

Respaldo metodológico y académico

Fundamentación teórica, formulación matemática, validez y limitaciones reconocidas. Para defender el rigor del análisis ante auditores, consultores expertos o comités académicos.

Este documento acompaña la herramienta web de análisis estructural publicada en ricardoruiz.co/analisis-estructural.html. Documenta las tres lentes que ofrece la herramienta — MicMac, DEMATEL e ISM — con su procedencia, formulación, validez interna y límites; el manejo opcional de incertidumbre (scoring difuso); y la bibliografía de referencia.

1 · Origen disciplinar y posición epistémica

El análisis estructural pertenece a la familia de métodos de *prospectiva estratégica* desarrollada en Francia desde los años setenta, principalmente por Michel Godet en LIPSOR (Laboratoire d'Investigation en Prospective, Stratégie et Organisation) del CNAM, París. Godet sistematizó técnicas dispersas — algunas con raíces en la Battelle Memorial Institute de Estados Unidos en los sesenta — y las articuló en una caja de herramientas conocida como *la prospective*: MICMAC, MACTOR, SMIC, escenarios morfológicos, entre otras.

En Colombia el método llegó por dos vías paralelas. La principal: **Francisco José Mojica Sastoque** (Universidad Externado), doctor de la Universidad de París V – René Descartes (Sorbonne), discípulo directo de Godet en el grupo *laprospective*. Mojica dirige el Centro de Pensamiento Estratégico y Prospectiva del Externado, la Maestría homónima y el Doctorado en Administración, además de la Cátedra UNESCO de Estudios de Futuro. Ha dirigido más de cincuenta estudios prospectivos en Colombia, Venezuela, Ecuador, México y Perú.

La vía latinoamericana complementaria pasa por **Javier Medina Vásquez** (Universidad del Valle) y **Edgar Ortegón** (ILPES / CEPAL), autores del manual de prospectiva estratégica para América Latina y el Caribe (CEPAL, Serie Manuales 51, 2006). Ese manual integra la escuela francesa con escuela anglosajona (Foresight británico) y adaptaciones al contexto regional (institucionalidad débil, calidad de datos, volatilidad). La herramienta documentada aquí se apoya en ambas tradiciones, sin alinear ideológicamente con ninguna escuela.

Posición epistémica: el análisis estructural es *cualitativo asistido por estructura matemática*. Su input — las calificaciones de influencia — viene del juicio experto. Su mérito está en hacer explícitas las relaciones indirectas que el ojo humano no ve cuando observa solo influencias directas. No reemplaza modelos econométricos ni simulación basada en agentes; los complementa en la fase exploratoria de un análisis de política pública.

2 · MICMAC — Matrices d'Impacts Croisés Multiplication Appliquée à un Classement

Origen: el método fue formulado por Michel Godet con François Bourse en 1971 y publicado de forma sistemática en *Manuel de prospective stratégique* (Dunod, 1997, 2 vol.). El acrónimo describe el procedimiento: matriz de impactos cruzados, multiplicación aplicada a un ordenamiento de variables.

Formulación

Sea M una matriz $n \times n$ de influencias directas donde $M[i,j]$ está en $\{0, 1, 2, 3, P\}$ — la calificación de cuánto influye la variable i sobre la j (P = potencial, se trata como 1 en la agregación numérica).

Motricidad directa: $r_i = \sum_j M[i, j]$

Dependencia directa: $c_j = \sum_i M[i, j]$

Para capturar las influencias indirectas se eleva M a potencias sucesivas. Las relaciones de orden k aparecen en M elevado a k . El criterio de detención es la *estabilización del ordenamiento*: se itera hasta que el ranking de motricidad y dependencia de M^k no cambie respecto a $M^{(k-1)}$. En la práctica esto ocurre entre la tercera y la sexta iteración para sistemas de 8 a 30 variables.

Motricidad indirecta: $r^*_i = \sum_j (M^k)[i, j]$

Dependencia indirecta: $c^*_j = \sum_i (M^k)[i, j]$

Las variables se ubican en un plano (c^* , r^*) y se clasifican según su posición respecto a la mediana de cada eje en cuatro cuadrantes: **motrices**, **clave / enlace**, **resultado / dependientes** y **autónomas / excluidas**.

