



Decisiones estratégicas en el medio rural y la franja urbano - rural

Aplicaciones con Análisis Multicriterio Discreto

Jorge D. de Prada, Estela R. Cristeche y Diego Tello

(Comps.)

C*UyE
Colección Vinculación y Educación

ISBN 978-987-688-531-7
e-book

UniRío
editora

CAPÍTULO 3

Guía para la modelización multicriterio discreta PROMETHEE

Cristeche E.⁷; de Prada J.⁸ y Tello D.⁹

Introducción

El propósito principal de la Guía de aplicación de Análisis Multicriterio Discreto PROMETHEE es facilitar el aprendizaje de un método que permite analizar, discutir y ayudar a tomar decisiones estructurales de territorio en el medio rural y la franja urbano-rural. Particularmente, se hace referencia a decisiones discretas, en las cuales las alternativas a considerar son finitas, competitivas, y cuyos atributos o criterios (ambientales, económicos, sociales y político- institucionales) muestran algún conflicto.

El método de ordenación (*outranking*) PROMETHEE – *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* – es uno de los métodos de ayuda multicriterio más recientemente desarrollados. Las versiones I (para ordenación parcial de alternativas) y II

7 Investigadora Centro de Investigación en Economía y Prospectiva, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Contacto: cristeche.estela@inta.gob.ar

8 Docente del Departamento de Economía Agraria, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto. Contacto: jdeprada@ayv.unrc.edu.ar

9 Investigador Asistente ISTE CONICET-UNRC. Docente Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Río Cuarto. Contacto: dtello@fce.unrc.edu.ar

(para ordenación completa de alternativas) fueron creadas por J.P. Brans en 1982. En tanto, los métodos PROMETHEE III (*ranking* basado en intervalos) y IV (problemas de decisiones continuas) fueron desarrollados por Brans y Mareschal en 1984. En 1988 fue introducido GAIA (Graphical Analysis for Interactive Aid) como un complemento gráfico de los métodos de ordenación PROMETHEE. En 1992, se desarrolla PROMETHEE V para resolver problemas con restricciones. En comparación con otros métodos multicriterio discreto, el método PROMETHEE resulta simple en cuanto a su concepción y aplicación, facilitando la comunicación entre modeladores y tomadores de decisiones, hecho que se evidencia en su amplia aplicación en diversos campos - gestión ambiental, logística, inversiones, salud pública, localización, etc. - en los últimos años (Bezhadian *et al.*, 2013).

La presente guía desarrolla el método PROMETHEE I y II cuyos resultados pueden ser obtenidos, ya sea usando una planilla de cálculo desarrollando un procedimiento paso a paso para interpretar resultados intermedios, o por “Visual PROMETHEE software”¹⁰. Se utiliza para ilustrar la aplicación del método paso a paso el caso de evaluación de alternativas de expansión urbana de la ciudad de Río Cuarto, en la provincia de Córdoba, Argentina.

Conceptos utilizados

Alternativa o acción (actuación) es utilizada en el método PROMETHEE para identificar la posible decisión o ítem a evaluar. La alternativa o acción es una de las propuestas a ser considerada en la evaluación u ordenación, y tiene atributos que la diferencian de las otras alternativas.

Criterio: se refiere a un atributo o característica asociada a cada alternativa que permite realizar las comparaciones de acuerdo a las preferencias de los tomadores de decisiones. Los valores de los criterios permiten diferenciar una alternativa de las otras y compararlas. En el método PROMETHEE, los criterios pueden ser cualitativos o cuantitativos. Los criterios permiten incorporar las dimensiones del desarrollo sostenible - ambiental, económica y social - poniendo sobre relieve los conflictos y las sinergias entre éstas para cada una de las alternativas o acciones a evaluar.

Objetivo es la dirección deseada de cambio de un criterio o atributo. Cuando se hace referencia a la “*maximización*” se entiende que un mayor valor del atributo es mejor o más deseable, y, por el contrario, cuando se hace referencia a “*minimización*” se entiende que un menor valor del atributo es mejor o más deseable.

Tomador de decisión (TD) corresponde al individuo, organización o institución que es responsable de establecer los criterios, los objetivos, y las preferencias para determinar la alternativa que mejor satisface sus intereses. En el método PROMETHEE el tomador de

¹⁰ Visual PROMETHEE es la última y más completa y actualizada implementación de software del Métodos de ayuda a la decisión multicriterio PROMETHEE y GAIA (MCDA). El software ha sido desarrollado por VPSolutions bajo la supervisión del profesor Bertrand Mareschal de la *Solvay Brussels School of Economics and Management de la Université Libre de Bruxelles* (Mareschal, 2013). Accesible en: <http://en.promethee-gaia.net/academic-edition.html>

decisión puede ser uno o varios, identificando las preferencias y atributos relevantes para cada uno.

Problema de decisión (para al menos un tomador de decisión) hace referencia a un conjunto de alternativas caracterizadas por un conjunto de criterios, que permiten su comparación de acuerdo a los objetivos y preferencias del TD.

Preferencia: se refiere a la valoración general que realiza el TD para seleccionar u ordenar las alternativas. El método PROMETHEE permite al TD manifestar sus preferencias mediante la definición de tres elementos: i) los objetivos asociados a los criterios (maximizar o minimizar), ii) la función de preferencia y sus umbrales, y iii) la ponderación o peso asignado a cada criterio.

Función de preferencia se refiere a la transformación de las magnitudes de las diferencias de un criterio entre alternativas, medidas en sus unidades originales, a valores relativos en el intervalo 0-1. Estos pseudocriterios en el intervalo 0-1 representan el grado de preferencia del TD. También, la función de preferencia normaliza las diferencias en la medición de criterios para facilitar la agregación¹¹. El método PROMETHEE, contempla seis tipos de funciones de preferencias (ver más adelante Tabla 2.2). Para los criterios cuantitativos la magnitud de la diferencia entre dos alternativas en un criterio j^h permite establecer umbrales de indiferencia, q_j , y de preferencia absoluta, p_j .

Umbral de indiferencia, q_j , es la magnitud mínima, medida entre los valores originales del criterio j^h , para la que el TD percibe que una alternativa es similar a la otra, asignándole un valor de 0 a la diferencia entre ambas. En otras palabras, un TD puede considerar dos alternativas (i, i+1) como iguales para el criterio j^h , sólo cuando la diferencia entre ambas no supera un cierto porcentaje (%) con respecto al rango¹² de ese criterio.

Umbral de preferencia absoluta, p_j , es la magnitud máxima medida en los valores originales del criterio j^h a partir de la cual el TD considera que la diferencia entre alternativas es relevante, y, por tanto, que una de ellas es significativamente mejor a la otra. Consecuentemente, le asigna un valor de 1 (uno) en la función de preferencia a la diferencia entre ambas alternativas.

Ponderación: Es el peso relativo que asigna el TD a cada uno de los criterios. La ponderación le otorga flexibilidad al TD y pone de manifiesto su escala de valores. Hay varios métodos de ponderación con sus ventajas y desventajas (ver más detalles en Pomerol y Barba Romero, 2000). Los métodos directos son más fáciles de comunicar e interpretar y el método de puntuación simple ha sido usado en este libro. Por ejemplo, un TD puede asignar más peso

¹¹ Por ejemplo, si el TD considera que la minimización es el objetivo deseado para el atributo costo de los servicios públicos - que varían de acuerdo a las alternativas consideradas entre AI(=\$1MM) y AII(=\$10MM)- entonces la diferencia (AI, AII) igual (\$-9MM) . Por tanto, la función de preferencia usual permite transformar esta magnitud a 1. En palabra la AI supera a la AII; y va agregar esta magnitud ponderada en las fortalezas de AI. En contraste, la diferencia (AII, AI) es \$9MM y con la función de preferencia asignará un 0. Por lo tanto, en la comparación de AII con AI no agrega valor a las fortalezas de AII.

¹² Diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo que adquiere ese criterio para las distintas alternativas consideradas.

a criterios ambientales que a criterios económicos, en tanto que otro TD, puede asignar más peso a criterios sociales o económicos, y otro puede ponderar en igual magnitud a los criterios ambientales y económicos. En la presente guía, se considera un rango de ponderación entre 0 y 10. Si un TD asigna valor 0 a la ponderación de un criterio, significa que elimina dicho criterio de la evaluación de las alternativas; mientras que, si asigna 10, significa que ese criterio tiene la máxima importancia para él. Por su parte, aquellos valores ubicados entre 1 y 9 ponen de manifiesto grados de importancia intermedios.

Matriz de decisión, es una tabla que presenta en las filas las diferentes alternativas de decisión (A_i) y en las columnas los criterios o atributos (C_j) considerados para caracterizar a las alternativas definidas (ver Tabla 2.1). Asimismo, suele incluir las preferencias del TD con relación a los criterios para exponer la información que se utiliza al aplicar el método para la evaluación del problema. Dichas preferencias incluyen: los objetivos (maximizar o minimizar), los ponderadores (W), los ponderadores normalizados (w) las funciones de preferencias, y los umbrales de indiferencia (q_j) y de preferencia absoluta (p_j) (si corresponden) para cada uno de los criterios.

Tabla 2.1. Ejemplo de Matriz de decisión.

Alternativas	Criterios ²						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	Hectáreas	\$mil/año	\$mil/año	\$mil/año	Cantidad	Índice	Índice
A1: Tendencial	70.000	4	5	0	3.000	Bajo	Medio
A2	53.000	26	0	-71	2.500	Muy Bajo	Muy Alto
....	77.000	30	27	0	4.500	Alto	Bajo
....	57.000	41	20	-57	3.600	Alto	Alto
An	114.000	76	71	105	5.900	Muy Alto	Medio
Objetivo	MAX	MAX	MIN	MAX	MAX	MIN	MIN
F. Preferencia	V lineal	V lineal	V lineal	V lineal	V lineal	Usual	Usual
W	10	10	10	10	10	10	10
w normalizado	14,30%	14,30%	14,30%	14,30%	14,30%	14,30%	14,30%
Rango	61.000	72	71	176	3.354	4	3
q_j	6.1	7	7	18	335	Nc	Nc
p_j	54.9	65	64	158	3.019	Nc	Nc

Fuente: Elaboración propia. Nota: Para los criterios cualitativos C6 y C7, se consideran una escala ordinal que va de 1 (Muy Bajo) a 5 (Muy Alto).

Análisis de sensibilidad o paramétrico es el análisis que permite evaluar qué sucede con el *ranking* u ordenamiento de alternativas cuando se modifica uno o dos parámetros, por ejemplo: el valor de las ponderaciones, los umbrales de indiferencia y de preferencia. El

análisis de sensibilidad muestra la estabilidad de los resultados obtenidos ante cambios en los parámetros utilizados.

