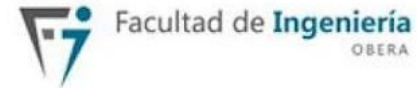


# EL ANÁLISIS DE DESCOMPOSICIÓN BASADO EN ÍNDICES: UNA HERRAMIENTA PARA MEDIR EFICIENCIA ENERGÉTICA

FLORENCIA ZABALOY  
CARINA GUZOWSKI

Curso de posgrado  
Facultad de Ingeniería UNaM 2021

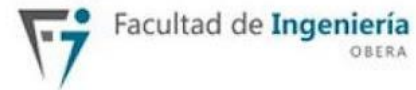


# EL MÉTODO ÍNDICE DE LA MEDIA-LOGARÍTMICA DIVISIA (LMDI)

---

CLASE 3

10/02/2022



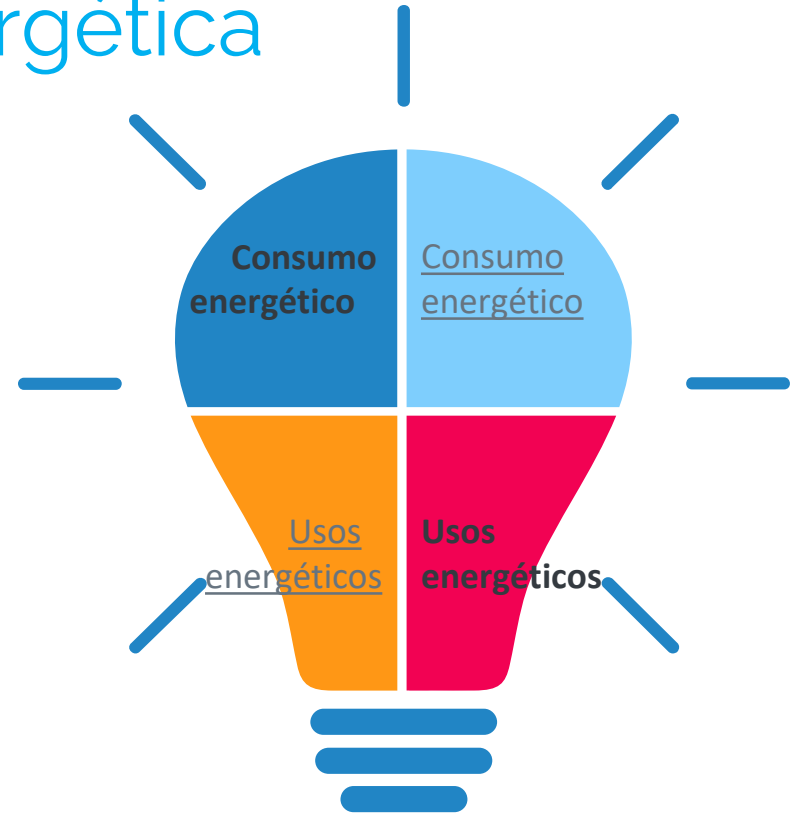
# Estructura de la clase

1. Repaso clases previas
2. Desarrollo matemático del método LMDI
3. Interpretación de resultados
4. Reflexiones finales