Validez interna y limitaciones reconocidas

MicMac sigue ampliamente utilizado en publicaciones académicas recientes (educación, resiliencia nacional, logística humanitaria, gestión del agua, cadenas de suministro, integración del metaverso, people analytics — 2020-2025, ver bibliografía). Las críticas metodológicas reconocidas se concentran en cinco frentes:

- **Escala ordinal tratada como cardinal.** El scoring 0-3 es ordinal pero las operaciones (suma, multiplicación de matrices) son cardinales. La crítica viene del propio Bishop & Hines (2012) y Saritas & Smith (2011); la herramienta la mitiga con el modo difuso opcional (± 0.5 , ± 1.0) que captura la incertidumbre en bandas.
- **Criterio de convergencia opaco.** El número de iteraciones rara vez se justifica formalmente. Esta herramienta hace explícito el criterio (rank stability) y reporta el k al que se estabilizó.
- **Sesgo del panel de expertos.** Quién está en la mesa determina el resultado. El modo difuso ayuda a visualizar qué tan sensibles son las clasificaciones al panel.
- **Modelo estático.** No captura no-linealidades temporales. Para sistemas con dinámicas rápidas se recomienda complementar con simulación basada en agentes.
- **No distingue tipo de relación.** Una influencia puede ser facilitadora o inhibidora, causal o correlacional. MicMac trata todas igual. La herramienta complementa con DEMATEL para capturar la dirección causa-efecto.

3 · DEMATEL — Decision Making Trial and Evaluation Laboratory

Origen: desarrollado en el Battelle Memorial Institute, Geneva Research Centre, por Emilio Fontela y André Gabus entre 1972 y 1976, originalmente para el estudio de problemas complejos del Club of Rome. El método ha tenido un renacimiento desde los años 2000 con aplicaciones en cadena de suministro, riesgo y gestión ambiental.

Formulación

Partiendo de la misma matriz M de influencias directas:

1. Normalización: $D = M / s$, donde $s = \max(\max_i \sum_j M[i,j], \max_j \sum_i M[i,j])$

2. Total relation matrix: $T = D \times (I - D)^{-1}$

3. $R =$ sumas por fila de T (influencia ejercida)

$C =$ sumas por columna de T (influencia recibida)

4. Prominencia = $R + C$ Relación = $R - C$

El plot $(R+C)$ vs $(R-C)$ separa las variables en cuatro cuadrantes según intensidad de involucramiento ($R+C$ alto o bajo) y dirección causal ($R-C$ positivo = causa, $R-C$ negativo = efecto). La inversión de $(I - D)$ se realiza por eliminación Gauss-Jordan local en el cliente.

Convergencia: el límite teórico $T = D \times (I - D)^{-1}$ asume que el radio espectral de D es menor que 1, condición que se cumple para matrices normalizadas correctamente. La herramienta verifica la invertibilidad de $(I - D)$ durante la ejecución; si la matriz es singular (caso patológico), reporta error y sugiere revisar los datos.

Comparación con MicMac: DEMATEL es más sensible a la intensidad relativa de las influencias (la normalización lo absorbe) pero pierde la lectura ordinal directa. En la práctica, las variables que aparecen como clave en MicMac y como causas-centrales en DEMATEL son las más robustas.

4 · ISM — Interpretive Structural Modeling

Origen: formulado por John N. Warfield en 1973 mientras trabajaba en Battelle Memorial Institute. ISM es una técnica de modelización por grafos dirigidos que ordena las variables del sistema en niveles jerárquicos según una relación de alcanzabilidad transitiva.

Formulación

Dada la matriz M de influencias directas y un umbral t (en esta herramienta t en $\{1, 2, 3\}$, con default 2):

1. Binarización: $B[i,j] = 1$ si $M[i,j] \geq t$, 0 en otro caso. $B[i,i] = 1$ para todo i .

2. Reachability matrix R : cierre transitivo de B por algoritmo de Warshall.

3. Conjuntos: $Reach(i) = \{j : R[i,j] = 1\}$

$$\text{Antec}(i) = \{j : R[j,i] = 1\}$$

4. Variable i pertenece al nivel actual si $\text{Reach}(i)$ intersección $\text{Antec}(i) = \text{Reach}(i)$.

5. Eliminar variables del nivel y repetir hasta agotar el conjunto.

El resultado es una jerarquía en la que el nivel superior contiene las variables que *determinan* el sistema (raíces) y el nivel inferior las que *resultan* de él (hojas). La herramienta renderiza la jerarquía como una pirámide con conectores verticales entre niveles.