Análisis de escenarios: se refiere cuando se modifican un conjunto de preferencias o parámetros que representan diferentes hipótesis de cambio. En el método PROMETHEE los diferentes escenarios pueden representar diferentes puntos de vistas de los TD o diferentes hipótesis. Pueden significar un cambio en los parámetros de preferencias, e incluso el cambio de criterios de evaluación, debido al impacto diferentes de variables externas sobre las intervenciones.

Aplicación paso a paso del Análisis Multicriterio Discreto PROMETHEE II

En esta sección, se presenta de manera sintética el procedimiento paso a paso para implementar PROMETHEE II. El método PROMETHEE II tiene como objetivo establecer un ordenamiento (*ranking*) completo de un conjunto finito de alternativas (**A**) de acuerdo a su desempeño global considerando las preferencias de los tomadores de decisiones. El principio básico de PROMETHEE II consiste en la comparación de a pares de alternativas para cada uno de los criterios considerados.

En el Paso 1 se inicia el procedimiento para determinar desviaciones basadas en comparaciones por pares para cada uno de los criterios considerados. Se continúa aplicando una función de preferencia para cada criterio en el Paso 2, y en el Paso 3 se calcula el índice global de preferencia para cada par de alternativas. En el paso 4 se calculan la sumatoria de fortalezas y debilidades, y finalmente en el paso 5 se realiza el cálculo del resultado neto de estos dos últimos que deriva en un ordenamiento o *ranking* completo del conjunto de alternativas. A continuación, se presentan en detalle cada uno de estos pasos:

Paso 1. Determinación de las desviaciones basada en una comparación de a pares

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b)$$

Donde $d_j(a, b)$ denota la diferencia entre las evaluaciones de las alternativas a y b para cada criterio j

Paso 2. Aplicación de la función de preferencias¹³

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \quad j = 1, \dots, k$$

Donde $P_j(a, b)$ denota la preferencia de la alternativa a con respecto a la alternativa b en cada criterio j , como una función de $d_j(a, b)$

Paso 3. Cálculo de un índice global o integral de preferencias

$$\forall a, b \in A, \quad \pi(a, b) = \sum_{i=1}^k P_i(a, b)w_i$$

Donde $\pi(a, b)$ de la alternativa a sobre la alternativa b (de 0 a 1) es definida como la suma ponderada de $P(a, b)$ para cada criterio, y w_j es la ponderación asociada al criterio j –ésimo

Paso 4. Cálculo de flujos de *outranking* /ordenamientos / PROMETHEE I ranking parcial

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad y \quad \phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

Donde $\phi^+(a)$ y $\phi^-(a)$ denotan el flujo de ordenamientos positivos (fortalezas) y el flujo de ordenamientos negativos (debilidades) respectivamente para cada alternativa a . Y x representa el conjunto de alternativas restantes ($\neq a$).

Paso 5. Cálculo de los flujos netos de ordenamientos/ PROMETHEE II *ranking* completo

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

Donde $\phi(a)$ denota el flujo de ordenamientos neto para cada alternativa.

Funciones de preferencia

Un aspecto fundamental en la aplicación del método PROMETHEE es la selección de la función de preferencias en el Paso 2.

PROMETHEE propone seis funciones de preferencia que se presentan en la Tabla 2.2 (ver más detalles en: Behzadian *et al.*, 2010; Brans y Mareschal, 2005).

¹³ En la próxima página (Tabla 2.2) se presentan las funciones de preferencias más difundidas para aplicar en el método PROMETHEE.

El eje de las ordenadas identifica la preferencia del criterio $j^{\text{ésimo}}$ entre 0 y 1; y el eje de las abscisas identifica la diferencia entre los pares de alternativas a_k y a_l para el criterio $j^{\text{ésimo}}$.

Tabla 2.2 Tipos de Funciones de Preferencia propuestas en PROMETHEE

Tipo de Criterio Generalizado	Definición	Parámetros a fijar
	$P_j(d_j) =$	
1. Usual	$\begin{cases} d_j(a_k, a_l) \leq 0 & 0 \\ d_j(a_k, a_l) > 0 & 1 \end{cases}$	-
2. Forma U	$\begin{cases} d_j(a_k, a_l) \leq q & 0 \\ d_j(a_k, a_l) > q & 1 \end{cases}$	q
3. Forma V	$\begin{cases} d_j(a_k, a_l) \leq 0 & 0 \\ 0 \leq d_j(a_k, a_l) \leq p & \frac{d_j}{p} \\ d_j(a_k, a_l) > p & 1 \end{cases}$	p
4. Forma Nivel	$\begin{cases} d_j(a_k, a_l) \leq q & 0 \\ q \leq d_j(a_k, a_l) \leq p & \frac{1}{2} \\ d_j(a_k, a_l) > p & 1 \end{cases}$	p, q
5. Forma lineal	$\begin{cases} d_j(a_k, a_l) \leq q & 0 \\ q \leq d_j(a_k, a_l) \leq p & \frac{d_j - p}{p - q} \\ d_j(a_k, a_l) > p & 1 \end{cases}$	p, q
6. Forma Gaussiana	$\begin{cases} d_j(a_k, a_l) \leq 0 & 0 \\ d_j(a_k, a_l) > 0 & 1 - e^{-\frac{d_j^2}{2s^2}} \end{cases}$	s

Fuente: Brans y De Smet (2016)

En cada caso se deben definir a lo sumo 2 parámetros.

Como fue mencionado en apartado anterior:

- q es un umbral de indiferencia;
- p es un umbral de preferencia absoluta;
- s es un valor intermedio entre q y p :

El umbral de indiferencia q es la mayor diferencia/desviación entre el desempeño de un par de alternativas para un determinado criterio considerada como insignificante por el TD, mientras que el umbral de preferencia p es la desviación más pequeña que se considera suficiente para generar de una preferencia de una alternativa sobre otra.

En los casos de los tipos 4. Forma nivel y 5. Forma lineal, deben definirse el umbral de indiferencia (q) y el umbral de preferencia absoluta (p).

En el caso del tipo 6, Forma Gaussiana, la función de preferencias se mantiene creciente para todas las desviaciones y no tiene discontinuidades, ni en su forma, ni en sus derivaciones. Debe definirse un parámetro s que determina el punto de inflexión de la función de preferencia. La recomendación es determinar en primer lugar q y p , y luego determinar un valor de s que se ubique en el medio de estos dos. Si s se ubica cerca de q , las preferencias se verán reforzadas ante pequeñas desviaciones, mientras que si s se ubica cerca de p las preferencias ante pequeñas desviaciones se verán suavizadas.

En la siguiente sección, se presenta la aplicación del método PROMETHEE II paso a paso al caso de expansión urbana de la ciudad de Río Cuarto, provincia de Córdoba.

Aplicación PROMETHEE II: Caso de expansión urbana ciudad de Río Cuarto

El medio físico y ordenamiento de territorio: definiciones conceptuales

El medio físico constituye los elementos y procesos naturales del territorio (para más detalles, ver: Gómez Orea (2008)). Sobre él se instala la población con sus múltiples relaciones – producción, consumo, generación de desechos, movilidad y hábitat - a través de una determinada forma de ocupación del territorio. En consecuencia, el medio físico constituye el soporte territorial de las múltiples actividades a ordenar en el espacio geográfico.

Los principales elementos del medio físico son:

- El medio inerte: lluvias, temperatura, aire, agua, suelo y subsuelo.
- El medio biótico: flora y fauna.
- El medio perceptual: paisajes y vistas.

Las funciones básicas que cumple el medio físico son cuatro:

- a) Función de provisión: fuente de recursos naturales (aire, agua, minerales) y materias primas para la producción de bienes (alimentos, energía, madera, fibras, etc.).
- b) Funciones de regulación: de los ciclos del agua, de los nutrientes, del carbono, etc.
- c) Funciones de soporte: para hábitat humano-ciudad, de la biota, recepción de residuos, infraestructura de comunicaciones, industrias, etc.

- d) Funciones culturales: recreación, turismo, actividades religiosas, actividades científicas, etc.

Para que el medio físico sea sostenible deben aplicarse criterios en el Ordenamiento Territorial (OT) según la función. Por ejemplo, para la función provisión, el uso de recursos para aquellos que son renovables (agua, suelos, vegetación) debe respetar las tasas de renovación. Por su parte, en el caso de los recursos no renovables (combustibles fósiles y minerales) el uso debe estar orientado a la eficiencia de consumo, la posibilidad de reciclado, entre otros.

En lo que respecta a la función soporte de disposición final de residuos, los criterios generales de sostenibilidad se sintetizan en disponer de un espacio apropiado como receptor final disminuyendo los volúmenes de emisión o vertido, considerando la eficiencia de los procesos de transformación para bajar la carga contaminante y así evitar consecuencias negativas en el ambiente.

Cada actividad que se asiente en el territorio, debe contemplar como criterio excluyente compatibilizar con las funciones críticas del medio físico (provisión, regulación, soporte o cultural). Por ejemplo, no destinar residuos a un sitio con alto riesgo de contaminación del agua o no permitir la expansión urbana en un sitio cuya función central es la recreación. Hecha esta salvedad, dado que el medio físico no es homogéneo, éste presenta diferentes aptitudes para cada actividad. Por el contrario, cada actividad genera un impacto sobre el medio físico que dependerá de la naturaleza de la misma y de la fragilidad del mismo. Por ejemplo, los espacios susceptibles a inundación (suelos bajos) tienen menos aptitud para el poblamiento¹⁴. A su vez, el poblamiento impacta sobre el régimen hídrico ya que aumenta la impermeabilización del suelo e incrementa el riesgo de inundaciones. La relación aptitud/impacto se define como la “Capacidad de Acogida del Territorio”.

Planificación territorial de la expansión urbana de la ciudad de Río Cuarto

Los grandes interrogantes a responder frente a la presión de crecimiento de la población urbana de la ciudad de Río Cuarto son: ¿dónde localizamos el crecimiento de la población urbana?, ¿con qué patrón de urbanización?

Los patrones de urbanización con menores impactos ambientales, económicos y sociales representan un gran desafío para los gobiernos, el Estado y la sociedad civil por dos razones principales. En primer lugar, la población urbana crece a un ritmo mayor que la población total; consecuentemente, se deberán crear las condiciones de hábitat y calidad de vida para albergar una mayor población urbana en el futuro. En segundo lugar, los movimientos de población urbana al periurbano o la expansión urbana dispersa “sprawl” amplían los conflictos y la conversión de tierras rurales a urbanas, más allá del propio crecimiento poblacional. Este patrón de urbanización disperso se materializa con alta densidad edilicia en el centro y en el establecimiento de barrios de baja densidad poblacional, enclavados en las zonas rurales, en forma discontinua y fragmentada, dejando grandes espacios vacíos (EEA, 2006). El patrón de urbanización dispersa genera graves inconvenientes (Carruthers y Ulfarsson, 2003a, 2003b; EEA, 2006). Un informe de la “Agencia Ambiental Europea”

¹⁴ Por poblamiento se entiende a la forma de asentamiento de los grupos de la población en el territorio.

menciona que la expansión urbana dispersa además socava la propia cultura y valores comunitarios, con mayor riesgo y dependencia alimentaria, y es muy probable que haga insuficientes los esfuerzos globales para alcanzar las metas de mitigación del cambio climático (ver más detalles en EEA, 2006). Los inconvenientes de la urbanización dispersa se han verificado también en América Latina (de Prada, Degioanni, Cisneros, Galfioni, y Cantero G., 2012; Inostroza, Baur, y Csaplovics, 2013; Matteucci & Morello, 2009; Morello *et al.*, 2000).