# 1. REPASO

# Eficiencia Energética

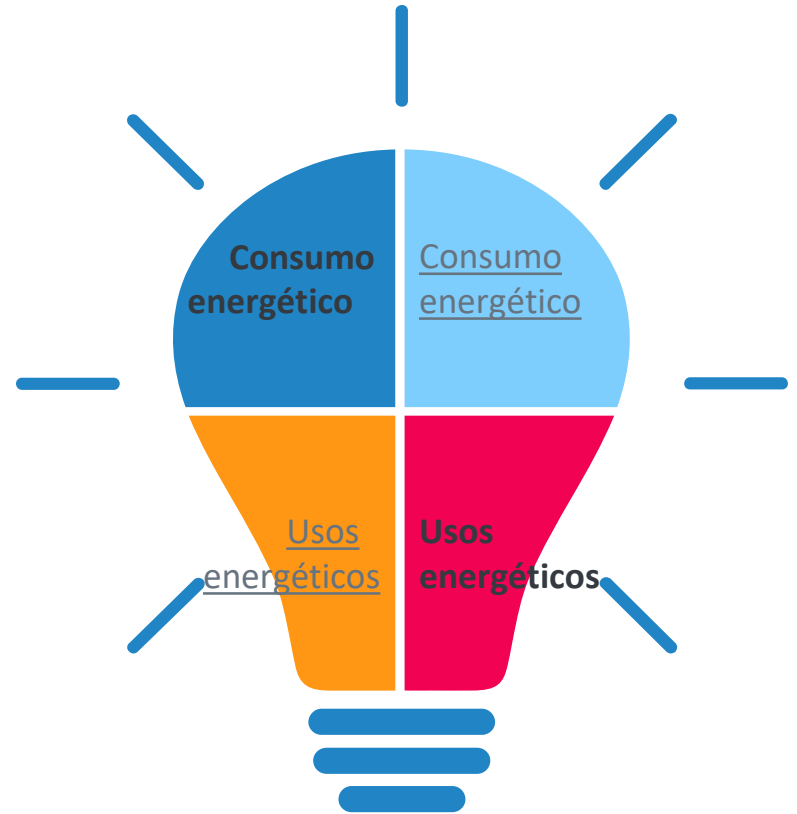
Utilizar **menos** cantidad de **energía** para obtener el mismo resultado final o bien gastar la misma cantidad de energía y obtener **mayores rendimientos** o un mejor resultado final (usos o necesidades energéticas).



# Medición de la EE

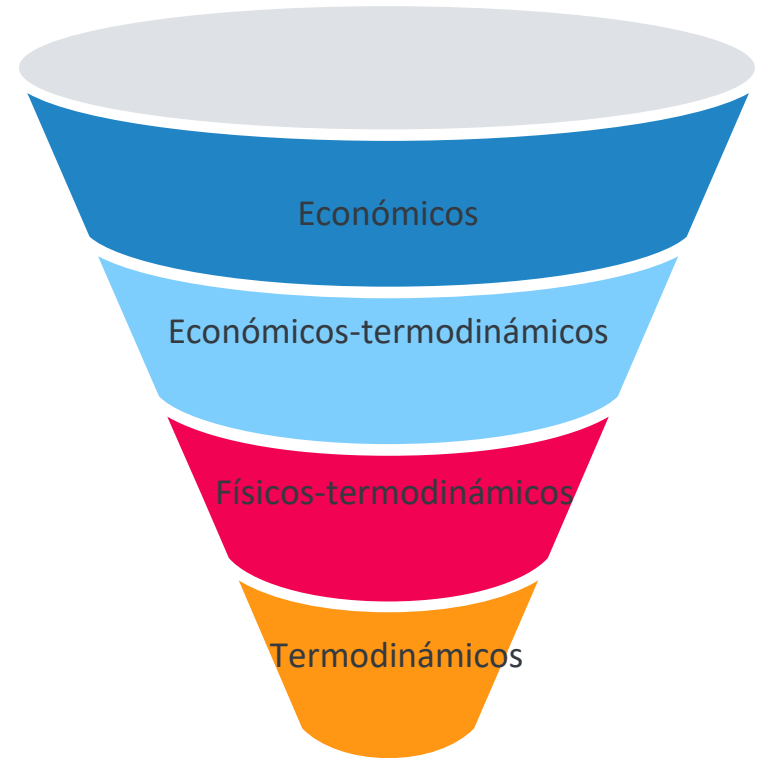
En general se utiliza el ratio:

$$EE = \frac{\textit{useful output of a process}}{\textit{energy input into a process}}$$



# Medición de la EE

Según como definamos el trabajo útil (output) y el insumo energético (input) tendremos distintos indicadores.



