede lograr una versión fuerte de sostenibilidad, pero un enfoque "de abajo hacia arriba" tendrá un enfoque de mayor escala.

Documento elaborado por el Ing. Roberto Ares (2016).