Existen varios patrones de poblamiento urbano que permiten controlar la dispersión. Las políticas de poblamiento urbano anti-dispersión han tenido resultados fiscales en términos de gasto en provisión de servicios públicos (luz, gas, caminos, protección policial, espacios verdes, salud, educación, etc.) más satisfactorios en comparación con ciudades con expansión dispersa (Carruthers y Ulfarsson, 2003). Uno de estos patrones de expansión anti-dispersión, la ecociudad, promueve: i) el incremento de la eficiencia en el uso de suelo, de la energía y del agua, ii) la asignación de prioridad a los peatones y ciclistas en términos de infraestructura de movilidad urbana, seguidos por transporte público, y por último, el automóvil, iii) usos múltiples del suelo, y iv) la inclusión de espacios verdes (Gaffron, Huismans, y Skala, 2008; Vernay, Salcedo Rahola, y Ravesteijn, 2010). Esta modalidad de poblamiento ha sido implementada en varias ciudades y comunas europeas con resultados muy promisorios (Gaffron *et al.*, 2008). El problema que se aborda en este capítulo para ilustrar la aplicación paso a paso del método PROMETHEE II es la elección de un patrón de urbanización y locación del poblamiento urbano adicional en una ciudad intermedia y comuna en la provincia de Córdoba, Argentina: Río Cuarto, que reduzca los inconvenientes detectados en la expansión urbana dispersa.

Modelo multicriterio discreto: propuestas de ordenamiento y criterios

En esta sección, se resuelve con el método PROMETHEE II una matriz de decisión de cinco alternativas de propuesta de expansión urbana (PEU) al año 2030 y siete criterios de evaluación de las mismas, tomando la información de los trabajos de Prada *et al.* (2012, 2017). A continuación, se presentan las propuestas de expansión urbana:

PEU1: Río Cuarto-Tendencial: La *PEU1* constituye la proyección de la tendencia histórica de ocupación del territorio (Ver Figura 3.1). En ella la expansión de la urbe sobre el medio rural se realizó según las fuerzas que han operado como factores de localización en el pasado, básicamente guiadas por la infraestructura pública heredada que ha repercutido en la diferenciación del mercado de tierras y sus precios. Aunque coexisten diferentes formas de desarrollo y ocupación, en la mayoría de los casos la población ha ocupado el suelo sin funciones urbanísticas, y posteriormente ha reclamado por el desarrollo de los servicios públicos (luz, agua, cloacas, etc.) para que pueda cumplir dichas funciones. En esta situación el crecimiento urbano es disperso, sin control, con muchos parches urbanos que pueden localizarse aún fuera del límite actual de la ciudad.

PEU2: Río Cuarto Ecociudad 2030. Esta alternativa se propone incrementar la población urbana para el año 2030, sin expandir los límites urbanos actuales sobre el medio rural (Figura 3.1). La urbanización se realiza densificando, renovando y ocupando las áreas vacías dentro del actual límite urbano (propiedades privadas sin usos específicos, enmalezados, etc.). El

patrón de movilidad urbana, gestión de los residuos, y poblamiento sigue los lineamientos establecidos por Gaffron *et al.* (2008) en toda la ciudad¹⁵.

PEU3: Río Cuarto expansión hacia el Norte. En esta alternativa de ordenamiento, la ciudad se expande hacia el Norte (entre las rutas nacionales 36 y 158), ocupando las tierras de media aptitud productiva y baja aptitud ecológica (ver Figura 3.1). La fuerza impulsora de locación de esta área la constituye el desarrollo diferencial de infraestructura pública (infraestructura de movilidad y servicios) por fuera de los límites de la circunvalación en el actual gran Río Cuarto. En esta alternativa al igual que la *PEU4* y *PEU5* se actúa sobre el nuevo espacio con los principios similares a la *PEU2-Eco-ciudad* para su urbanización. En tanto, se diferencia de la *PEU2* porque en la actual área urbanizada no se inducen transformaciones mayores, aunque si se incluye la cobertura de los servicios básicos (agua potable, cloacas, gas y desagües pluviales). Esta propuesta, al igual que las *PEU4* y *PEU5*, puede albergar más población de la proyectada para el año 2030 de acuerdo a la superficie y densidad adoptada.

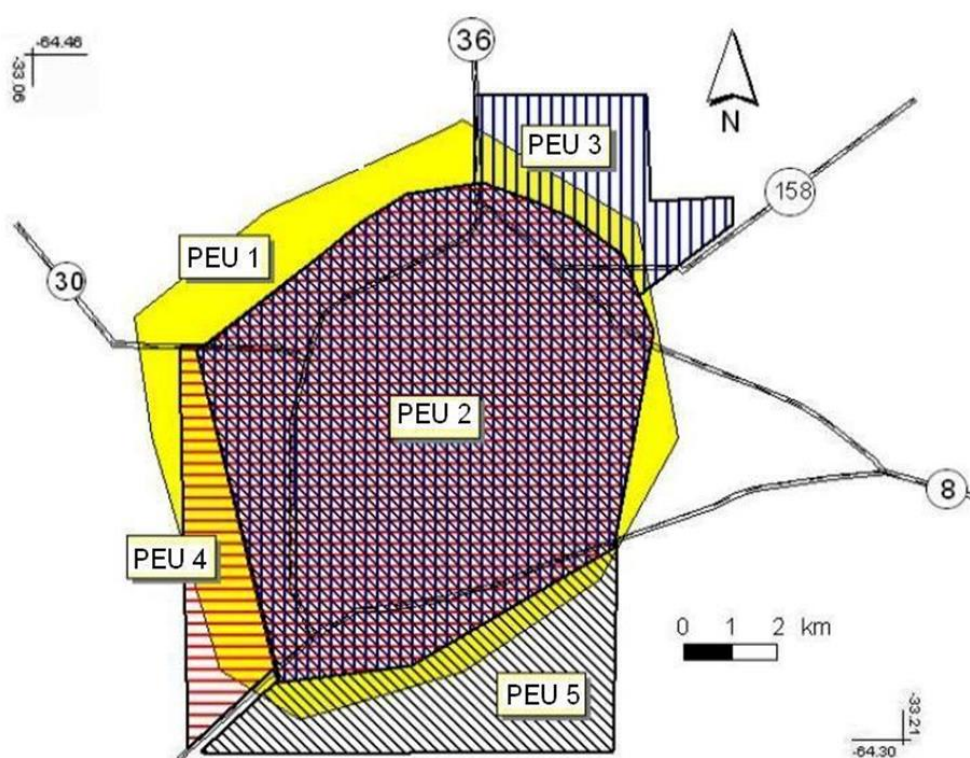


Figura 3.1. Localización de las alternativas de expansión urbana, ciudad de Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Fuente: Elaboración propia

¹⁵ Esta alternativa consiste en un bloque de ocho (8) torres con ocho (8) pisos por torre y una hectárea asignada a una plaza pública. La tierra asignada a cada torre es en promedio una hectárea, la torre ocupa una superficie cubierta de 500 m² en promedio y el resto del área (9500m²) es utilizada con diferentes fines: parque, huerta, espacio para convertir los residuos orgánicos, receptor agua de lluvia, e infraestructura de uso común (p.e. quincho y piscina, sendas peatonales internas, etc.). Cada torre tiene una capacidad de 93 habitantes (30 hogares). El ancho de calle entre bloques es en promedio de 40m. Nota: las prioridades para la movilidad son: 1) peatonal, 2) bicicletas, 3) el transporte público, y 4) el vehicular en la última jerarquía. Es importante notar que, dada la modalidad de ocupación hasta el año 2008, existen importantes áreas sin urbanizar dentro de lo que ha sido definido como límite de la ciudad y que es aproximadamente el 40% de la superficie de esta alternativa.

PEU4: Río Cuarto expansión hacia el Oeste. En esta alternativa la ciudad se desarrolla entre la ruta provincial 30 y la nacional 8 aproximándose hacia la localidad de Holmberg y ocupando tierras de media aptitud productiva y baja aptitud ecológica. En esta propuesta, la fuerza de localización también la constituye el desarrollo diferencial de infraestructura pública por fuera de los límites de la actual circunvalación, particularmente sobre ruta 30 hacia el oeste (Golf Club). El área urbanizada se proyecta también considerando criterios de sustentabilidad y puede albergar más población que la proyectada para el año 2030, de acuerdo a la superficie y densidad adoptada.

PEU5: Río Cuarto expansión hacia el Sur. En esta alternativa la ciudad se expande hacia el Sur cuyo eje lo constituye el camino a Santa Flora y se conecta con la ruta nacional 8 en dos puntos: al norte y al oeste. Integra en su espacio los parques industriales, el Aeroclub, la Sociedad Rural y el autódromo (ver Figura 3.1). Ocupa tierras de media a alta aptitud productiva y baja aptitud ecológica. La fuerza impulsora de localización es el desarrollo diferencial de la infraestructura pública. El área urbanizada se proyecta también considerando criterios de sustentabilidad y puede albergar más población que la proyectada para el año 2030.

Criterios

Criterio 1: Pérdida de Renta Agraria (PRA): es equivalente al costo de conversión de tierras rurales a urbanas. Se calcula mediante el Valor Actual de una renta agraria a perpetuidad representado por la siguiente ecuación:

$$PRA = \frac{1}{r} \sum_{i=1} (A_i^{eu} RE_i + 0.5A_i^{za} RE_i)$$

donde A representa el área de tierra afectada hasta el año 2030, RE la renta económica, el subíndice i identifica las unidades de tierra de acuerdo a la aptitud productiva, los superíndices eu y za a la expansión urbana y la zona de amortiguación respectivamente, y r representa el costo de oportunidad social de la tierra, que se asume del 2%. La renta económica RE , es la diferencia entre los ingresos anuales de los productos agrarios neto de los costos directos de producción, tomado de Gil (2010) en precios constantes (\$c) promedio 2012. Para la tierra virgen (vacíos dentro de los ejidos urbanos que no están siendo utilizados con propósitos urbanísticos, ambientales, paisajísticos o agrarios) se considera que la renta económica es prácticamente cero. El segundo componente de PRA usa un coeficiente de 0,5 para representar la reducción de la RE del 50% en la zona de amortiguación. Este valor es arbitrario para reconocer la necesidad de un área regulada para reducir conflictos urbanos rurales futuros.