# Intensidad energética: principal indicador

- Es la cantidad de energía requerida por unidad de producto o actividad
- Ratio entre el consumo energético y el producto bruto interno (PIB) o valor agregado (VAB).
- Pueden ser sectoriales

$$IE = \frac{\textit{Consumo de energía}}{\textit{PIB o VAB}}$$



# Intensidad energética: desventajas

- El PIB no necesariamente es una buena representación del output o bien de las necesidades energéticas
- El indicador puede estar representando consecuencias energéticas del desarrollo y no un uso menos eficiente de la energía (crecimiento económico)
- Se pueden confundir cambios en la estructura productiva del país con cambios en la EE

Entonces → intensidad energética como una forma de medir la ***productividad global de la energía*** y no el desempeño de la eficiencia energética desde un punto de vista técnico

# Análisis de descomposición basado en índices – Index Decomposition Analysis (IDA)

- ▷ Se debe definir es una función en la cual se relaciona un **agregado**, que será descompuesto, con un número de **factores** de interés predefinidos (Ang, 2004).
- ▷ La idea es cuantificar los **impactos** de los cambios de los factores sobre el agregado (Ej. Consumo Energético).
- ▷ A partir de esta cuantificación se puede:
  - Evaluar la efectividad de las políticas de eficiencia tomadas en el pasado
  - Realizar comparaciones entre sectores o países
  - Identificar las medidas apropiadas para reducir el consumo en un futuro (Xu & Ang, 2013)

# Ventajas de los Métodos Índice de la Media-logarítmica Divisia (LMDI)

- ▷ **Descomposición perfecta** → los resultados no contienen un término de residuo
- ▷ **Consistencia en la agregación** → permite agregar los resultados de los subgrupos de manera consistente, es decir, la forma en que se definen los subgrupos no afecta a los resultados a nivel agregado
- ▷ **Asociación directa y simple entre la forma aditiva y la forma multiplicativa** → brindan los resultados de maneras distintas pero complementarias (Ang, 2005, 2015)
- ▷ **Fácil de aplicación** independientemente del número de factores de descomposición definidos
- ▷ **Información** requerida de fácil acceso.

# Punto de partida

## ▷ Modelo IPAT

El impacto humano (I) (emisiones de CO<sub>2</sub> o consumo de energía) depende de:

- ▷ la población (P)
- ▷ la afluencia (A) o nivel de actividad económica per cápita
- ▷ la tecnología (T) (medida como nivel de consumo energético dividido el nivel de actividad económica)

# Punto de partida

## ▷ Ecuación de KAYA

Es una identidad matemática en la cual se asocia las emisiones de CO2 o el consumo energético con la población, el crecimiento económico y la intensidad energética:

$$E = P \cdot A \cdot S \cdot I$$

P la población

A la actividad económica

S la estructura económica

I la intensidad energética

## 2. DESARROLLO MATEMÁTICO

# Punto de partida: identidad

Intensidad  
energética

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \left( P \cdot \frac{Y}{P} \cdot \frac{Y_i}{Y} \cdot \frac{E_i}{Y_i} \right) = \sum_{i=1}^n EP \cdot EA \cdot ES_i \cdot EI_i$$

- ▷ n es la cantidad de sectores en la economía o la cantidad de subsectores dentro de un sector en particular
- ▷ Y es el nivel de actividad económica
- ▷  $Y_i$  es el nivel de actividad económica del sector i
- ▷  $E_i$  es el consumo energético del sector i.
- ▷ E es el consumo energético total
- ▷ P es la población

# Punto de partida: identidad

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \left( P \cdot \frac{Y}{P} \cdot \frac{Y_i}{Y} \cdot \frac{E_i}{Y_i} \right) = \sum_{i=1}^n EP \cdot EA \cdot ES_i \cdot EI_i$$

## 4 efectos

**EP:** Efecto población (mide  $\Delta E$  debido a  $\Delta P$ )

**EA:** Efecto actividad (mide  $\Delta E$  debido a  $\Delta$  nivel de actividad económica per cápita)

**ES:** Efecto estructura (mide  $\Delta E$  debido a  $\Delta$  peso relativo de la producción de los sectores analizados)