Sensibilidad al umbral: ISM es paramétrico. Un t demasiado bajo genera un sistema denso con un solo nivel; uno demasiado alto, una jerarquía vacía. Se recomienda probar los tres umbrales (1, 2, 3) y reportar el que produce una estructura interpretable.

5 - Modo difuso (scoring con bandas de incertidumbre)

La crítica ordinal-cardinal mencionada se mitiga con un modo difuso opcional. Cada calificación v en $\{0, 1, 2, 3\}$ se interpreta como una banda triangular degenerada:

Confianza alta: $[v, v]$ (sin incertidumbre, default)

Confianza media: $[\max(0, v - 0.5), \min(3, v + 0.5)]$

Confianza baja: $[\max(0, v - 1.0), \min(3, v + 1.0)]$

Los cálculos de MicMac y DEMATEL corren tres veces: con la matriz de extremo inferior, central y superior. Los scatters de resultados dibujan cruces de incertidumbre alrededor de cada punto. Las variables cuya cruz toca la línea de mediana del cuadrante son sensibles al panel y deben discutirse.

*La implementación se inspira en la familia de **Fuzzy MICMAC** documentada por Chang et al. (2007) y Khatwani et al. (2015), simplificando la representación trapezoidal a una banda simétrica alrededor del valor central. Versiones futuras incorporarán scoring triangular completo {min, mod, max} por celda.*

5.1 - Valencias firmadas (facilita / inhibe)

La escala de calificación se amplía con dirección causal. Cada celda $M[i,j]$ toma valores en $\{0, +1, +2, +3, -1, -2, -3, P\}$, donde el signo positivo significa que A *facilita* a B y el negativo que A *inhibe* a B. Esto resuelve una crítica histórica al análisis estructural clásico (Saritas & Smith 2011): la imposibilidad de distinguir un sistema en el que A promueve B de uno en el que A frena B.

Cada lente integra los signos de manera distinta:

MicMac sigue trabajando con magnitudes absolutas ($|M[i,j]|$), pues se enfoca en intensidad. Una inhibición fuerte cuenta como influencia fuerte: A sí mueve a B, simplemente lo hace en sentido contrario.

DEMATEL preserva signos a lo largo del cálculo. La normalización usa $\max(\text{rowSums}(|M|), \text{colSums}(|M|))$ para garantizar invertibilidad de $(I - D)$ incluso con muchos negativos. R y C se calculan sobre la T firmada; R-C captura ahora *facilitación neta* versus *inhibición neta*: una variable con R-C muy negativo puede ser causa-inhibidora (lanza más, pero en sentido frenador), no solo efecto.

ISM aplica el umbral sobre la magnitud ($|M[i,j]| \geq t$), igual que con los positivos. La jerarquía estructural responde a alcanzabilidad, no a sentido causal.

6 · Bibliografía

Fuentes primarias

- Godet, M. (1991). *De l'anticipation à l'action: manuel de prospective et de stratégie*. Dunod, Paris.
- Godet, M., Bourse, F., Chapuy, P. & Menant, I. (1991). *Futures studies: a tool-box for problem solving*. UNESCO, Paris.
- Godet, M. (2000). The art of scenarios and strategic planning: tools and pitfalls. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(1), 3-22.
- Fontela, E. & Gabus, A. (1976). *The DEMATEL Observer, DEMATEL 1976 Report*. Battelle Geneva Research Center, Geneva.
- Warfield, J. N. (1973). On arranging elements of a hierarchy in graphic form. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(2), 121-132.
- Warfield, J. N. (1974). Developing interconnection matrices in structural modeling. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-4(1), 81-87.

Tradición colombiana y latinoamericana

- Mojica, F. J. (2006). *Concepto y aplicación de la prospectiva estratégica*. Universidad Externado de Colombia, Bogotá.
- Mojica, F. J. (2008). *Forecasting y foresight: dos escuelas, dos enfoques*. *Med-UNAB*, 11(1).
- Medina Vásquez, J. & Ortegón, E. (2006). *Manual de prospectiva y decisión estratégica: bases teóricas e instrumentos para América Latina y el Caribe*. CEPAL, Serie Manuales No. 51, Santiago.
- Medina Vásquez, J., Becerra, S. & Castaño, P. (2014). *Prospectiva y política pública para el cambio estructural en América Latina y el Caribe*. CEPAL, Santiago.