Criterio 2: Población futura estimada (PFE). La población para el año 2030 en la *PEU1*-tendencial y la *PEU2*-Ecociudad se proyecta en base a la tasa de crecimiento poblacional histórica. En contraste, la *PEU3*, la *PEU4* y la *PEU5*, albergarían más población que la tendencial con el objetivo de reducir la presión poblacional sobre los grandes centros urbanos del país. En este criterio, el espacio rural convertido a urbano considera una densidad poblacional de alrededor de 65 habitantes por hectárea, y permitiría alcanzar una densidad

en la ciudad de 28, 26 y 31 habitantes por hectárea para el año 2030 en la *PEU3*, la *PEU4* y la *PEU5*, respectivamente.

Criterio 3: Pérdida de servicios ecosistémicos (PSE). La conversión de tierras rurales a urbanas reduce la capacidad de las mismas de brindar servicios ecosistémicos (ej. biodiversidad, regulación de ciclo de carbono y agua, etc.). En el área de estudio se delimitaron cuatro unidades ambientales con aptitudes diferentes para ofrecer servicios ecosistémicos. Se asignó un índice de aptitud que toma un valor de 100, 50, 20 y 10 para cada una de las unidades ambientales: la ribera del río Cuarto; el humedal de San José; la faja fluvio-eólica; y las planicies eólicas sur y norte, respectivamente. La PSE se estima mediante la suma ponderada del correspondiente índice de aptitud y el área de tierras rurales convertidas a urbanas.

Criterio 4: Costos de inversión de infraestructura vial (CIIV). El desarrollo de la infraestructura vial constituye una fuerza de localización importante. El criterio considera las inversiones en las redes viales terrestres para mantener la conectividad. La infraestructura contempla las rutas colectoras y obras de cruce para conectar las áreas urbanas externas a la ciudad. Además, se consideran las inversiones en infraestructura de sendas peatonales, bicisendas e infraestructura para el transporte público en las zonas urbanizadas para la *PEU2*.

Criterio 5. Recolección de residuos sólidos urbanos (RRSU). El 60% de los residuos sólidos urbanos (RSU) son orgánicos (Delgadino *et al.*, 2011) y la cantidad total de RSU recolectados depende del patrón de expansión urbana. El aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en el sitio reduce significativamente las necesidades de recolección. En la *PEU1*, se considera que el sistema de gestión de RSU se mantiene similar al actual. Por el contrario, en la *PEU2* se considera que la población aprovecha los residuos orgánicos presentes en los RSU en su hogar o barrio. En las zonas urbanas existentes, la meta propuesta es que al menos un 30% de los residuos orgánicos generados en el hogar se aprovechen en el sitio, mientras que el 70% restante sea recolectado en forma similar a la actual. Por el contrario, en las zonas urbanas nuevas, la meta es que el 60% de los RSU se aproveche en el sitio y, por lo tanto, solo el 40% de los RSU generados necesite de recolección y transporte. Estos parámetros se utilizan para estimar la cantidad de RSU a recolectar en la *PEU2*. En la *PEU3*, la *PEU4* y la *PEU5*, se considera el 60% de aprovechamiento de los residuos orgánicos, solo en las nuevas áreas urbanizadas.

Criterio 6: Extensión de redes de servicios públicos (E-Redes). Se cuantifica la extensión de las redes troncales de agua potable, cloacas, gas natural y desagües pluviales, por las distancias para garantizar el 100% de cobertura de estos servicios públicos. Debido a que las dimensiones de cada una de las redes que permiten brindar el servicio varían en forma similar entre las distintas *PEU*, se unifican en un único criterio: Extensión de redes, medido en kilómetros y considerando este criterio un indicador *proxy* del costo de provisión de los servicios públicos mencionados.

Criterio 7: Esfuerzo político – institucional (EPI). Este criterio explicita la dimensión político-institucional en la construcción de cada una de las *PEU* a futuro, reconociendo los conflictos y los actores sociales que tienen poder para incidir en el futuro del territorio. Matus (2008) menciona que, en democracia, el gobierno cumple tres funciones claramente discernibles y que no deben confundirse: a) el diseño de las reglas que inducen y rigen los comportamientos del sistema social en el que se aspira a vivir; b) el diseño del proyecto

político (de gobierno) para utilizar o modificar las reglas sociales establecidas (explícitas e implícitas); y c) la conducción del proceso político, evaluando y corrigiendo sus resultados. En la primera y segunda función, se explicita la dimensión político-ideológica y el deseo de una sociedad deseada, considerando la forma elegida para alcanzarlo. En la tercera función la capacidad de los gobernantes para poner en práctica el proyecto y resolver los conflictos emergentes. El EPI captura en forma cualitativa la distancia entre los requerimientos para alcanzar el comportamiento para cada *PEU* y el comportamiento social actual. En este sentido, mantener el *status quo* tiene el menor EPI (*PEUI* tendencial); mientras que alcanzar el comportamiento social para desarrollar la *PEU 2*-Ecociudad requiere del mayor EPI por ser aquella que presenta las mayores diferencias con las reglas de comportamiento social actual.

Evaluación de las alternativas Propuestas de Expansión Urbana (*PEU*)

En la matriz de decisión, se pueden apreciar todas las *PEU* y el valor de los criterios (ver las primeras cinco filas de la Tabla 2.3). Es importante notar que no hay una *PEU* que supera a otra en todos los criterios. Por ello, es necesario buscar una solución de compromiso de acuerdo al peso que se le asigne a cada criterio.

Tabla 2.3 Matriz de decisión de las alternativas de expansión urbana (*PEU*) de la ciudad de Río Cuarto al 2030

	PRA \$ millones	PFE habitantes	PSE índice	CIIV \$ millones	RRSU ton/año	E-Redes km	EPI
PEU1	197	201.032	50.260	293	77.046	782	Muy bajo
PEU2	41	201.032	0	250	48.744	383	Muy alto
PEU3	106	232.936	1.850	266	71.561	552	Intermedio
PEU4	88	214.281	8.980	234	68.701	505	Intermedio
PEU5	140	280.776	19.210	308	78.895	655	Alto
Objetivo	Min	Max	Min	Min	Min	min	min
Tipo de preferencia	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Usual
Pesos	1	1	1	1	1	1	1
Rango	156	79.744	50.260	74	30.151	399	-
Umbral q_j	31,2	15.948,8	10.052,0	14,8	6.030,2	79,8	Nc
Umbral p_j	124,8	63.795,2	40.208,0	59,2	24.120,8	319,2	Nc
$p-q$	94	47.846	30.156	44	18.091	239	-

Nota: *PEU*: Alternativa propuesta de expansión urbana; PRA: Pérdida de renta agraria, PSE: Pérdida de servicios ecosistémicos; CIIV:= Costos de inversión en la infraestructura vial; RRSU: Recolección de residuos sólidos urbanos; E-Redes: Extensión de redes de servicios públicos; y EPI: Esfuerzo político institucional.

Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción de los criterios cuantitativos la función de preferencia utilizada es de tipo Lineal con un 10% en el umbral de indiferencia (q_j) y un 90% para el umbral de preferencia (p_j). Para el análisis de sensibilidad la función de preferencia se aumenta a un 30% el umbral de indiferencia (q_j) y un 70% el umbral de preferencia (p_j). En el caso de los criterios cualitativos la función de preferencia utilizada fue el tipo Usual.

En la siguiente sección se presentan una serie de ejercicios para resolver el modelo multicriterio definido para evaluar las alternativas de expansión urbana de la ciudad de Río Cuarto al 2030, aplicando el método PROMETHEE II en una planilla de cálculo y posteriormente con el software Visual PROMETHEE.

Ejercicios: Resolver el modelo multicriterio PROMETHEE

Para resolver el modelo multicriterio y ganar familiaridad con la notación matemática se desarrolla paso a paso el método PROMETHEE II. El archivo “*eje AMC PROMETHEE.xls*”¹⁶ contiene la matriz de decisión y etiquetadas las tablas para realizar los cálculos paso a paso.

Las instrucciones para trabajar en la planilla de cálculo se expresan en recuadros intercalados con los pasos sugeridos por Brans y Mareschal (2005) y Behzadian *et al.* (2010) para realizar el proceso de cálculo paso a paso.

En primer lugar, denotamos A para un conjunto de alternativas de expansión urbana a_i , $i = 1, 2, \dots, n$; y G un conjunto de criterios cualitativos y cuantitativos de evaluación de dichas alternativas denotados g_j , $j = 1, 2, \dots, m$

Paso 1. Transformar los criterios minimizar a maximizar

Se multiplica por (-1) aquellos g_j que son minimizados, en tanto, los criterios que son maximizados conservan su signo.

Paso 2. Calcular las diferencias entre alternativas por criterio $j^{\text{ésimo}}$

$d_j(a_i, a_k) = g_j(a_i) - g_j(a_k)$, para los subíndices i distintos de k ,

donde $d_j(a_i, a_k)$ representa la diferencia entre la alternativa a_i y a_k .

En el archivo *eje AMC PROMETHEE.xls* para cada criterio: PRA, PSE, CIIV, RRSU, E-Redes, EPI, etc. hay una Tabla para realizar las diferencias entre alternativas por criterio. Las Tablas están numeradas 2.1.-, 3.1.-, ..., 8.1.- (celdas B21 a B77).

¹⁶ El archivo “*eje AMC PROMETHEE.xls*” se puede acceder y descargar desde el repositorio Institucional de INTA <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/13610>

Se sugiere realizar las operaciones con fórmulas incluidas en la *Planilla de cálculo* para facilitar posteriormente el análisis de sensibilidad.

1. En la Tabla 2.1., tomar los valores del PRA desde la matriz de decisión (celdas C6:C10) y copiarlos en las celdas A24:A28, debajo de la etiqueta “PRA valor”.

Nota: Para este criterio - al igual que para los criterios PSE, CIIV, RRSU, E-Redes y EPI - se multiplica por (-1) cada uno de los valores copiados de la matriz de decisión a la correspondiente tabla de diferencias, para transformar los valores del criterio cuyo objetivo es minimización a maximización (Paso 1)

2. Tomar los valores A24:A28 y copiarlos de manera traspuesta para queden en la Fila 22, encima de la etiqueta de cada *PEU*, celdas C22, D22;..., G22.

Nota: Para este criterio - al igual que para los criterios PSE, CIIV, RRSU, E-Redes y EPI - se multiplica por (-1) cada uno de los valores copiados de la matriz de decisión a la correspondiente tabla de diferencias (celdas C6:C10 y celdas C22: G22), para transformar los valores del criterio cuyo objetivo es minimización a maximización (Paso 1)

3. Calcule las diferencias para el criterio PRA. A modo de ejemplo, en la celda D24: d_1 ($PEU1, PEU2$)= $PRA_1 - PRA_2 = -197 - (-41) = -156$. Dicha diferencia en formula Excel, se expresa: “+ $\$A24-D\22 ”. Copiar la formula y completar la tabla 2.1 con todas las diferencias entre pares de alternativas.
 4. Chequee los resultados obtenidos.
 5. Repita los puntos anteriores y complete las tablas 3.1 a 8.1.
-

Paso 3. Aplicar la función de preferencias

$$P_j(a_l, a_k) = F[d_j(a_l, a_k)], \quad 0 \leq P_j(a_l, a_k) \leq 1$$

donde P_j es la función de preferencias en el criterio $j^{\text{ésimo}}$ de la alternativa a_l con respecto a la a_k , transformando la diferencia d_j en una escala entre 0 y 1.