**EI:** Efecto intensidad- o eficiencia (mide  $\Delta E$  debido a  $\Delta$  intensidad energética sectorial)



# Descomposición aditiva

$$E^T - E^0 = \Delta E_{tot} = \Delta E_{pop} + \Delta E_{act} + \Delta E_{str} + \Delta E_{int}$$

$$\Delta E_{pop} = \sum_{i=1}^n w_i \ln \left( \frac{EP^T}{EP^0} \right)$$

$$\Delta E_{str} = \sum_{i=1}^n w_i \ln \left( \frac{ES_i^T}{ES_i^0} \right)$$

$$\Delta E_{act} = \sum_{i=1}^n w_i \ln \left( \frac{EA^T}{EA^0} \right)$$

$$\Delta E_{int} = \sum_{i=1}^n w_i \ln \left( \frac{EI_i^T}{EI_i^0} \right)$$

Factor de ponderación:

*Es la media logarítmica del consumo de energía del sector  $i$  entre el período 0 y  $T$ .*

$$w_i = L(E_i^0, E_i^T) = \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0}$$

En la forma aditiva los efectos muestran los **cambios absolutos** en el volumen del consumo energético entre el periodo  $T$  y  $0$  debido a cambios en los efectos población, actividad, estructura e intensidad energética.

# Descomposición aditiva: EP

$$\Delta E_{pop} = \sum_{i=1}^n w_i \ln \left( \frac{EP^T}{EP^0} \right)$$

$$\Delta E_{pop} = \sum_{i=1}^n \frac{(E_i^T - E_i^0)}{(\ln E_i^T - \ln E_i^0)} \ln \left( \frac{P^T}{P^0} \right)$$

Aclaraciones:

- ▷ Hay un factor de ponderación por cada subsector  $i$  ( $n$  factores).
- ▷ Sin embargo, el segundo término (el logaritmo) es el mismo para cada subsector.

# Descomposición aditiva: EA

$$\Delta E_{act} = \sum_{i=1}^n w_i \ln \left( \frac{EA^T}{EA^0} \right)$$

$$\Delta E_{act} = \sum_{i=1}^n \frac{(E_i^T - E_i^0)}{(\ln E_i^T - \ln E_i^0)} \ln \left( \frac{(Y/P)^T}{(Y/P)^0} \right)$$

Aclaraciones:

- ▷ Hay un factor de ponderación por cada subsector  $i$  ( $n$  factores).
- ▷ Sin embargo, el segundo término (el logaritmo) es el mismo para cada subsector.

# Descomposición aditiva: ES

$$\Delta E_{str} = \sum_{i=1}^n w_i \ln \left( \frac{ES_i^T}{ES_i^0} \right)$$
$$\Delta E_{str} = \sum_{i=1}^n \frac{(E_i^T - E_i^0)}{(\ln E_i^T - \ln E_i^0)} \ln \left( \frac{(Y_i/Y)^T}{(Y_i/Y)^0} \right)$$

Aclaraciones:

- ▷ Hay un factor de ponderación por cada subsector  $i$  ( $n$  factores).
- ▷ En este caso el segundo término (el logaritmo) es diferente para cada subsector.

# Descomposición aditiva: EI

$$\Delta E_{int} = \sum_{i=1}^n w_i \ln \left( \frac{EI_i^T}{EI_i^0} \right)$$
$$\Delta E_{int} = \sum_{i=1}^n \frac{(E_i^T - E_i^0)}{(\ln E_i^T - \ln E_i^0)} \ln \left( \frac{(E_i/Y_i)^T}{(E_i/Y_i)^0} \right)$$

Aclaraciones:

- ▷ Hay un factor de ponderación por cada subsector  $i$  ( $n$  factores).
- ▷ En este caso el segundo término (el logaritmo) es diferente para cada subsector.