Críticas, revisiones y extensiones modernas (2007-2025)

- Chang, B., Chang, C. W. & Wu, C. H. (2007). Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria. *Expert Systems with Applications*, 38, 1850-1858.
- Saritas, O. & Smith, J. E. (2011). The big picture — trends, drivers, wild cards, discontinuities and weak signals. *Futures*, 43(3), 292-312.
- Bishop, P. & Hines, A. (2012). *Teaching about the Future*. Palgrave Macmillan, London.
- Khatwani, G., Singh, S. P., Trivedi, A. & Chauhan, A. (2015). Fuzzy-TISM: a fuzzy extension of TISM for group decision making. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 16(1), 97-112.
- Saxena, J. P., Sushil & Vrat, P. (1992). Hierarchy and classification of program plan elements using interpretive structural modeling. *Systems Practice*, 5(6), 651-670.
- Pawar, S., Tiwari, A. & Daim, T. (2024). Identifying key influencing factors of cross-regional railway infrastructure interconnection: a fuzzy integrated MCDM framework. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12(1).
- Hota, J. R. (2024). Framework of challenges affecting adoption of people analytics in India using ISM and MICMAC analysis. *Vision: The Journal of Business Perspective*, 28(3).
- Si, S. L., You, X. Y., Liu, H. C. & Zhang, P. (2018). DEMATEL technique: a systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, art. 3696457.

Aplicaciones en política pública latinoamericana

- Departamento Nacional de Planeación, Colombia (varios años). *Prospectiva Territorial — ejercicios de visión de largo plazo para departamentos (Arauca, Atlántico, Boyacá, Cauca, Cesar, Magdalena, Meta, Risaralda)*.
- DNP Colombia (2024). *Kit de Planeación Territorial (KPT)*. Herramienta para construcción de Planes de Desarrollo Territorial con metodología de cadena de valor. Cubre 889 municipios y 32 gobernaciones.

Garibay-Carlos, A., Castañeda-Burciaga, S. & Cuevas-Vargas, H. (2020). Análisis estructural MicMac para determinar las variables estratégicas de la agroindustria azucarera en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 17(4), 1325-1346.

7 · Limitaciones reconocidas de esta implementación

Por transparencia, declaramos las decisiones de implementación que afectan los resultados y que un auditor podría cuestionar:

- **Trato de la categoría P (potencial).** Numéricamente se interpreta como 1 (débil). En la matriz se marca con color distinto para preservar la información cualitativa. Versiones futuras tratarán P como un escalar configurable.
- **Mediana como divisor de cuadrantes.** Tanto MicMac como DEMATEL usan la mediana de los valores para dividir los cuadrantes. Esto es robusto a outliers pero puede mover una variable de cuadrante si se agrega o se quita una variable atípica. La media aritmética sería más estable pero más sensible a outliers.
- **Convergencia de MicMac al paso 3-6.** Si la matriz no se estabiliza al paso 6, reportamos el paso 6 como tope. En la práctica esto solo ocurre con matrices casi sin información (la mayoría de celdas en cero) o con ciclos cerrados de retroalimentación muy fuerte.
- **Inversión de (I – D) en DEMATEL.** Se realiza por eliminación Gauss-Jordan local en el navegador. Para matrices $n \leq 60$ (límite actual del módulo) la complejidad $O(n^3)$ es irrelevante. Para $n > 60$ la herramienta no permite ingresar más variables.
- **Resolución de ciclos en ISM.** Si después de iterar por $n+2$ pasos quedan variables sin asignar (por ciclos cerrados sin resolución), se agrupan en un último nivel etiquetado como *indeterminado*. Esto es trazable en el output JSON.

Reproducibilidad. Toda la matemática se ejecuta en el cliente. El código fuente es legible en la herramienta web (View Source). El export JSON contiene la matriz, las variables, el paso de estabilización de MicMac, el umbral de ISM y los rankings de las tres lentes, permitiendo verificación independiente.

Cierre

Esta herramienta no busca reemplazar el juicio experto sino estructurarlo. Sus resultados son tan buenos como las variables que definas y las calificaciones que ingreses. Tres lentes complementarios sobre la misma matriz reducen el riesgo de leer mal el sistema: cuando las tres apuntan a la misma variable como clave, la inferencia es robusta. Cuando difieren, hay que mirar el detalle. Esa es, en últimas, la promesa del análisis estructural: hacer explícita la complejidad que el cerebro humano no puede sostener.