Por tanto, la función de preferencia asigna un valor entre 0 y 1 a la diferencia entre a_l y a_k para el criterio $j^{\text{ésimo}}$

La función Usual (ver ítem 1 arriba, Tabla 2.2) es utilizada para criterios cualitativos. Siguiendo la notación de la Tabla 2.2, si a_l es mejor que a_k , para el criterio $j^{\text{ésimo}}$ se le asigna 1; de otro modo 0.

Por otra parte, la Función Lineal (ver ítem 5, arriba Tabla 2.2), se utiliza para los criterios cuantitativos, donde q_j y p_j representan los umbrales de indiferencia y preferencia absoluta para las $d_j(a_l, a_k)$.

En el archivo *eje AMC PROMETHEE.xls* para cada criterio: PRA, PFE, EPI, etc. hay una Tabla para aplicar las funciones de preferencias. Las tablas están numeradas 2.2.-, 3.2.-, ..., 8.2.- (Celdas K22 a K78).

1. Considerando la forma funcional lineal desarrollada en la Tabla 2.3, en la tabla 2.2., tomar las diferencias de la PRA desde la Tabla 2.1 y transformarlas con la función de preferencia considerando los valores p_i y q_i .

Nota 1: para realizar esta operación se sugiere utilizar la función lógica(si) en Excel. por ejemplo, en la celda L24:

$$=SI(C24>\$C\$17; 1; SI(C24>\$C\$16;((C24-\$C\$16)/(\$C\$17-\$C\$16));0))$$

(en este caso, en L24 la aplicación de esta fórmula da como resultado 0)

Copiar la formula y completar la Tabla 2.2 con la aplicación de la función de preferencias.

2. Chequee los resultados obtenidos.
3. Repita la operación realizada en los ítems anteriores para completar las tablas 3.2, ..., 8.2-
Nota 2: La Tabla 8.2. corresponde a un criterio cualitativo (EPI), al que se le aplica la función de preferencias Usual (1, Tabla 2.3) y por tanto se utiliza otra función lógica (SI). Por ejemplo, en la celda L80:

$$=SI(C80>0;1;0)$$

Nota 3: Inicialmente utilizamos los parámetros 10% y 90% del rango de los criterios para q_j y p_j respectivamente. Posteriormente, se realiza el análisis de sensibilidad de estos parámetros.

Paso 4. Calcular el índice multicriterio o de preferencia global

$$\pi(a_l, a_k) = \sum_j w_j P_j(a_l, a_k)$$

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1$$

donde $\pi(a_l, a_k)$ es el índice multicriterio que mide cuanto a_l es preferida a a_k considerando todos los criterios.

w_j es el peso o ponderador para las preferencias $P_j(a_l, a_k)$ para el criterio $j^{\text{ésimo}}$, con los valores normalizados i.e. cuanto mayor sea w_j más peso toma el criterio $j^{\text{ésimo}}$ en el índice multicriterio.

En el archivo *eje AMC PROMETHEE.xls*, complete la Tabla 9 (Celda K89).

-
1. En la Tabla 9, para cada celda realice la suma ponderada por el peso normalizado de las preferencias obtenidas en las Tablas 2.2 a 8.2.

Por ejemplo,

$$\pi(PEU1, PEU2) = w_1 P_1(PEU1, A_{PEU2}) + w_2 P_2(PEU1, PEU2) + \dots + w_7 P_7(PEU1, PEU2).$$

En la celda L91, es equivalente, a la siguiente formula en Excel:

$$=+\$C\$14*L24+\$D\$14*L34+\$E\$14*L43+\$F\$14*L53+\$G\$14*L62+\$H\$14*L71+\$I\$14*L80$$

(en este caso, en L24 la aplicación de esta fórmula da como resultado 0)

Copiar la formula y completar la tabla 9 para el cálculo del índice multicriterio o de preferencia global.

2. Chequee los resultados.
-

Paso 5. Calcular las fortalezas y debilidades de cada alternativa.

Ordenamiento parcial: PROMETHE I

$$\varphi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{l \neq k} \pi(a_l, a_k), \quad \varphi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{l \neq k} \pi(a_i, a_k)$$

donde, $\varphi^+(a_i)$ representa la fortaleza, establece en qué medida la alternativa (a_i) es preferida de acuerdo a la comparación de a pares con las otras alternativas en todos los criterios. i.e. cuanto más grande es el valor $\varphi^+(a_i)$ mejor se considera la misma.

En contraste, $\varphi^-(a_i)$ representa la debilidad, establece en qué medida la alternativa (a_i) no es preferida de acuerdo a la comparación de a pares con las otras alternativas en todos los criterios. i.e. cuanto más grande es el valor $\varphi^-(a_i)$ peor se considera la misma.

En el archivo: *eje AMC PROMETHEE.xls*, realice el cálculo de fortalezas (Q91:Q95) y debilidades (L96, M96...P96) en Tabla 9:

1. Para estimar las fortalezas de PEU_i , se suma el *índice de preferencia global* a través de la fila correspondiente y se la divide por el número de alternativas menos 1 (n-1). En la columna de la Tabla 9 debajo de la celda etiquetada *Fortaleza* para PEU1 se suma en la celda Q91, los valores de las celdas L91:P91, y luego se divide dicho monto por 4. Para el resto de las PEU se realiza el mismo procedimiento para calcular las respectivas fortalezas.
 2. Para estimar las debilidades de PEU_i , se suma el *índice de preferencia global* a través de la columna correspondiente y se la divide por el número de alternativas menos 1 (n-
-

1). En la fila de la Tabla 9 a la derecha de la celda etiquetada *Debilidades* se deben sumar en la celda L96, los valores de las celdas L91:L95, y luego se divide dicho monto por 4. Para el resto de las PEU se realiza el mismo procedimiento para calcular las respectivas debilidades.

Paso 6. Calcular el flujo neto

Ordenamiento completo: PROMETHEE II

$$\varphi(a_i) = \varphi^+(a_i) - \varphi^-(a_i)$$

Donde $\varphi(a_i)$ es el flujo neto, la diferencia entre fortalezas y debilidades de cada alternativa. El mismo puede tomar valores positivos o negativos. Cuanto más grande sea el valor de $\varphi(a_i)$ mejor será considerada la alternativa.

En el archivo *eje AMC PROMETHEE.xls*,

1. Calcule el flujo neto en la Tabla 10, (celda K3). Por las fórmulas contenidas en dicha tabla se copian los resultados obtenidos de fortalezas y debilidades para cada una de las PEU en la tabla 9.

Nota: se sugiere expresar a las debilidades en términos negativos (multiplicando por -1) para visualizar más apropiadamente en un gráfico.

En la columna neto se realiza la correspondiente diferencia entre Fortalezas y Debilidades en cada uno de los PEU.

2. Se pueden observar en la pestaña *Resultados Gráficos* los resultados de la Tabla 10.
-

Interpretación de los resultados

Tres posibilidades existen para una alternativa (a_i) comparada con las otras alternativas:

En general, (a_l) es *preferida* a (a_k) si:

$$\varphi^+(a_l) > \varphi^+(a_k) \text{ y } \varphi^-(a_l) < \varphi^-(a_k), \text{ o}$$

$$\varphi^+(a_l) = \varphi^+(a_k) \text{ y } \varphi^-(a_l) < \varphi^-(a_k), \text{ o}$$

$$\varphi^+(a_l) > \varphi^+(a_k) \text{ y } \varphi^-(a_l) = \varphi^-(a_k)$$

En tanto, (a_l) es *indiferente* a (a_k) si:

$$\varphi^+(a_l) = \varphi^+(a_k) \text{ y } \varphi^-(a_l) = \varphi^-(a_k)$$

En tanto, (a_l) es *incomparable* a (a_k) si:

$\varphi^+(a_l) > \varphi^+(a_k)$ y $\varphi^-(a_l) > \varphi^-(a_k)$, o

$\varphi^+(a_l) < \varphi^+(a_k)$ y $\varphi^-(a_l) < \varphi^-(a_k)$

Finalmente, el *ranking* total puede ser construido ordenando de mayor a menor las a_i , reflejando el orden de las alternativas preferidas (sin son comparables).

En el archivo: *eje AMC PROMETHEE.xls*, Tabla 11, celda R3:

1. Ordene las alternativas de acuerdo a las Fortalezas.

Para la alternativa *PEU1* Tendencial en la celda T5 utilice la función JERARQUIA:

=JERARQUIA(\$M5;\$M\$5:\$M\$9;)

Copie la fórmula para T6:T9

2. Ordene las alternativas de acuerdo a las Debilidades.

Para la alternativa *PEU1* Tendencial en la celda U5 utilice la función JERARQUIA:

=JERARQUIA (\$N5;\$N\$5:\$N\$9;)

Copie la fórmula para U6:U9

3. Ordene las alternativas de acuerdo al Flujo neto.

Para la alternativa *PEU1* Tendencial en la celda S5 utilice la función JERARQUIA:

=JERARQUIA(\$L5;\$L\$5:\$L\$9;)

Copie la fórmula para S6:S9

Posteriormente se realiza el análisis y la interpretación de los resultados.

Ejercicios de análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad de los parámetros utilizados permite explorar las características de los resultados y bajo qué modificaciones de los valores de los criterios, ponderadores, o umbrales de indiferencia o preferencia absoluta, una PEU_i puede superar a las otras, o cuan estables son los resultados obtenidos originalmente. Cuando modificamos algunos parámetros podemos utilizar directamente la tabla de sensibilidad de Excel. En tanto, si se modifican varios criterios o parámetros conviene hablar de cambio de escenario y posiblemente trabajarlo en diferentes hojas de Excel.

En el archivo: *eje AMC PROMETHEE.xls*, en el caso de desear hacer análisis de sensibilidad sobre los umbrales de indiferencia y preferencia absoluta (por defecto en la planilla se trabaja con valores del 10% y 90% respectivamente), se puede modificar dichos valores a 20% y 80%,

30% y 70%, etc. Para ello simplemente modificar el valor de la celda A16, correspondiente al umbral de indiferencia, y automáticamente se modifica el umbral de preferencia absoluta, y se resuelve el problema completo de acuerdo a estos nuevos valores.