# Descomposición aditiva

Suponiendo que existen 6 subsectores: transformación de energía, residencial, comercial y público, transporte, agropecuario e industrial, tenemos:

$$\Delta E_{pop} = (\Delta E_{pop})_{energ} + (\Delta E_{pop})_{resi} + (\Delta E_{pop})_{com\ y\ pub} + (\Delta E_{pop})_{transp} + (\Delta E_{pop})_{agro} + (\Delta E_{pop})_{ind}$$

$$\Delta E_{act} = (\Delta E_{act})_{energ} + (\Delta E_{act})_{resi} + (\Delta E_{act})_{com\ y\ pub} + (\Delta E_{act})_{transp} + (\Delta E_{act})_{agro} + (\Delta E_{act})_{ind}$$

$$\Delta E_{str} = (\Delta E_{str})_{energ} + (\Delta E_{str})_{resi} + (\Delta E_{str})_{com\ y\ pub} + (\Delta E_{str})_{transp} + (\Delta E_{str})_{agro} + (\Delta E_{str})_{ind}$$

$$\Delta E_{int} = (\Delta E_{int})_{energ} + (\Delta E_{int})_{resi} + (\Delta E_{int})_{com\ y\ pub} + (\Delta E_{int})_{transp} + (\Delta E_{int})_{agro} + (\Delta E_{int})_{ind}$$

# Descomposición multiplicativa

$$\frac{E^T}{E^0} = D_{tot} = D_{pop} \cdot D_{act} \cdot D_{str} \cdot D_{int}$$

$$D_{pop} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \ln \left( \frac{EP^T}{EP^0} \right) \right)$$

$$D_{str} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \ln \left( \frac{ES_i^T}{ES_i^0} \right) \right)$$

$$D_{act} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \ln \left( \frac{EA^T}{EA^0} \right) \right)$$

$$D_{int} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \ln \left( \frac{EI_i^T}{EI_i^0} \right) \right)$$

Factor de ponderación:

*Es la media logarítmica del consumo del sector  $i$  entre el periodo 0 y  $T$  con respecto a la media logarítmica del total de consumo del país entre el periodo 0 y  $T$*

$$\tilde{w}_i = \frac{L(E_i^0, E_i^T)}{L(E^0, E^T)} = \frac{\frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0}}{\frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0}}$$

# Descomposición multiplicativa

$$\frac{E^T}{E^0} = D_{tot} = D_{pop} \cdot D_{act} \cdot D_{str} \cdot D_{int}$$

En la forma multiplicativa los resultados siempre serán valores positivos, ya que se trata de **índices**.

Para analizar si los efectos contribuyen con el aumento o disminución del consumo energético el punto de referencia es **la unidad** (lo vemos en una aplicación más adelante).



# Descomposición multiplicativa: EP

$$D_{pop} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \ln \left( \frac{EP^T}{EP^0} \right) \right)$$

$$D_{pop} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \right)}{\left( \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} \right)} \ln \left( \frac{P^T}{P^0} \right) \right)$$

Aclaraciones:

- ▷ Hay un factor de ponderación por cada subsector  $i$  ( $n$  factores).
- ▷ Sin embargo, el segundo término (el logaritmo) es el mismo para cada subsector.

# Descomposición aditiva: EA

$$D_{act} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \ln \left( \frac{EA^T}{EA^0} \right) \right)$$

$$D_{act} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \right)}{\left( \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} \right)} \ln \left( \frac{(Y/P)^T}{(Y/P)^0} \right) \right)$$

Aclaraciones:

- ▷ Hay un factor de ponderación por cada subsector  $i$  ( $n$  factores).
- ▷ Sin embargo, el segundo término (el logaritmo) es el mismo para cada subsector.

# Descomposición aditiva: ES

$$D_{str} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \ln \left( \frac{ES_i^T}{ES_i^0} \right) \right)$$

$$D_{str} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \right)}{\left( \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} \right)} \ln \left( \frac{(Y_i/Y)^T}{(Y_i/Y)^0} \right) \right)$$

Aclaraciones:

- ▷ Hay un factor de ponderación por cada subsector  $i$  ( $n$  factores).
- ▷ En este caso el segundo término (el logaritmo) es diferente para cada subsector.