Resolución con software Visual PROMETHEE

Existen una versión libre del software con el algoritmo PROMETHEE y otros complementos para comparar las alternativas en problemas multicriterio discreto (para mayores detalles ver en: Bertrand, 2013). Los interesados pueden bajar el software y usarlo considerando los siguientes pasos:

- Ingresar a <http://www.promethee-gaia.net/software.html>
- Descargar la versión académica/versiones locales/lenguaje español
- Instalar *Visual PROMETHEE*
- Abrir el software
- Crear nuevo problema: [*Archivo/Nuevo*]
- Cargar número de alternativas (5), de criterios (7) y de escenarios (1)
- Guardar Archivo en formato *Visual PROMETHEE* [*Archivo/Guardar*]
- Armar Grupos [*Modelo/Grupos de Criterios*]. Luego etiquetar grupos *Nuevo/nombre* y nombre corto y color de contorno.
- Repetir procedimiento para cada grupo de criterio que se quiera crear.

Nota: Aquí se suelen considerar como grupos de criterios: Sociales, Ambientales, Económicos, Políticos, etc.

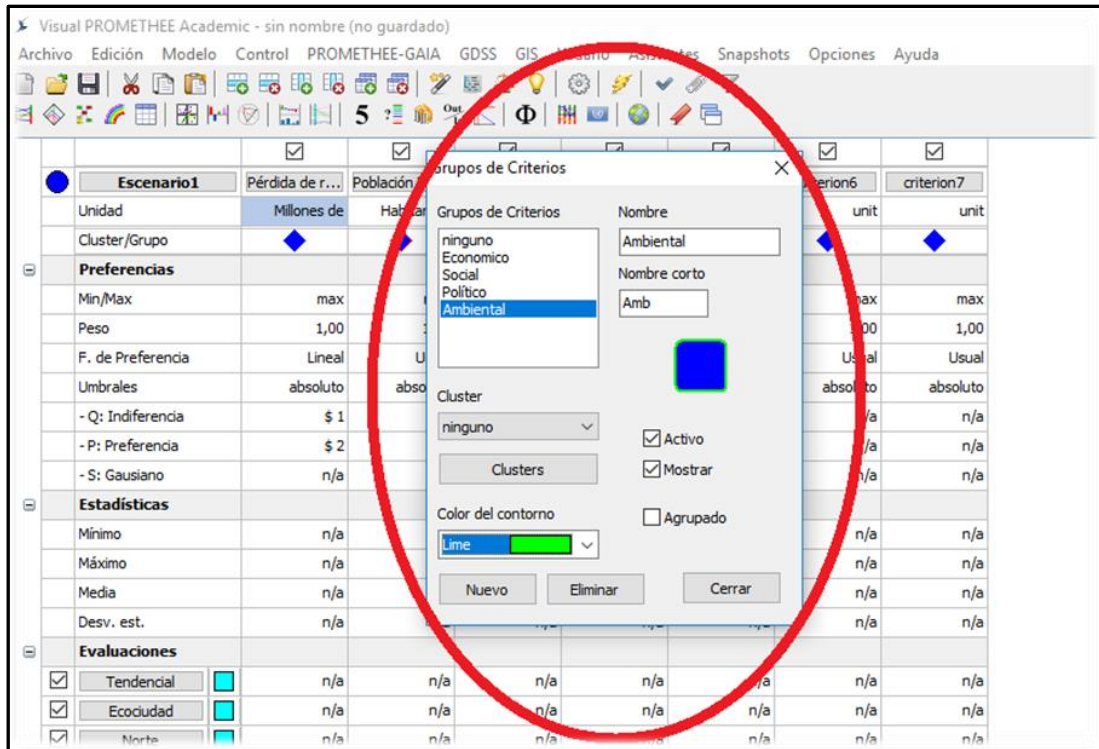


Figura 3.2. Visual PROMETHEE: Creación de grupos de criterios

9. Etiquetar alternativas [Debajo de *Evaluaciones*, Oprimir *Action 1*], Etiquetar Nombre y Nombre Corto. Y así sucesivamente con el resto de las alternativas/acciones.

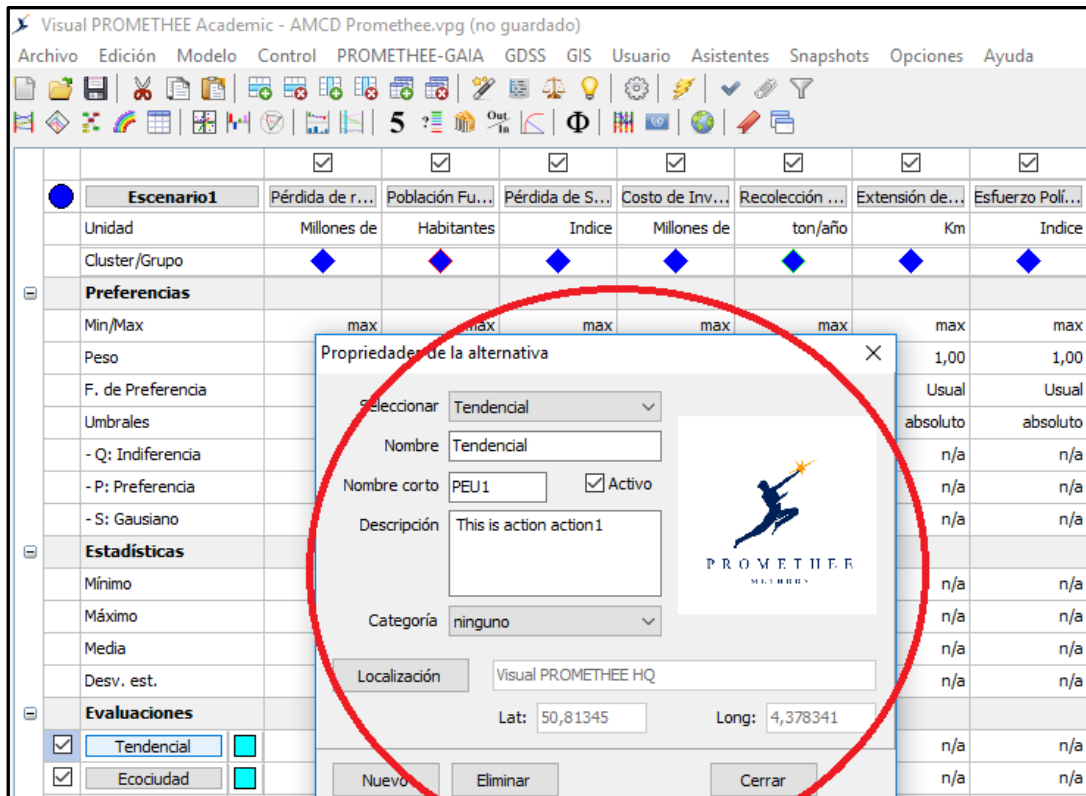


Figura 3.3. Visual PROMETHEE: Etiquetar alternativas

10. Etiquetar criterios y seleccionarlo según tipo de indicador: cuantitativo o cualitativo [A la derecha de *Escenario 1*, Oprimir *Criterion 1*] Etiquetar Nombre, Nombre corto, Indicar grupo de criterio, Escala (Cualitativa, Numérica, Moneda). Si es cuantitativo, indicar número de decimales, si es Moneda, el tipo de moneda.

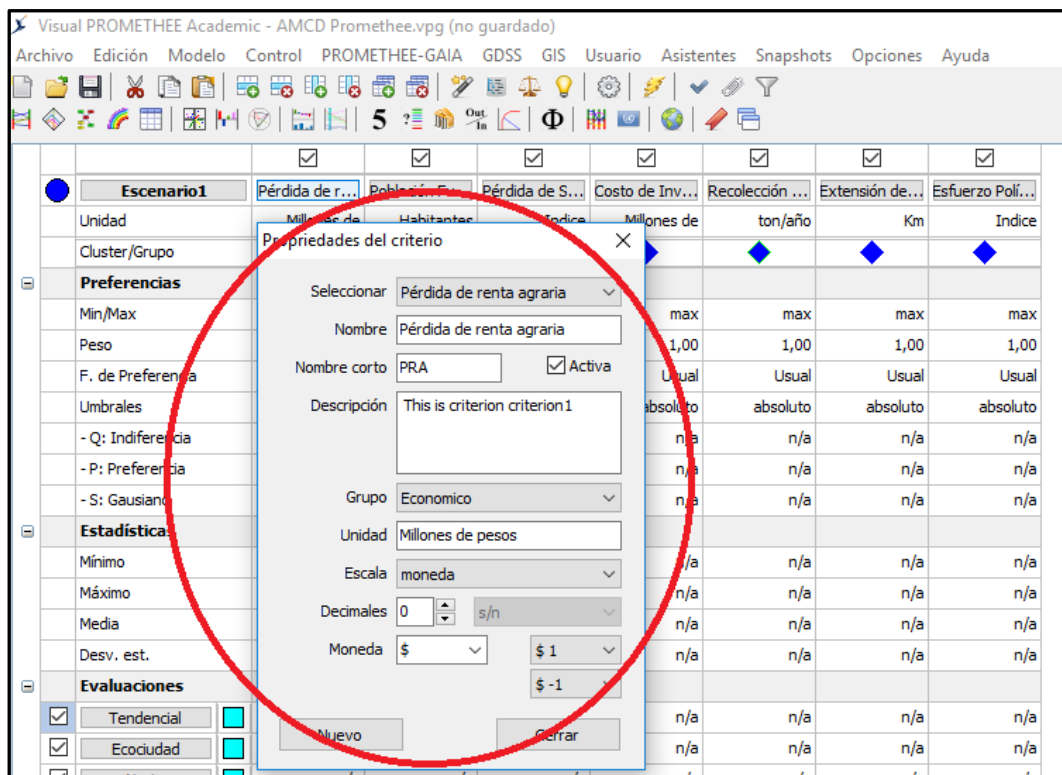


Figura 3.4. Visual PROMETHEE: Etiquetar criterios

11. Cargar datos de la matriz. Copiar valores de la planilla de Excel [Los datos deben cargarse manualmente, tanto los de la matriz de decisión, como los de los umbrales de indiferencia (q), los umbrales de preferencia absoluta (p) y los umbrales de S de la Forma Gaussiana cuando corresponda]

12. Asignar Preferencias (a excepción del criterio PFE, colocar Minimizar en todos los criterios).

13. Asignar Función de Preferencias (para criterios cualitativos seleccionar Función *Usual* y criterios cuantitativos seleccionar Función *Lineal*)

14. Asignar Umbral, por defecto *Absoluto*

15. Cargar umbral de indiferencia (q) y de preferencia (p). Tomar valores de planilla de Excel

16. Chequear ordenamiento de alternativas con igual ponderación para todos los criterios. Para ver los resultados del *ranking* en un cuadro [*PROMETHEE-GAIA/Tabla de flujos PROMETHEE*]

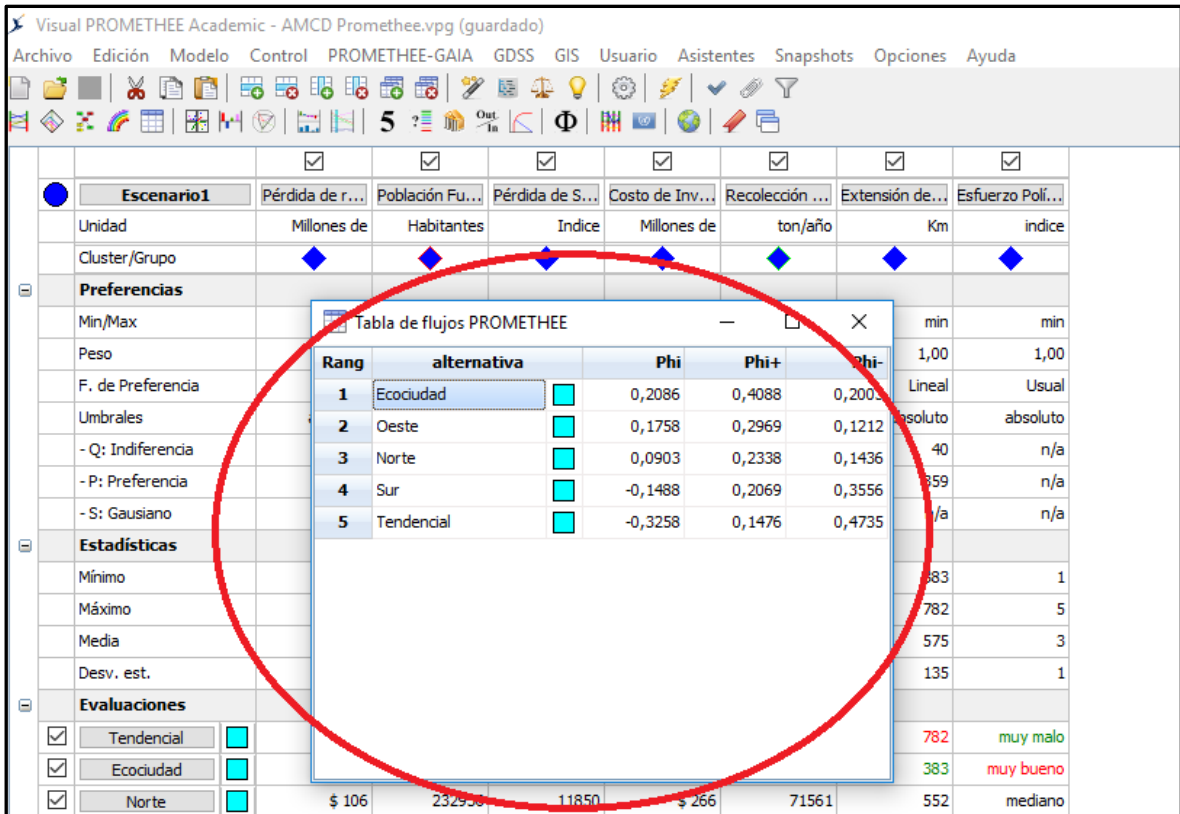


Figura 3.5. Visual PROMETHEE: Ordenamiento de alternativas (Tabla Flujos)

Para ver los mismos resultados de manera gráfica también, en términos de Fortalezas y Debilidades [*PROMETHEE-GAIA/Ordenamiento PROMETHEE*, pestaña *Ordenamiento parcial Promethee I*]

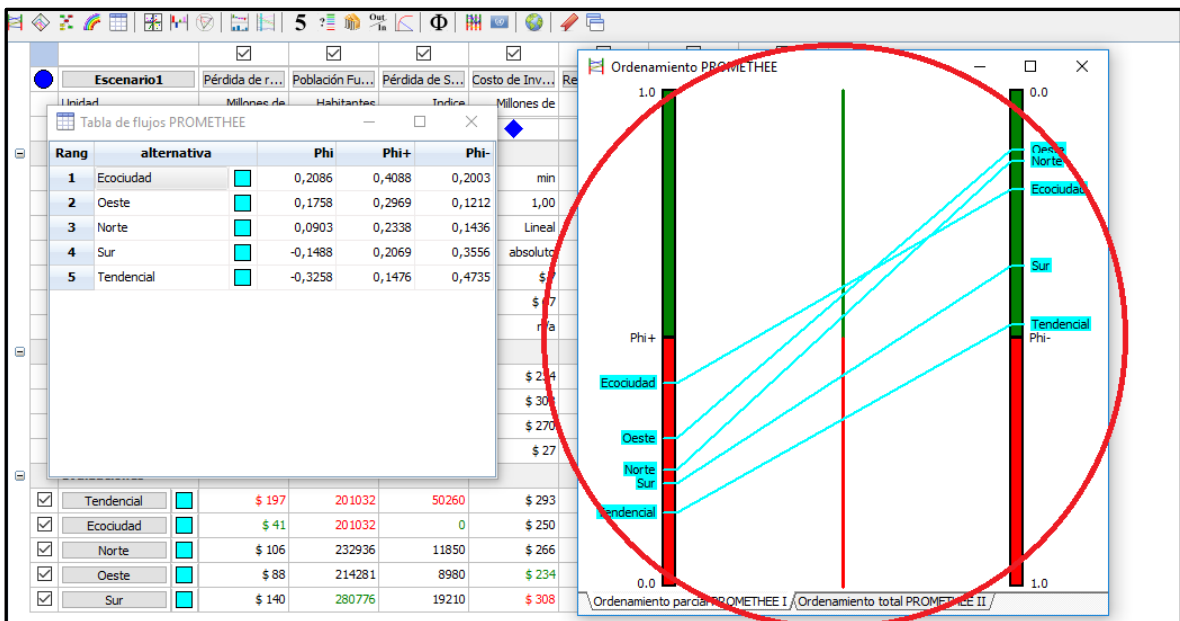


Figura 3.6. Visual PROMETHEE: Representación gráfica ordenamiento parcial de alternativas

Las líneas que unen las fortalezas y debilidades para cada una de las alternativas analizadas nos dan una pauta para la interpretación de los resultados. La alternativa PEU2 Ecociudad muestra un mejor desempeño en cuanto a Fortalezas, no obstante, las alternativas PEU4 Oeste y PEU3 Norte presentan menores debilidades (las líneas entre estas tres alternativas se cruzan), por tanto, bajo estas condiciones estas tres alternativas no resultan comparables.

Otra forma de analizar los resultados en términos del ordenamiento parcial de manera gráfica

[*PROMETHEE-GAIA/PROMETHEE network*]

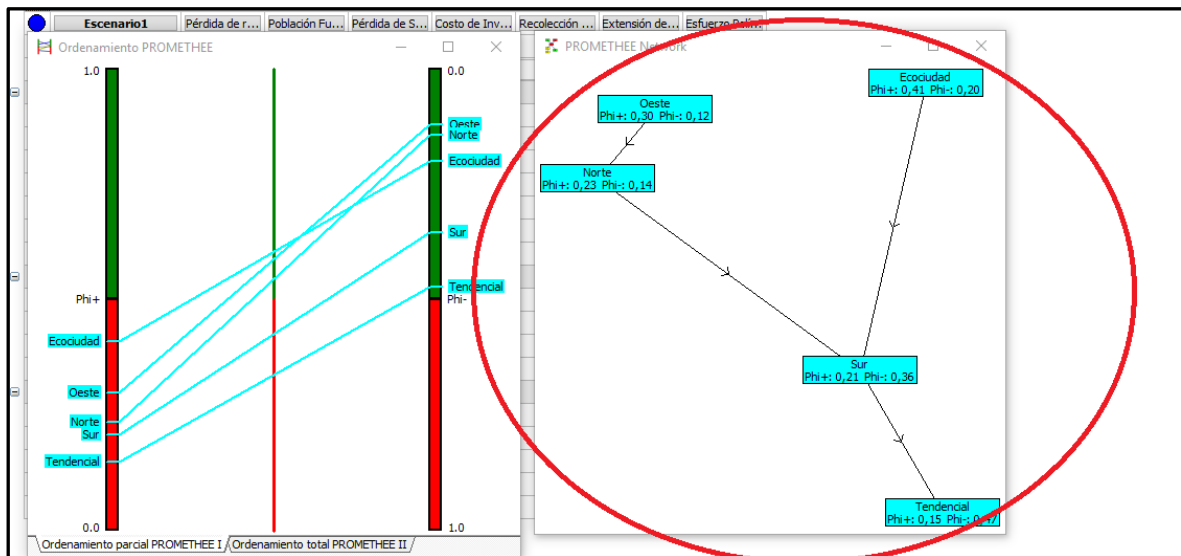


Figura 3.7. Visual PROMETHEE: Representación gráfica ordenamiento de alternativas (PROMETHEE network)

Mediante esta opción de representación gráfica de los resultados, se puede advertir que aquellas alternativas ubicadas en la parte superior unidas mediante flechas a otras alternativas en la parte inferior, son preferidas de manera completa a estas últimas. Como se advierte en la figura 3.7 la *PEU2 Ecociudad* es preferida a *PEU5 Sur*, pero no se puede afirmar lo mismo con relación a *PEU3 Oeste* y *PEU4 Norte*. De estas dos, *PEU4 Oeste* es preferida a *PEU3 Norte*, y ambas son preferidas a *PEU5 Sur*. Por último, *PEU2 Ecociudad*, *PEU3 Norte*, *PEU4 Oeste* y *PEU5 Sur* son preferidas a *PEU1 Tendencial*.

Para observar los resultados de manera gráfica, en términos de Flujo Neto [*PROMETHEE-GAIA/Ordenamiento PROMETHEE*, pestaña Ordenamiento total Promethee II]

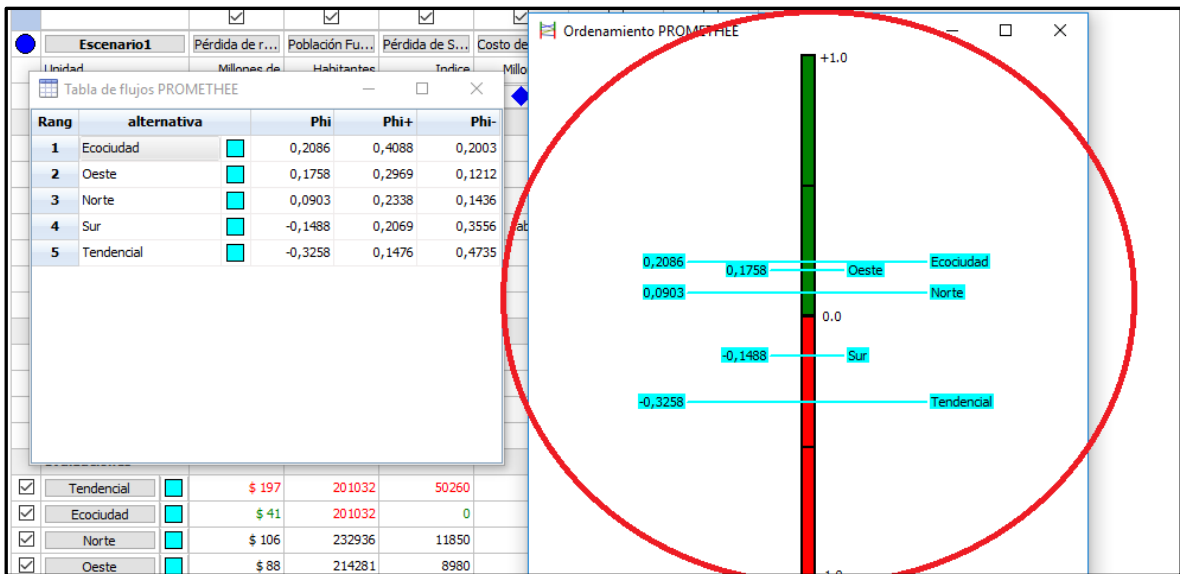


Figura 3.8. Visual PROMETHEE: Representación gráfica ordenamiento completo de alternativas