# Descomposición aditiva: EI

$$D_{int} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \ln \left( \frac{EI_i^T}{EI_i^0} \right) \right)$$

$$D_{int} = \exp \left( \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \right)}{\left( \frac{E^T - E^0}{\ln E^T - \ln E^0} \right)} \ln \left( \frac{(E_i/Y_i)^T}{(E_i/Y_i)^0} \right) \right)$$

Aclaraciones:

- ▷ Hay un factor de ponderación por cada subsector  $i$  ( $n$  factores).
- ▷ En este caso el segundo término (el logaritmo) es diferente para cada subsector.

# Descomposición multiplicativa

Suponiendo que existen 6 subsectores: transformación de energía, residencial, comercial y público, transporte, agropecuario e industrial, tenemos:

$$D_{pop} = (D_{pop})_{energ} \cdot (D_{pop})_{resi} \cdot (D_{pop})_{com\ y\ pub} \cdot (D_{pop})_{transp} \cdot (D_{pop})_{agro} \cdot (D_{pop})_{ind}$$

$$D_{act} = (D_{act})_{energ} \cdot (D_{act})_{resi} \cdot (D_{act})_{com\ y\ pub} \cdot (D_{act})_{transp} \cdot (D_{act})_{agro} \cdot (D_{act})_{ind}$$

$$D_{str} = (D_{str})_{energ} \cdot (D_{str})_{resi} \cdot (D_{str})_{com\ y\ pub} \cdot (D_{str})_{transp} \cdot (D_{str})_{agro} \cdot (D_{str})_{ind}$$

$$D_{int} = (D_{int})_{energ} \cdot (D_{int})_{resi} \cdot (D_{int})_{com\ y\ pub} \cdot (D_{int})_{transp} \cdot (D_{int})_{agro} \cdot (D_{int})_{ind}$$

# 3. INTERPRETACIÓN

# Recapitulando

Con este modelo puedo:

- ▷ Estudiar un agregado (consumo de energía)
- ▷ En particular, analizar variación del consumo de energía entre momentos T y 0 (habitualmente en años)
- ▷ Determinar qué factores explican dicha variación
  - Los factores que contribuyen con el aumento del consumo se llaman **Impulsores o Drivers**
  - Los factores que disminuyen el consumo se llaman **Inhibidores**
- ▷ Más en detalle, cómo contribuye cada sector a la variación en el consumo de energía
- ▷ Puedo aislar un efecto particular en un sector particular: ejemplo, cuál fue el efecto intensidad en el sector residencial

# Recapitulando

El modelo presentado se basó en seleccionar:

- ▷ El **consumo energético** como agregado a explicar
- ▷ A partir de **4 efectos**: EP, EA, ES, EI
- ▷ En **6 sectores** de la economía: transformación de energía, residencial, comercial y público, transporte, agropecuario e industrial
- ▷ Formas **aditiva y multiplicativa**

**Siempre se pueden cambiar estas variables**, dependiendo del objetivo de investigación y de los datos disponibles.



# Interpretación de resultados: forma aditiva 2004-2018 (Arg.)

| Sectores            | Descomposición aditiva (ktep) |               |               |               |               |
|---------------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                     | $E_{pop}$                     | $E_{act}$     | $E_{str}$     | $E_{int}$     | $E_{tot}$     |
| Transf. Energía     | 1.026                         | 1.491         | -590          | -727          | <b>1.199</b>  |
| Residencial         | 1.694                         | 2.460         | 11            | 387           | <b>4.552</b>  |
| Comercial y Público | 588                           | 854           | 495           | -832          | <b>1.105</b>  |
| Transporte          | 2.083                         | 3.025         | 347           | 116           | <b>5.571</b>  |
| Agropecuario        | 510                           | 740           | -777          | -301          | <b>172</b>    |
| Industria           | 1.801                         | 2.616         | -1.967        | -1.056        | <b>1.395</b>  |
| <b>TOTAL</b>        | <b>7.702</b>                  | <b>11.186</b> | <b>-2.482</b> | <b>-2.412</b> | <b>13.994</b> |

**IMPULSORES**

**INHIBIDORES**

# Interpretación de resultados: forma aditiva 2004-2018 (Arg.)

Los resultados están expresados en unidades físicas (energía)

Los impulsores tienen **signo positivo** (contribuyen con el aumento del agregado, es decir, consumo de energía)

Los inhibidores tienen **signo negativo** (contribuyen con la disminución del agregado, es decir, consumo de energía)

# Interpretación de resultados: forma multiplicativa 2004-2018 (Arg.)

| Sectores                   | Descomposición multiplicativa |                  |                  |                  |                  |
|----------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                            | D <sub>pop</sub>              | D <sub>act</sub> | D <sub>str</sub> | D <sub>int</sub> | D <sub>tot</sub> |
| <b>Transf. Energía</b>     | 1,0195                        | 1,0284           | 0,9890           | 0,9864           | <b>1,0228</b>    |
| <b>Residencial</b>         | 1,0323                        | 1,0473           | 1,0002           | 1,0073           | <b>1,0893</b>    |
| <b>Comercial y Público</b> | 1,0111                        | 1,0162           | 1,0093           | 0,9845           | <b>1,0210</b>    |
| <b>Transporte</b>          | 1,0399                        | 1,0585           | 1,0065           | 1,0022           | <b>1,1103</b>    |
| <b>Agropecuario</b>        | 1,0096                        | 1,0140           | 0,9855           | 0,9944           | <b>1,0032</b>    |
| <b>Industria</b>           | 1,0344                        | 1,0504           | 0,9637           | 0,9804           | <b>1,0265</b>    |
| <b>TOTAL</b>               | <b>1,1557</b>                 | <b>1,2339</b>    | <b>0,9544</b>    | <b>0,9557</b>    | <b>1,3007</b>    |

# Interpretación de resultados: forma multiplicativa 2004-2018 (Arg.)

Los resultados de la forma multiplicativa arrojan la misma información que la forma aditiva.

Los resultados están expresados en índices

Los impulsores son **mayores a la unidad (1)** (contribuyen con el aumento del agregado, es decir, consumo de energía)

Los inhibidores tienen son **menores a la unidad (1)** (contribuyen con la disminución del agregado, es decir, consumo de energía)

# Interpretación de resultados: forma multiplicativa 2004-2018 (Arg.)

Veamos un ejemplo de las relaciones:

$$E_{2004} = 46.536 \text{ ktep}$$

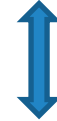
$$E_{2018} = 60.530 \text{ ktep}$$

Forma aditiva:

$$E_{tot} = 60.530 - 46.536 = \mathbf{13.994}$$

Forma multiplicativa:

$$D_{tot} = \frac{60.530}{46.536} = \mathbf{1,3007}$$



$$E_{2004} \cdot D_{tot} = E_{2018}$$
$$46.536 \cdot 1,3007 = 60.530$$



## 4. REFLEXIONES FINALES

# Reflexiones finales

- Es muy importante definir nuestro objetivo de investigación (qué variable quiero explicar, qué efectos me sirven, qué sectores incluyo, etc.)
- En base a lo anterior es necesario armar la identidad matemática de partida. Hay que verificar que sea efectivamente una identidad.
- Debemos ser muy prolijos con las fórmulas, uso de subíndices y superíndices, teniendo siempre en cuenta nuestro objetivo. Es poco habitual que sigamos las fórmulas tal cual las están en un paper, porque cada uno puedo armar su propio modelo.
- La forma aditiva y multiplicativa brindan la misma información, simplemente son dos maneras diferentes de exponer los resultados.

# Reflexiones finales

- Falta ver el uso de datos, que también puede limitar el armado del modelo.
- Si bien vimos la interpretación técnica de los resultados, siempre se debe agregar una interpretación profunda de los resultados más allá del método, es decir, incluyendo revisión de historia económica, políticas sectoriales relevantes, entre otros.
- Ambos puntos los veremos en las próximas clases.



# Muchas gracias!

Florencia Zabaloy

*florenciazabaloy@gmail.com*

Carina Guzowski

*cguzow@criba.edu.ar*