17. Analizar ordenamientos de alternativas con diferentes ponderaciones [*PROMETHEE-GAIA/Walking Weights*]

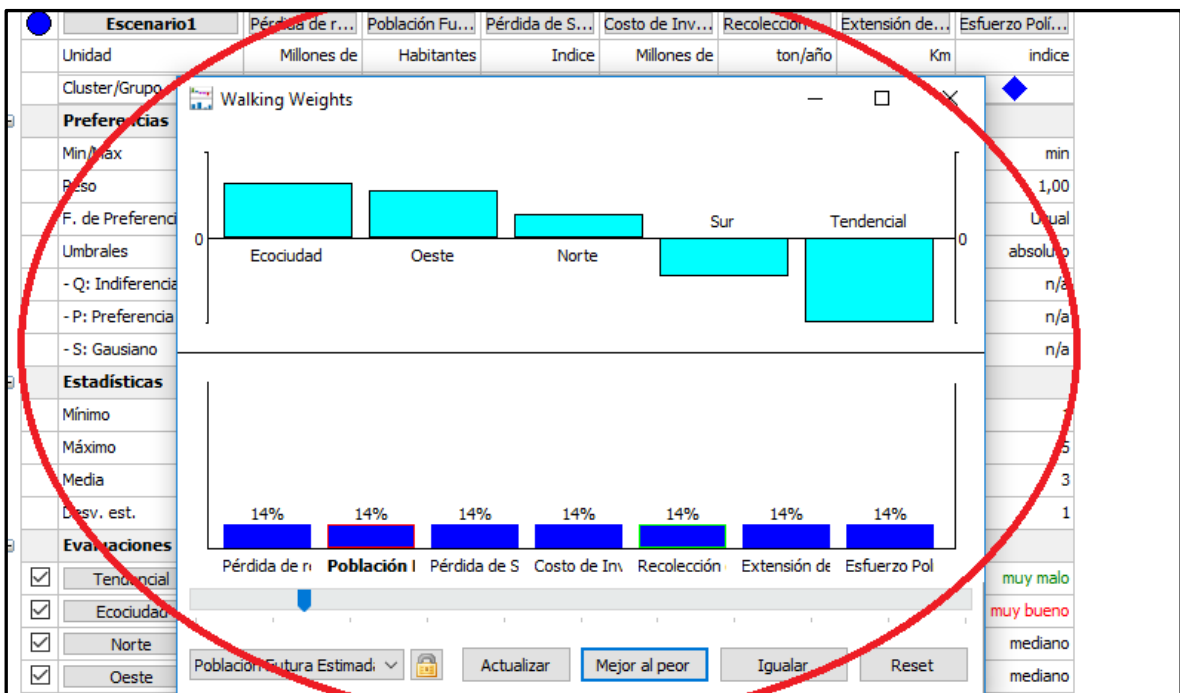


Figura 3.9. Visual PROMETHEE: Análisis de ordenamiento de alternativas con distintas ponderaciones

En este caso, se selecciona el criterio cuya ponderación se quiere modificar y se observa como esto repercute en la ponderación relativa del resto de los indicadores, y en el resultado de Flujo Neto (parte superior del gráfico) de cada una de las alternativas. Para fijar la ponderación de algún criterio, debe presionarse el botón con el “candado”.

Otra forma de realizar sensibilidad sobre la ponderación de manera jerárquica (considerando los grupos de criterios definidos) o absoluta (analizando cada criterio por separado) [Asistente/Ponderar por jerarquía],

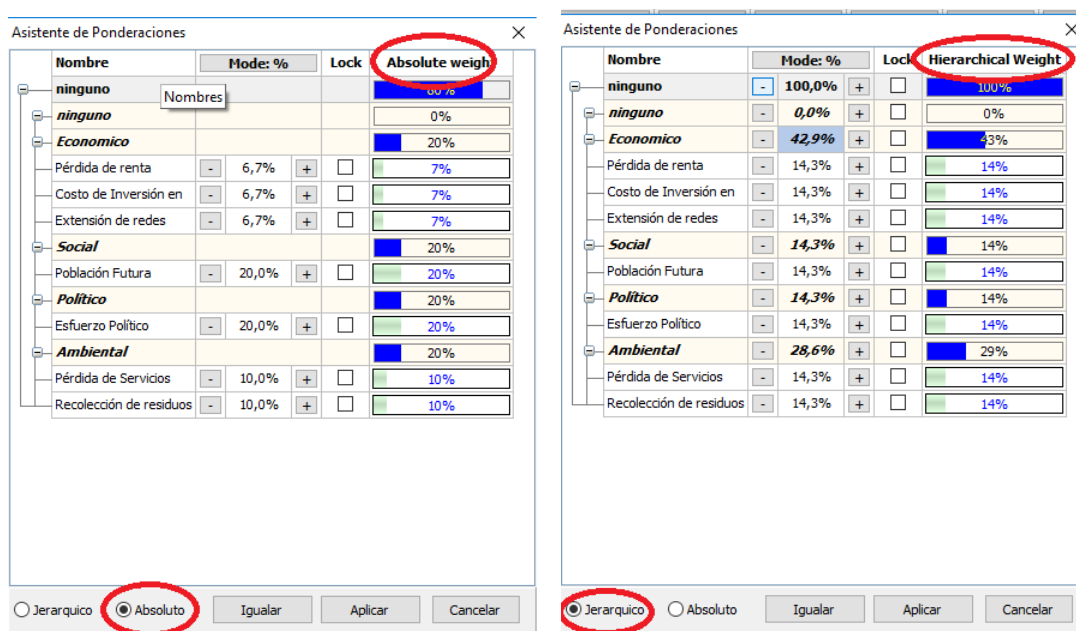


Figura 3.10. Visual PROMETHEE: Sensibilidad ponderaciones jerárquicas y absolutas

En esta última sección, hemos presentado las principales funciones para operar el software Visual PROMETHEE en lo que refiere a la presentación de resultados y la modificación de ponderaciones. Para profundizar en las aplicaciones del software se recomienda la lectura del manual del software: <http://en.promethee-gaia.net/assets/vpmanual.pdf>

Materiales adicionales

Los interesados y potenciales usuarios del libro pueden acceder a las versiones digitales de presentaciones, ejercicios, videos que se pueden acceder y descargar desde el repositorio Institucional de INTA (<https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/13610>) usados en la capacitación o para el relevamiento de datos en terrenos. Estos materiales digitales complementarios pueden ser de utilidad para:

- replicar los resultados de las aplicaciones, y aprender,
- armar los encuentros/talleres – virtuales y presenciales,
- trabajar la capacidad de observación,
- trabajar el pensamiento paralelo (de Bono, 1988),
- aprender a aplicar paso a paso el algoritmo PROMETHEE,
- armar los cuestionarios para evaluar los resultados del taller,
- identificar los criterios,

En general, los materiales se pueden usar como punto de partida para que luego el lector los adapte a sus necesidades.

Referencias bibliográficas

- Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A., y Aghdasi, M. (2010). "PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications". *European Journal of Operational Research* 200:198-215.
- Bertrand, M. (2013). "Visual PROMETHEE 1.4 Manual and help file "
- Brans, J.-P., y Mareschal, B. (2005). "Promethee methods", p. 163-195, *In* Figueira, J., *et al.*, eds. Multiple criteria decision analysis: *State of the art surveys*, Vol. 78. Kluwer Academic Publishers.
- CPC. 2001. Constitución de la provincia de Córdoba (1987) y su reforma *In* Córdoba, L. d. l. p. d., (ed.), Córdoba, Argentina.
- Brans, J. P., & De Smet, Y. (2016). PROMETHEE methods. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, 187-219.
- de Prada, J.D., Degioanni, A., Cisneros, J.M., Galfioni, M.A., y Cantero G., A. (2012). "Diseño y evaluación de propuestas de ordenamiento de territorio: La urbanización sobre tierras rurales". AAEA. XLIII Reunión Anual Asociación Argentina de Economía Agraria, Corrientes, Argentina. 9 - 11 de octubre.
- de Prada, J. D., Degioanni, A., Cisneros, J. M., Galfioni, M. A., y Cantero G., A. (2017). Evaluación multicriterio de la expansión urbana, visión 2030. El caso Río Cuarto, Córdoba, Argentina. . *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 17, 153-168.
- Delgadino, F., Rodríguez, J.M., Albrisi, S., Mosquera, M., Rubinstein, H., Moiso, E., Arranz, P., Brarda, J.P., y Speranza, P. (2011). "Proyecto Córdoba 2025. Resumen Ejecutivo". Universidad Nacional de Córdoba y Cámara Argentina de la Construcción Córdoba, Argentina.
- EEA. (2006). "Urban sprawl in Europe. The ignored challenge". *European Environment Agency*, 1050 Copenhagen K.
- Gómez Orea, D. (2008). "Ordenación Territorial". 2ª ed. pág. Mundi-Prensa S.A., Madrid, España.
- Matus, C. (2008). "El líder sin estado mayor." 197 pág. Universidad Nacional de la Matanza, Buenos Aires, Argentina.
- McElfish, J.M. (2007). "Ten things wrong with sprawl". Environmental Law Institute, Washington, D.C.
- Morello, J., Buzai, G.D., Baxendale, C.A., Rodríguez, A.F., Matteucci, S.D., Godagnone, R.E., y Casas, R. (2009). "Urbanization and the consumption of fertile land and other ecological changes: the case of Buenos Aires". *Environment & Urbanization* 12:119-131.
- Pereyra, C., de Prada, J.D., Cisneros, J.M., y Giayetto, O. (2013). "Ordenación territorial en el medio rural", p. 9-29, *In* Giayetto, O., *et al.*, eds. Bases para el ordenamiento del territorio en el medio rural: Tres cuencas pilotos. Región Centro Argentina. Universidad Nacional de Río Cuarto, Universidad Nacional de Entre Ríos, Universidad Nacional del Litoral y Universidad Nacional de Rosario., Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Pomerol, J. C., y Barba-Romero, S. (2000). Weighting methods and associated problems. En *Multicriterion decision in management. Principles and Practice* (pp. 75-104): Springer Science + Business Media, LLC.